

DIVISION DE EDUCACIÓN CONTINUA
FACULTAD DE INGENIERÍA
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

*XXI CURSO INTERNACIONAL DE INGENIERÍA SÍSMICA
MODULO III: DISEÑO SÍSMICO DE EDIFICIOS*

Del 12 al 22 de junio de 1995
Horario: L a V de 17 a 21 Hrs.
Coordinador: Dr. Eduardo Miranda

DIRECTORIO DE PROFESORES

1. Dr. Sergio M. Alcocer Martínez de Castro
Jefe del Area de Ensayes Sísmicos
Centro Nacional de Prevención de Desastres
Av. Delfín Madrigal No. 665
Col. Pedregal de Santo Domingo
Delegación Coyoacán
04360 México, D.F.
Tel. 606 - 9837, 606 - 9739
Fax 606 - 1608
2. M. en I. Jaime Antoniano y Mateos
Director
Investigación de Operaciones, S.A.
Calle Dos #2, Tercer Piso
Col. Acacias Del Valle
Delegación Benito Juárez
03230 México, D.F.
Tel. 524 - 4767
Fax 524 - 4605
3. Dr. José Luis Camba Castañeda
Director
Ingenieros Consultores
Campeche No. 305
Col. Condesa
Delegación Cuahatemoc
06100 México, D.F.
Tel. 564 - 3002, 564 - 3328
Fax
4. Ing. Oscar de Buen López de Heredia
Ing. José Luis Sánchez Martínez
Colinas De Buen, S.A. de C.V.
Plaza Villa de Madrid No. 2
Col. Roma
Delegación Cuahatemoc
06700 México, D.F.
Tel. 207 - 7077
Fax
5. Ing. Oscar De La Torre Rangel
Gerente General
Proyecto Estructural, S.A.
Darwin No. 18, 1er Piso
Col. Anzures
Delegación Cuauhtemoc
México, D.F.
Tel. 203 - 0307, 203 - 1541
Fax 203 - 6047
6. M. en C. Enrique Del Valle Calderón
Consultor Especializado
Consultoría Integral en Ingeniería
Fuente de la Luna No. 73
Col. Fuentes del Pedregal
Del. Alvaro Obregón
01900 México, D.F.
Tel. 652 - 1273, 568 - 5694
Fax
7. Dr. Oscar Hernández Basilio
Director General
Proyectos Tensión, S.A. de C.V.
Río Tiber No. 70, 2do Piso
Col. Cuauhtemoc
Delegación Cuauhtemoc
06500 México, D.F.
Tel. 207- 9837, 872 - 2357
Fax
8. Dr. Oscar López Bátiz
Investigador
Centro Nacional de Prevención de Desastres
Av. Delfín Madrigal No. 665
Col. Pedregal de Santo Domingo
Delegación Coyoacán
04360 México, D.F.
Tel. 606 - 9837, 606 - 9739
Fax 606 - 1608

9. Dr. Eduardo Miranda Mijares
Director de Proyectos Especiales
Alonso y Miranda, S.C.
Calle Dos #2, Cuarto Piso
Col. Acacias Del Valle
Delegación Benito Juárez
03230 México, D.F.
Tels. 524 - 8697, 524 - 9277
Fax 524 - 8895

10. M. en I. José Luis Trigos
Director General
Trigos Ingenieros Consultores
Av. Tasqueña No. 1818, Local 9
Col. Coyoacán
Delegación Coyoacán
04280 México, D.F.
Tel. 689 - 3888
Fax

JORGE ARTURO LOPEZ RODRIGUEZ
 ENC. DEL DEPTO. DE ESTRUCTURAS
 COM. DE VIALIDAD Y TRANSP. U.
 AV. UNIVERSIDAD 800
 COL. SANTA CRUZ ATOYAC
 DEL. B. JUAREZ, MEXICO, D.F.
 TEL. 688.89 55 EXT. 281

RICARDO MARROQUIN ROSADA
 JEFE DE AREA
 UNIV. IBEROAMERICANA
 PROL. P. DE LA REFORMA 880
 COL. LOMAS SANTA FE RIO
 DEL. ALVARO OBRAGON, MEX.D.F.
 TEL. 292 25 08.

MIGUEL A. MARTINEZ GUERRA
 DIRECTOR
 ASESORIA Y DISEÑO ESTRUCTURAL
 RIO NIAGARA 9-604
 DEL. CUAUHEMOC, MEX. D.F.
 TEL. 208 16 75

JOSE FCO. ORTEGA LOERA
 DIRECTOR
 INGS. CONSULTORES, SA.CV.
 INSURGENTES NORTE 755-2
 COL. SAN SIMON
 06920 MEXICO, D.F.
 TEL. 597 86 09

MARTIN REYES NORIEGA
 SUPERVISOR TECNICO
 S.C.T. D.GRA. CARR. FED.
 ALTADENA 23
 COL. NAPOLES
 DEL. B. JUAREZ, MEX. D.F.
 TEL. 687 61 99 EXT. 127

CLAUDIA ROJAS SERNA
 CERRO DE LAS CRUCES 218
 COL. LOS PIRULES
 54040 TLALNEPANTLA, EDO. DE MEX.

VICTOR SCHMIDT DIAZ
 COORD. LAB. DE ING. SISMICA
 UNIVERSIDAD DE COSTA RICA
 NIVEL 3-A FAC. DE INGENIERIA
 2060 UNIVERSIDAD DE COSTA RICA
 SAN PEDRO COSTA RICA
 TEL. 253 73 31

URIEL TEXCALPA VILLARRUEL
 COORD. DE LA LICENCIATURA
 UNIV. IBEROAMERICANA ING.CIVIL
 PROL. P. DE LA REFORMA 880
 COL. LOMAS DE SANTA FE
 01210 MEXICO, D.F.
 TEL. 292 25 08

RODOLFO TORRES CASTILLO
 COM. VIALIDAD Y TRANSP. U.
 AV. UNIVERSIDAD 800
 COL. SANTA CRUZ ATOYAC
 DEL. B. JUAREZ, MEXICO, D.F.

MIGUEL TORRES SANTOYO
 JEFE DE OFICINA
 I.M.P.
 EJE LAZARO CARDENAS 152
 COL. ATEPEHUACAN
 DEL. AZCAPOTZALCO, MEX. D.F.
 TEL. 368 59 11 EXT. 21119

CARLOS TOVAR MENDEZ
INGENIERO CIVIL
MINISTERIO DE VIVIENDA
AV. MEXICO CIUDAD PANAMA
PANAMA, PANAMA
TEL. 62 72 22

HUMBERTO VEHARA GUERRERO
PROFESOR Y COORD. AREA CONSTRUC.
UNIV. AUT. DE QUERETARO, ING.
CENTRO UNIVERSITARIO
76010 QUERETARO, QRO.
TEL. 42 16 60 34

HECTOR G. VARGAS VARGAS
INGENIERO CONSTRUCTOR
PROFESIONAL INDEPENDIENTE
CARRERA 12 No. 20 - 72 PISO 2
TUNJA, COLOMBIA

LINO JOHN VASALLO MALDONADO
PROFESIONAL 1/DEPTO. ING. SISMICA
FUNDACION VENEZOLANA DE INVESTI-
GACIONES SISMOLOGICAS
PROL. CALLE MARAS
EL LLANITO Y CARACAS UZLA
TEL. 257 76 72 - 90 84

RAUL VERA NOGUEZ
PROFESOR
FAC. DE ING. U.A.E.M.
CIUDAD UNIVERSITARIA S/N TOLUCA
50130 TOLUCA, EDO. DE MEXICO
TEL. 14 08 55

SALVADOR VILLARREAL SALAZAR
INGENIERO CIVIL
INDEPENDIENTE
ZACATECAS 176-402
COL. ROMA
DEL. CUAUHTEMOC, MEXICO, D.F.
TEL. 584 31 69



**FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA**

XX CURSO INTERNACIONAL DE INGENIERIA SISMICA

MODULO III: DISEÑO SISMICO DE EDIFICIOS

**RECOMENDACIONES PARA EL DISEÑO SISMICO CON BASE EN LA EXPERIENCIA
DE LOS SISMOS DE SEPTIEMBRE DE 1985
T E M A
ESTRUCTURACION DE EDIFICIOS**

M. EN C. ENRIQUE DEL VALLE CALDERON

RECOMENDACIONES PARA EL DISEÑO SISMICO CON BASE EN LA EXPERIENCIA DE LOS SISMOS DE SEPTIEMBRE DE 1985*

Enrique del Valle Calderón**

RESUMEN

Se analiza el proceso de cálculo que debe seguirse para diseñar una estructura contra sismos, discutiendo las incertidumbres existentes en la estimación del sismo de diseño y la elaboración de los modelos matemáticos. Con base en lo ocurrido durante los sismos de septiembre, se evalúan también las recomendaciones sobre estructuración propuestas por diversos autores y la influencia de la configuración de los edificios en su respuesta sísmica.

SUMMARY

In this paper, the calculation process that must be undertaken to design a structure against earthquakes is analyzed. At the same time, the uncertainties in the estimation of the design seism and in the elaboration of mathematical models are discussed. Considering the events resulting from the september earthquakes, the construction recommendations proposed by several authors and the influence of the configuration of buildings on its seismic response are also evaluated.

* Ponencia presentada en el Seminario IMCYC sobre Evaluación y Reparación de Estructuras de Concreto Dañadas por Sismos, el 19 de noviembre de 1985.

** Ingeniero Civil, UNAM. Maestro en Ciencias, Universidad de Illinois. Profesor, División de Estudios de Posgrado, Facultad de Ingeniería, UNAM.

ciones dinámicas importantes; en otros casos, había cambios de rigidez y/o de masa en la misma estructura; también pueden haber influido los efectos P - Δ (cargas verticales actuando sobre los desplazamientos horizontales), ya sea por deformabilidad de la estructura misma o por rotación de la base sumada a lo anterior. Es posible asimismo que la respuesta en un modo superior resultara determinante.

5. ¿Qué tipo de estructura y cimentación se recomienda para las diferentes zonas del Distrito Federal, y por qué?

En general, se recomiendan estructuras rígidas en suelos blandos, y flexibles en suelos duros, para que las características dinámicas de la estructura (periodos) no coincidan con las del suelo. En este temblor se observó muy claramente el problema de resonancia, ya que los edificios con periodos cercanos a dos segundos (que fue el periodo dominante del movimiento del suelo en terreno blando) fueron los más afectados.

Por lo que respecta a tipos de cimentación, esto dependerá sobre todo de la capacidad de carga del terreno.

6. Para revisar una estructura dañada (con grietas en ejemplares estructurales, causadas por los movimientos de la propia estructura), si se está modelando dicha estructura para hacer un análisis por computadora ¿cómo se pueden o deben considerar estos elementos estructurales agrietados? es decir, ¿con qué valores de área, inercia, longitudes, etc.?

Si se han fabricado algunos aditivos epóxicos para concreto, que le confieran mayor resistencia a la tensión, y obviamente a la compresión ¿se considera recomendable su uso, de acuerdo con los resultados de pruebas de laboratorio?

Para revisar una estructura, dañada o no, uno de los modelos matemáticos que deben suponerse debe tomar en cuenta el efecto de agrietamiento en las secciones, lo que reduce los momentos de inercia hasta en un 50 % en algunos casos; en torsión, por ejemplo, la rigidez se reduce hasta en un 90 %, según algunos autores. Considero que es un tema al que se ha prestado poca atención. En ciertas ocasiones, la inyección de resinas epóxicas en las grietas restituye las propiedades originales a la estructura, aunque a veces este procedimiento es difícil y, sobre todo, resulta costoso.



**FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA**

XX CURSO INTERNACIONAL DE INGENIERIA SISMICA

MODULO III: DISEÑO SISMICO DE EDIFICIOS

EL MODELO MATEMATICO DE UNA ESTRUCTURA

T E M A

CRITERIO DE DISEÑO SISMICO

M. EN C. ENRIQUE DEL VALLE CALDERON

EL MODELO MATEMATICO DE UNA ESTRUCTURA

Enrique del Valle *

Resumen

El análisis de cualquier estructura se lleva a cabo elaborando un modelo matemático que trata de tomar en cuenta las peculiaridades estructurales que se tengan. Sin embargo, es frecuente que no haya concordancia entre el modelo matemático que se empleó en el análisis de la estructura y la estructura real, ya sea por deficiencias en las hipótesis simplificadoras que se hicieron al elaborar el modelo matemático para que éste sea fácil de analizar con las herramientas disponibles (programas de computadoras, métodos numéricos iterativos, métodos aproximados, etc.) o por que no hubo una transmisión adecuada de esas hipótesis a las personas que se encargan de materializar la estructura, a través de los planos constructivos y lo que se construye modifica substancialmente esas hipótesis, invalidando el análisis que se hizo y alterando radicalmente el comportamiento previsto bajo diversas solicitaciones.

En este artículo se discuten algunas de las idealizaciones comunes y los problemas que suelen presentarse.

* Profesor titular. División de Estudios de Posgrado, Facultad de Ingeniería, UNAM

Presidente, Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural.

Introducción

Al analizar una estructura hiperestática es necesario establecer la compatibilidad entre esfuerzos y deformaciones con objeto de calcular las reacciones y elementos del estado de fuerzas internas, o elementos mecánicos (momentos flexionantes, fuerzas cortantes y fuerzas normales) y poder diseñar la estructura para que resista esos efectos.

En general las estructuras son tridimensionales, pero para facilitar su análisis se elaboran modelos matemáticos más simples, reduciéndolas a estructuras planas cuyo análisis es más sencillo, buscándose que los resultados sean conservadores.

Recientemente se han desarrollado varios programas de computadora que permiten realizar el análisis de las estructuras en tres dimensiones encontrándose, en ocasiones, que las hipótesis simplificadoras hechas para reducir las al plano no siempre conducen a resultados conservadores. Se han desarrollado también métodos que emplean elementos finitos para definir mejor las distribuciones de esfuerzos y deformaciones en distintas zonas de la estructura.

Por otra parte, existen muchas incertidumbres en la determinación de los parámetros que intervienen en el modelo matemático de la estructura, ref. 1, como son el módulo de elasticidad del material, los momentos de inercia y áreas de las secciones de las barras, la influencia de agrietamiento y refuerzo en el caso de estructuras de concreto reforzado, la influencia de las zonas de intersección entre barras especialmente cuando

Las dimensiones de éstas son una fracción importante de la longitud, la contribución del sistema de piso a la rigidez de las trabes, etc., lo que dificulta la definición del modelo matemático adecuado.

Lo más común es suponer que el comportamiento de la estructura será elástico; sin embargo, hay ocasiones en que el análisis mismo implica comportamiento no lineal, lo que suele tomarse en cuenta de manera muy simplificada, empleando, por ejemplo, factores de reducción por ductilidad, como en el caso del análisis sísmico aplicando el Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal.

Es importante reconocer que lo importante no es el análisis del modelo matemático en sí, ya que por muy bien hecho que esté, empleando las mejores herramientas disponibles, si no hay congruencia entre el modelo y la estructura real, dicho análisis y seguramente el diseño de la estructura empleando sus resultados, no sirven para nada, aunque sin embargo, se puede tener una falsa sensación de seguridad.

En muchas ocasiones, siendo razonables las hipótesis hechas y los parámetros empleados en el análisis y diseño de la estructura, son invalidados al momento de construirla ya sea por información inadecuada a través de los planos constructivos o bien por no respetar las recomendaciones contenidas en ellos debido a que puedan ser difíciles de realizar y el constructor considere que no son necesarios ciertos detalles que allí se especifican.

Una de las causas más frecuentes de daños por sismo, por ejemplo, se debe a la manera inadecuada en que se construyen los muros divisorios y otros elementos "no estructurales" que el proyectista consideró que no era conveniente que formaran parte integrante de la estructura, pero que, o no espe-

cificó claramente en los planos cómo se debían construir, esto es, que holguras debía haber entre la estructura y esos elementos, o el constructor no respetó lo especificado, por falta de supervisión, negligencia o incluso a veces, de buena fé, pensando que si liga esos elementos a la estructura va a incrementar la resistencia de la misma, ref. 2. Los efectos de esto pueden ser desastrosos y llevar incluso al colapso parcial o total de la estructura.

Otro problema que suele presentarse es el de la sobresimplificación del modelo de la estructura para que sea económico su análisis y diseño, debido a la dificultad que enfrentan los estructuristas para obtener una remuneración adecuada por sus servicios. Muchas veces las personas que solicitan el cálculo de la estructura creen lograr grandes economías pagando muy poco por el cálculo de la misma, lo que obliga al estructurista a reducir su trabajo al mínimo, tipificando excesivamente y diseñando en general la estructura sobrada, lo que redunda en un costo de obra mucho mayor que el ahorro que se hizo en los cálculos y quedando la incertidumbre de que el análisis y diseño no fueron lo suficientemente detallados y puede haber algunas zonas críticas que no hayan quedado sobradas, que presenten problemas posteriores. Desgraciadamente se ha detectado que esta situación ha sido propiciada en buena parte por personas carentes de escrúpulos y ética profesional, que cobran muy barato, pero no analizan ni diseñan la estructura, sino que, basados en una dudosa experiencia "inventan" las secciones y armados de los distintos elementos de la estructura, entregando ésta resuelta en uno o dos planos llenos de tablas con armados tipo, sin detalles adecuados y con unas memorias de cálculo francamente ridículas. Cabe comentar que actualmente el precio máximo que se paga por calcular una estructura normal es muy inferior a lo que se paga por "limpieza" de la obra al terminarse ésta.

Una situación frecuente también es que se exijan los cálculos en un plazo excesivamente breve, porque la obra ya se inició o porque hay que iniciarla en un plazo determinado, presionándose al estructurista para que termine su trabajo con brevedad, lo que impide en ocasiones realizar un análisis detallado y obliga a hacer hipótesis simplificadoras que no siempre son conservadoras.

En ocasiones el mismo estructurista invalida el análisis en que basó su diseño, cuando encuentra que los armados que obtiene a partir de los elementos mecánicos calculados son excesivos, por haber resultado inadecuado el dimensionamiento preliminar y decide modificar las secciones de algunos elementos sin verificar qué implicaciones puede tener esto en los resultados del análisis.

Discutiremos a continuación los tipos de estructuración y materiales de construcción más usuales.

Sistemas estructurales actuales.

Tipos de elementos estructurales. Para crear una estructura el ingeniero dispone de distintos tipos de elementos estructurales como son: barras de eje recto, trabajando a tensión o compresión simple, a flexión, en general combinada con fuerza cortante y muchas veces con tensión o compresión; muros, placas y losas, con cargas en su plano o perpendicularmente a él, arcos, cascarones, etc.

Los materiales más usados para fabricar estos elementos son, en aquellos que intervienen esfuerzos de tensión, el concreto reforzado o presforzado, el acero estructural y la madera; para aquellos en que predominan los esfuerzos de compresión, se emplea también con mucha frecuencia la mampostería de piedra, adobe o tabique, además de los ya mencionados.

Combinando materiales y elementos estructurales se integra lo que conocemos como un sistema estructural.

Entre las estructuras más usuales tenemos las edificaciones de tipo urbano, destinadas a habitación, fábricas, oficinas, recreación, etc. y hacia ellas se orientará la discusión que sigue.

Sistemas estructurales de tipo esquelético.

Se conoce como estructuras esqueléticas a las formadas por columnas y traveses, sobre las cuales apoya un sistema de piso que puede ser prefabricado o construido monolíticamente con las traveses, en el caso de las estructuras de concreto reforzado. Como se mencionó anteriormente, este tipo de estructuras es tridimensional, pero es común analizarlo como una serie de estructuras planas. Esta idealización es más o menos correcta cuando las columnas son verticales y están dispuestas de modo que se formen marcos en dos direcciones ortogonales. Cuando las columnas son inclinadas por requisitos funcionales o arquitectónicos ó los marcos no son ortogonales puede haber discrepancias importantes en los resultados del análisis como marcos planos con respecto a los obtenidos en un análisis como estructura tridimensional empleando un programa de computadora apropiado, ref. 3.

En el análisis de los marcos planos se supone usualmente que tanto las traveses como las columnas son elementos de eje recto de sección constante y se representan por sus ejes centroidales. No es común considerar la variación que ocasiona en la rigidez angular de las barras la zona de intersección entre ellas; en general este efecto es mayor en el caso de las columnas, que tienen longitudes menores y en las cuales la proporción de la zona de intersección con respecto al claro entre ejes suele ser importante sobre todo cuando las traveses son peraltadas. Si todos los marcos tienen traveses del mismo peralte el error que se

comete al despreciar este efecto no es grande, pero si, como ocurre en estructuras modernas, los marcos de fachadas tienen travesaños mucho más peraltados que las interiores para que se aprovechen pretilos o faldones como elementos estructurales, puede cometerse un error importante al calcular la rigidez ante fuerzas laterales que conduce a la subestimación de la rigidez real de los marcos con travesaños peraltados y por consiguiente la asignación de fuerzas de diseño inferiores a las que realmente absorberán esos marcos en función de su rigidez. Esta ha sido la causa de agrietamientos severos por sismo en estructuras de este tipo, en general debido a insuficiente resistencia por fuerza cortante de las columnas en el claro libre entre travesaños peraltados. Una de las recomendaciones más importantes para lograr ductilidad de estructuras de marcos situadas en zonas sísmicas es buscar que se formen articulaciones plásticas en las travesaños antes que en las columnas, pues de ese modo se reduce la demanda de ductilidad local que se requiere en esas articulaciones cuando las fuerzas actuantes son mayores que las de diseño, ref 4,5. Bertero, ref 6, recomienda que para evitar fallas por cortante las columnas se diseñen para resistir el cortante que resultaría de dividir la suma de los momentos últimos que resisten las columnas en sus extremos, entre el claro libre entre paños de travesaños, lo que conduce a un armado mucho mayor que el que se obtiene con las hipótesis normales.

Usualmente se supone que el momento de inercia es constante a lo largo de las barras; sin embargo, en el caso de estructuras de concreto, la posibilidad de que las secciones sometidas a momentos importantes funcionen como sección agrietada en vez de como sección plena, hace que los momentos de inercia efectivos sean en realidad variables. La inclusión de este hecho en el modelo matemático es bastante complicado, pues es necesario emplear un número mayor de

nudos al definir la estructura o emplear el método del elemento finito.

En el caso de las trabes es especialmente importante el efecto que puede tener la contribución del sistema de piso a la rigidez. El aumento en el momento de inercia de la trabe al tomar en cuenta sección T en lugar de rectangular cuando se cuela la losa monolítica con la trabe, es del orden de un 100%; sin embargo, habría que tomar en cuenta al incluir este efecto la posibilidad de agrietamiento de la sección en las zonas de máximo momento así como el signo del momento aplicado, pues la contribución de la losa a la rigidez será menor cuando esté sometida a esfuerzos de tensión y mayor cuando lo esté a compresión (ref 1)

La relación de rigideces relativas (I/l) entre trabes y columnas es un parámetro muy importante en el comportamiento de los marcos sometidos a fuerzas laterales. El análisis aproximado de ellos puede estar muy equivocado si dicha relación es pequeña. Blume, ref 7, propone el empleo de un índice de rotación nodal que es igual a la suma de rigideces relativas de las trabes entre la suma de rigideces relativas de las columnas en que apoyan esas trabes valuado en el piso medio del marco. Si el índice de rotación nodal es mayor de 0.1 habrá punto de inflexión en el diagrama de momentos de las columnas, esto es, se flexionarán con curvatura doble, pero si dicho valor es inferior, habrá algunos tramos de columna flexionadas en curvatura simple, lo que invalida los resultados de métodos aproximados. Si el valor es muy pequeño la estructura no será en realidad un marco sino un "voladizo disfrazado de marco",

Hay que recordar que muchos edificios han sido analizados empleando métodos aproximados, ya que el empleo de computadoras para este fin es relativamente reciente (a lo sumo unos 15 años).

Obviamente la rigidez lateral de una estructura con índice de rigidez nodal baja será menor. Esto es especialmente aplicable al sistema estructural de losas planas aligeradas sobre columnas, muy en boga en la construcción de edificios altos en la actualidad, que lleva a estructuras sumamente flexibles en las que se tienen daños importantes en elementos no estructurales, aún con temblores relativamente pequeños. Cabe mencionar aquí además que se ha encontrado que la ductilidad que son capaces de desarrollar estos sistemas no es tan alta como permite el Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal, debido a la dificultad de que se formen articulaciones plásticas en la zona de capiteles, ref 8, recomendándose que se use un valor de reducción por ductilidad cuando mucho de 2 para estructuras de este tipo, lo que implica diseñarlas para fuerzas laterales más grandes. En este tipo de sistema estructural se aplican también los comentarios relativos a variaciones en las propiedades geométricas de la estructura equivalente a lo largo de las barras.

Las deformaciones que producen las fuerzas cortantes y las normales en una estructura de tipo esquelético sometida a fuerzas horizontales suelen despreciarse considerando que su valor es muy pequeño comparado con las deformaciones que produce la flexión de las barras de la estructura. Esto generalmente es correcto, pero cuando la esbeltez de la estructura es grande, entendiéndose por esto el cociente de la altura de la estructura entre el ancho efectivo de la misma, sin incluir voladizos, los efectos de la fuerza normal son importantes, ref 1. Dowrick, ref 5, recomienda que no se usen relaciones de esbeltez mayores de 3 a 4, para evitar contribuciones importantes de las deformaciones por fuerza normal a la deformación total. Cuando las dimensiones de las barras son grandes en comparación con su claro libre, las deformaciones por cortante son asimismo importantes, y no tomarlas en cuenta puede llevar a errores de consideración.

Con el empleo cada vez más frecuente de las computadoras en el análisis de estructuras, es muy fácil tomar en cuenta ambos efectos. Cabe mencionar aquí que al tomar en cuenta las deformaciones producidas por fuerza normal en el análisis de cargas gravitacionales hay que tomar en cuenta la forma en que se va cargando la estructura en realidad al ir la construyendo, pues se dan ca sos en que los momentos flexionantes en las trabes resultan con signo contrario al que podría esperarse, debido a diferencias en el acortamiento de las columnas por carga axial.

Sistemas estructurales en que se emplean muros o marcos contraventeados

Se pueden presentar dos casos, que únicamente haya muros o marcos contraventeados o bien que éstos elementos se combinen con marcos sin contraventear.

El análisis y modelado matemático del primer caso es mucho más sencillo pues no hay los problemas de interacción que se presentan en el segundo caso.

Los muros pueden fabricarse con mampostería de tabique o de bloques de ce mento o bien hacerse de concreto reforzado cuando se requiere mayor resistencia.

La determinación de las propiedades elásticas de los muros de mampostería tiene serias incertidumbres pues dependen de una serie de parámetros difíciles de controlar, como son el espesor de las juntas, la calidad del mortero y de las piezas de mampostería, etc. Usualmente se confinan los muros de mampostería con elementos de concreto verticales y horizontales para mejorar las propiedades de ductilidad de estos elementos, ver refs 9 y 10. Este tipo de muros suele modelarse como viga, considerando que la mampostería absorbe fuerzas cortantes y los elementos de confinamiento absorben los efectos de momentos de volteo en el plano del muro. Alternativamente, puede usarse un modelo matemático tipo armadura, en que los patines y montantes son los elementos de confinamiento y los muros

se idealizan como diagonales de compresión equivalentes.

La precisión que puede alcanzarse en ambos modelos es muy dudosa, pues como se mencionó, es muy difícil estimar los parámetros que intervienen, tanto elásticos como geométricos. Al estimar estos últimos debe considerarse la posibilidad de agrietamiento, sobre todo de aquellos elementos que pueden estar a tensión.

El modelado de muros de concreto es un poco más confiable; sin embargo, es difícil la consideración de agrietamiento, lo que puede redundar en sobreestimaciones de la rigidez de estos elementos.

La hipótesis usual de que la base de los muros está empotrada no siempre es adecuada, pues se obtienen concentraciones importantes por momento de volteo que pueden provocar cierto giro de la cimentación, con pérdida importante de la rigidez, especialmente en el caso de suelos blandos.

Sería conveniente elaborar modelos en que se estudie el efecto de la variación en los parámetros elástico-geométricos, usando valores extremos para tener una idea de cuanto puede variar la rigidez y eficiencia de estas estructuras.

La ductilidad que puede alcanzarse empleando muros es en general menor que la que puede lograrse empleando marcos rígidos; esto tal vez pueda correlacionarse con el hecho de que la diferencia entre resistencia y rigidez es mucho mayor en el caso de los muros, en que la rigidez es varias veces la resistencia efectiva mientras que en los marcos la rigidez y la resistencia son del mismo orden de magnitud.

Como ya se indicó, esto es quizá la causa de los agrietamientos importantes de muros "no estructurales" cuando por alguna razón impiden la deformación de

estructuras flexibles, debido a su gran rigidez, pero sin que su resistencia sea compatible con dicha rigidez.

El caso en que se combinan muros y marcos en estructuras situadas en zonas sísmicas, es quizá el más complejo desde el punto de vista del análisis estructural, debido a la necesidad de considerar la interacción entre dos sistemas que tienden a deformarse de manera diferente al ser sometidos a fuerzas laterales, ya que los muros tienden a trabajar como vigas en voladizo, con deformaciones de entrepiso pequeñas en los primeros niveles y grandes en pisos superiores mientras que en los marcos, las deformaciones de entrepiso tienden a ser menores en pisos superiores, comparadas con las de pisos inferiores, debido a que la rigidez de entrepiso usualmente disminuye más lentamente que las fuerzas cortantes aplicadas. Esta situación hace que el porcentaje de fuerza cortante total que toman los marcos y los muros varía en cada entrepiso; en general, en pisos inferiores los muros absorben cerca de la totalidad de la fuerza cortante y la situación se invierte en los pisos superiores en que a veces los muros no sólo no ayudan sino que tienen lo que puede llamarse "rigidez negativa", ya que tienden a deformarse más que los marcos y aumenta la fuerza que deben absorber éstos.

Se han propuesto diversos modelos para analizar este problema. El propuesto desde 1964 por Khan y Sbarounis, ref 11, ilustra claramente las diferencias de comportamiento de ambos tipos de elementos, presentando además gráficas para estimar la deformación del conjunto a través de ciertos parámetros característicos, para varias condiciones de carga.

La idealización más común de los muros al analizar este tipo de sistemas por computadora es suponiendo que son "columnas anchas" y cuando hay traveses continuas con ellas, formando marcos, se supone infinitamente rígida la parte de trabe que queda comprendida entre el eje y el paño del muro, ref. 12. Los comentarios relativos a la posibilidad de agrietamientos, que reducen usualmente el valor del momento de inercia efectivo, y de los giros en la cimentación de los muros indican que este tipo de análisis no siempre es lo confiable que parece. Sería conveniente llevar a cabo análisis suponiendo valores extremos que podrían tener los distintos parámetros que intervienen.

Para el análisis por sismo usando el Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal, debe recordarse que el diseño de los marcos debe hacerse cuando menos para soportar el 25% del cortante total, si desea usarse el factor de reducción por ductilidad de 4, lo que con frecuencia no se hace.

Se han desarrollado algunos programas de computadora mucho más complejos que permiten el análisis de este tipo de sistemas empleando la técnica del elemento finito, ref. 3. El valor que se dé a los parámetros que intervienen es fundamental para el éxito que se obtenga en la predicción de los efectos de fuerzas laterales. La consideración de movimiento de la cimentación puede modificar radicalmente los resultados que se encuentren. Asimismo, la hipótesis de que a nivel de los pisos se tiene un diafragma rígido que obliga a moverse de igual forma a los marcos y muros no siempre es adecuada, sobre todo cuando la planta del edificio es muy alargada. Si éste es el caso debe tomarse en cuenta también el efecto de deformaciones de la losa en su plano.

Conclusiones y recomendaciones.

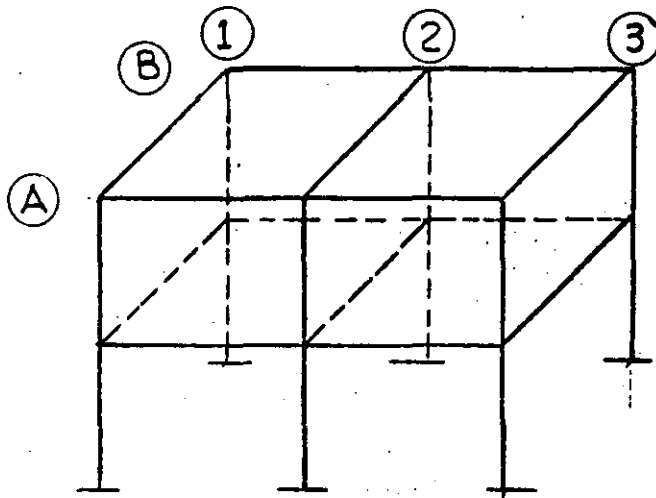
De lo expuesto anteriormente puede concluirse que a pesar de que se dispone en la actualidad de programas para computadora muy eficientes para el análisis de las estructuras, es importante definir con precisión cuáles son los valores más adecuados de los parámetros que intervienen, pues pueden cometerse errores importantes si no se logra ésto.

Como ya se indicó, en muchas ocasiones será necesario repetir el análisis con diferentes valores de los parámetros significativos, para ver el efecto que tienen dichas variaciones en los resultados y reforzar la estructura de manera adecuada.

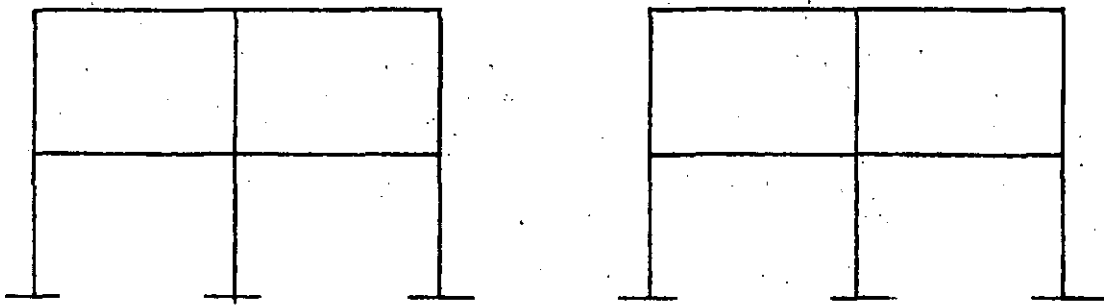
Las mayores incertidumbres están asociadas a las estructuras de mampostería. Las estructuras de concreto reforzado pueden tener también cambios importantes en los valores de diseño al variar algunos de los parámetros empleados. Las estructuras de acero son las más confiables desde este punto de vista, ya que las propiedades elástico-geométricas de las estructuras construídas con este material sufren mucho menos variación. En este caso, lo que debe cuidarse es que no aparezcan situaciones que modifiquen las hipótesis básicas, como puede ser la falla por pandeo local, lateral o general.

Referencias

1. Del Valle E. Consideraciones sobre la rigidez de estructuras sometidas a fuerzas laterales, Tercer Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Acapulco, Gro., 1971.
2. Del Valle E. Lecciones de sismos recientes. Diseño Sísmico de Edificios. VII Curso Internacional de Ingeniería Sísmica, División de Estudios de Posgrado, Facultad de Ingeniería, UNAM, 1981.
3. Berdón, S., Gandara, F., Pérez S. Programas de computadora para el análisis y diseño estructural disponibles en el mercado internacional. Tercer Congreso Nacional de Ingeniería Estructural. Morelia, Mich., 1982.
4. Park, R. y Paulay, T. Estructuras de Concreto Reforzado, cap. II. Editorial Limusa, 1979.
5. Dowrick, D.J. Earthquake resistant design. A manual for engineers and architects, John Wiley and Sons. 1977.
6. Bertero V. Comportamiento sísmico y criterios de estructuración de edificios de concreto. VI Curso Internacional de Ingeniería Sísmica. División de Estudios de Posgrado, Facultad de Ingeniería, UNAM, 1980.
7. Bieme, J.A. Dynamic characteristics of multistory buildings. Journal of the Structural Division, ASCE, Feb. 1968.
8. Meli R. y Rodríguez M. Diseño sísmico de edificios con losas reticulares. V Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Guadalajara, Jal. 1979.
9. Hernández, B.O., Meli R. Los muros de mampostería como elementos estructurales. Primer Congreso Nacional sobre Ingeniería Estructural, México, 1977.
10. Hernández, B.O. La mampostería en México. Estado del Conocimiento. Tercer Congreso Nacional de Ingeniería Estructural, Morelia, Mich., 1982.
11. Khan, F.R. y Sbarounis. Interaction of shear walls and frames, Journal of the Structural Division, ASCE, Jul. 1964.
12. Bazán, E. Sobre el análisis sísmico de edificios con muros rigidizantes, Primer Congreso Nacional sobre Ingeniería Estructural, México, 1977.

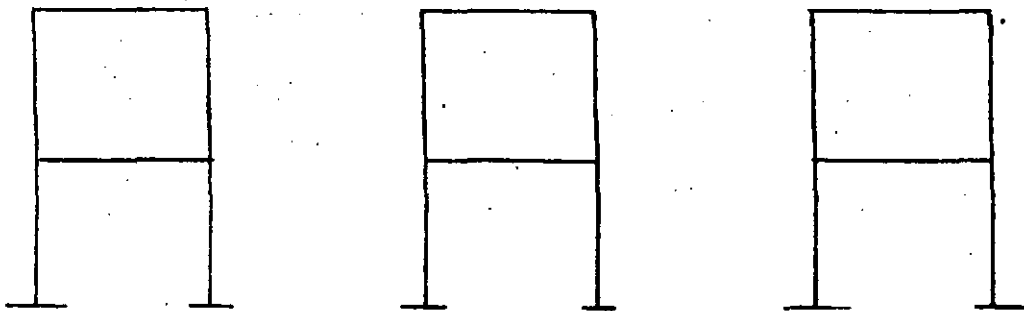


ESTRUCTURA EN EL ESPACIO



(A)

(B)

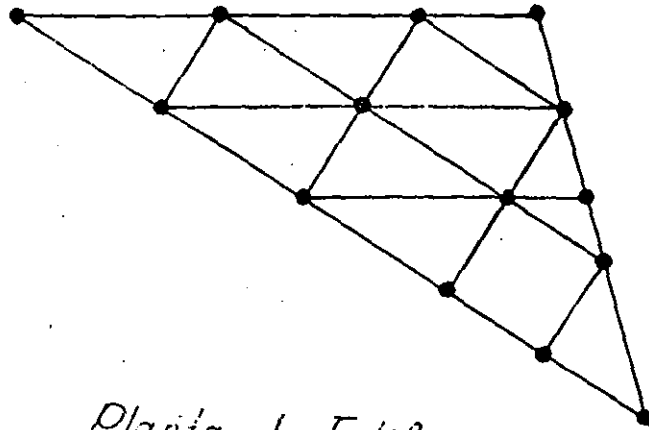


(1)

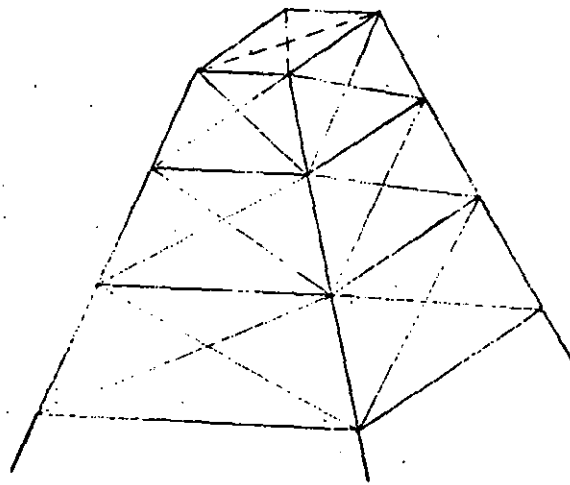
(2)

(3)

DESCOMPOSICION EN MARCOS PLANOS

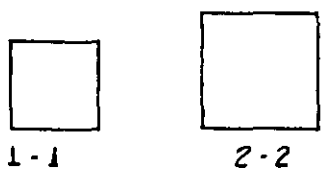
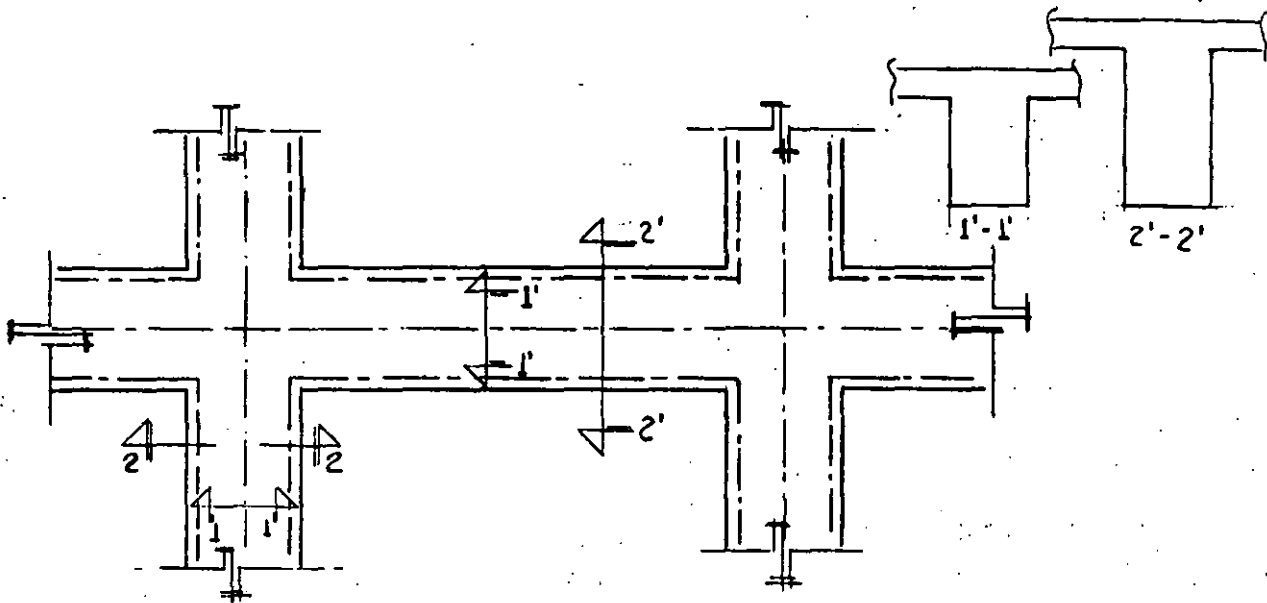


Planta de Edificio



Torre

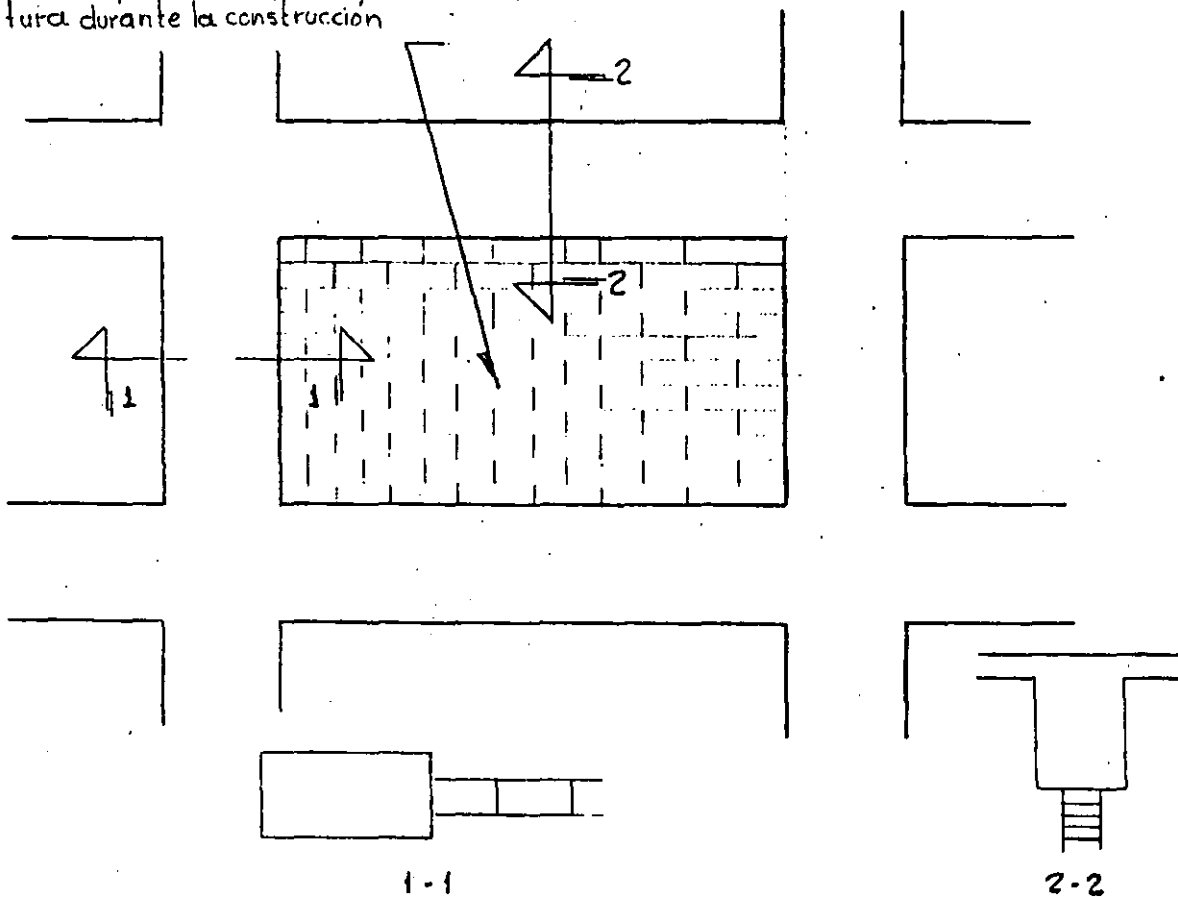
ESTRUCTURAS EN QUE LA DESCOMPOSICION EN MARCOS PLANOS NO ES CLARA



1-1 DIMENSIONES EMPLEADAS EN EL
1'-1' ANALISIS DE LA CONSTRUCCION

2-2 DIMENSIONES DE CONSTRUCCION PROPUESTAS
2'-2' EN LOS PLANOS SIN MODIFICAR EL ANALISIS

Muro de mampostería ligado a la estructura durante la construcción



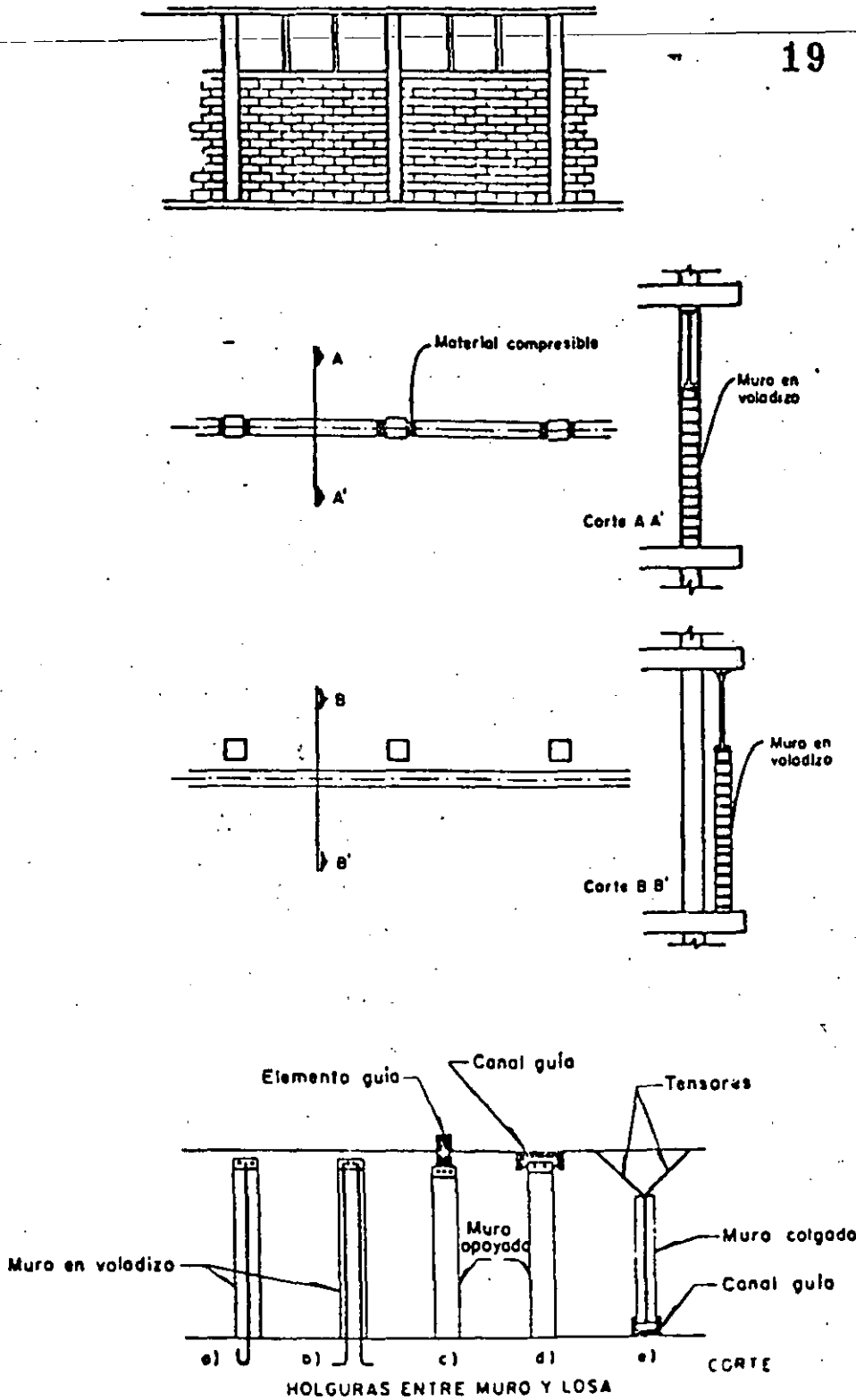
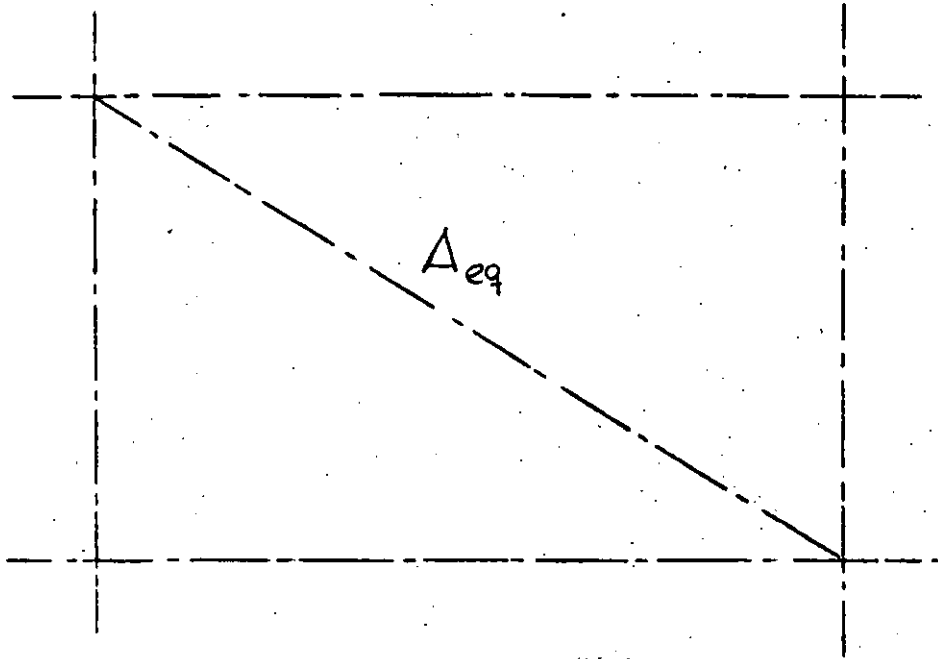
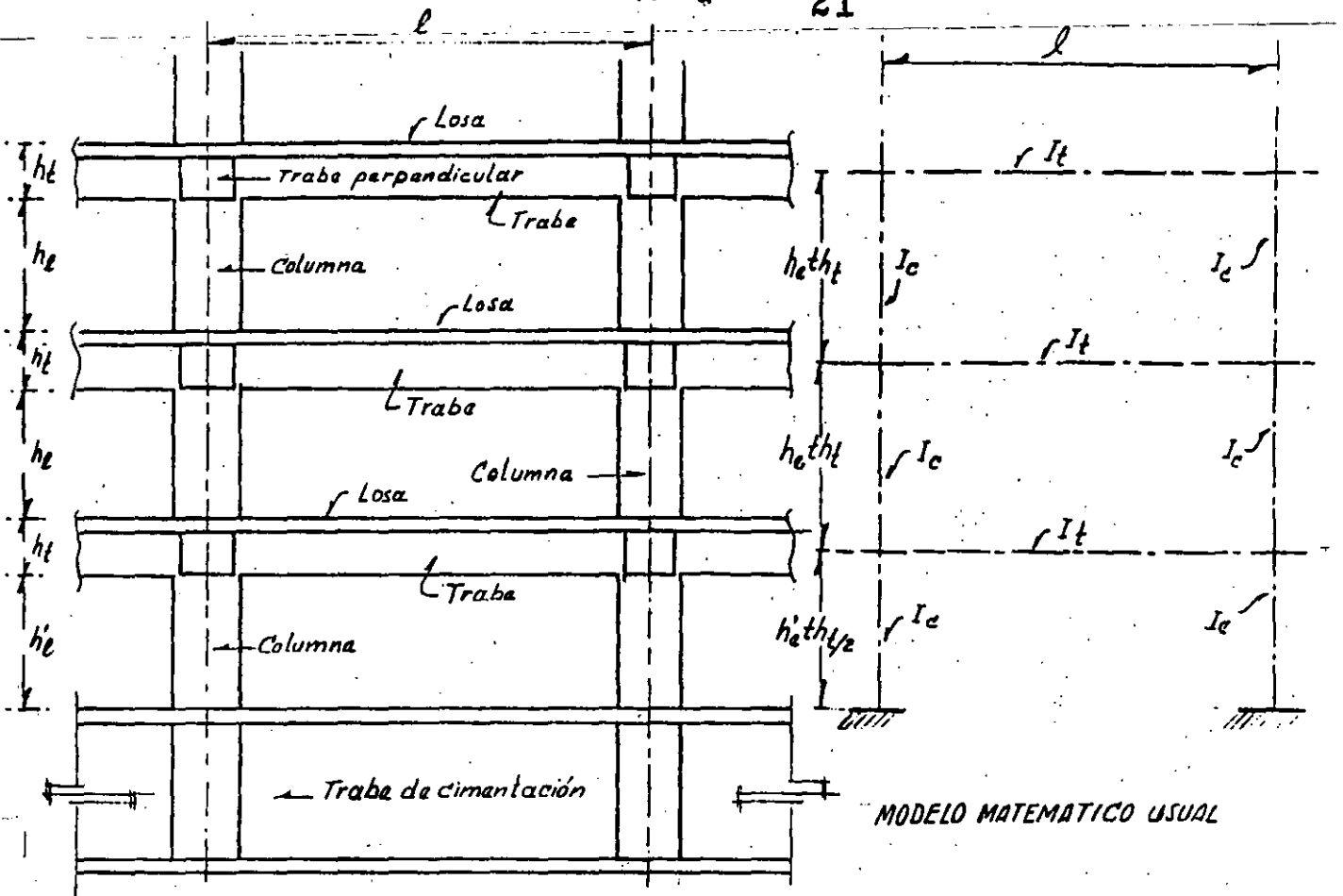


Fig 38. Posibles soluciones a muros que no forman parte integrante de la estructura

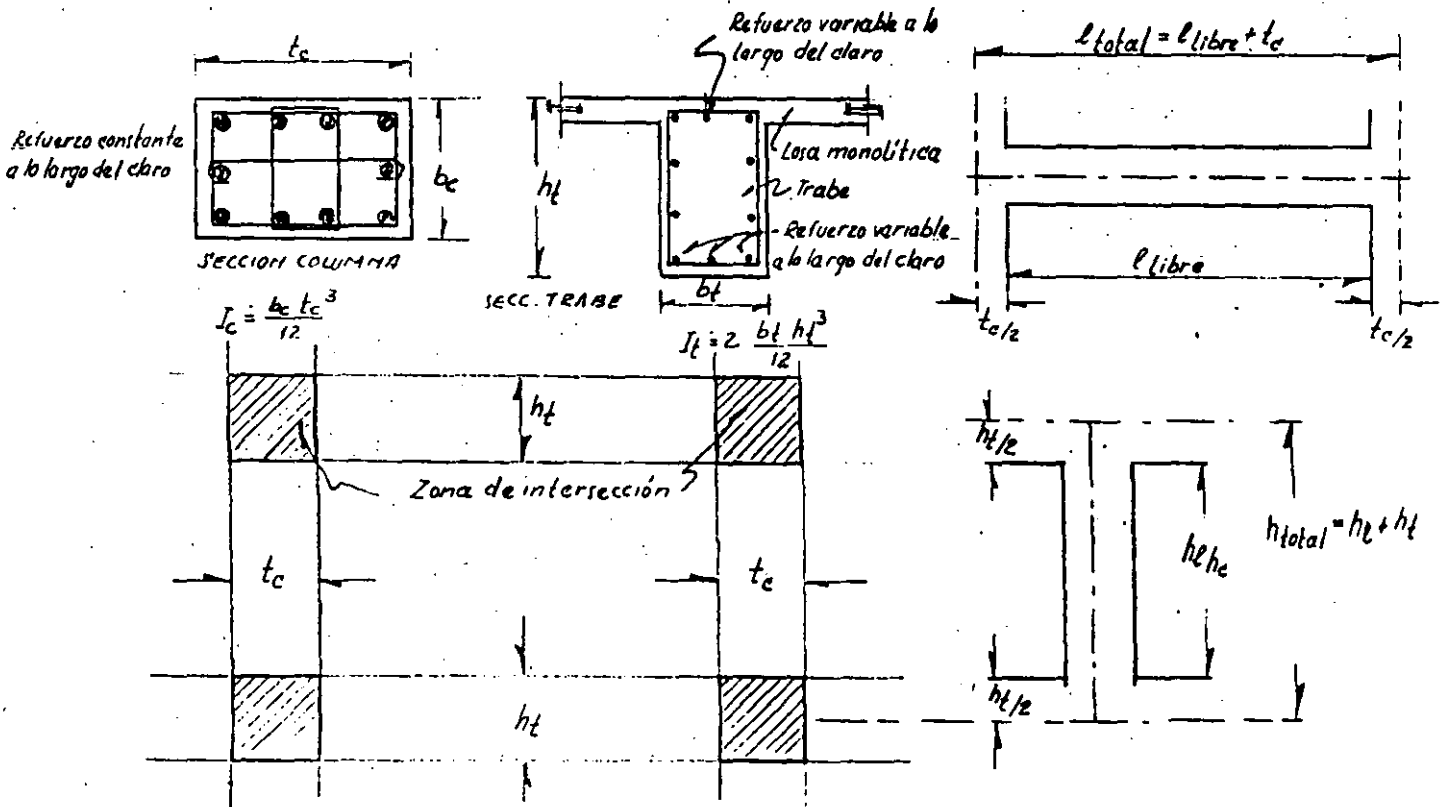


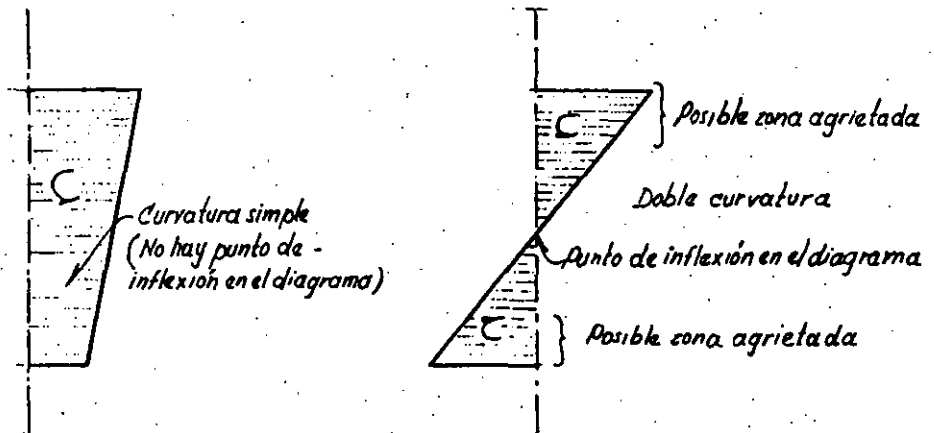
MODELO MATEMATICO PARA TOMAR EN CUENTA
UN MURO DE MAMPOSTERIA LIGADO A LA ESTRUCTURA



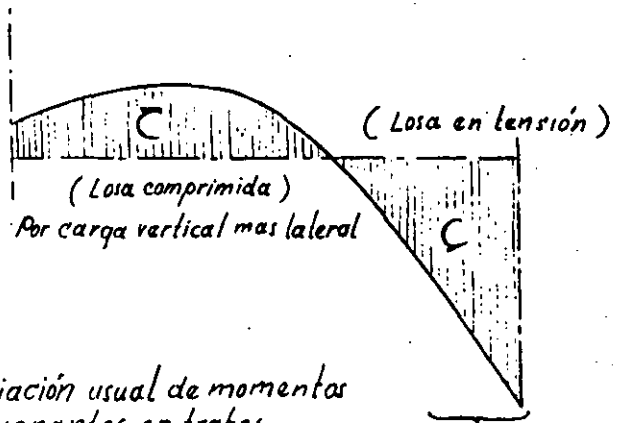
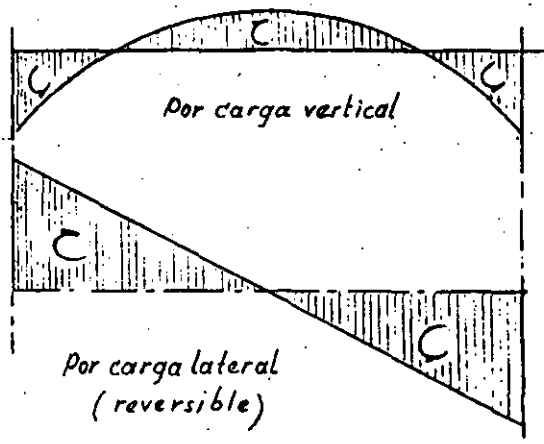
ESTRUCTURA REAL

MODELO MATEMATICO USUAL



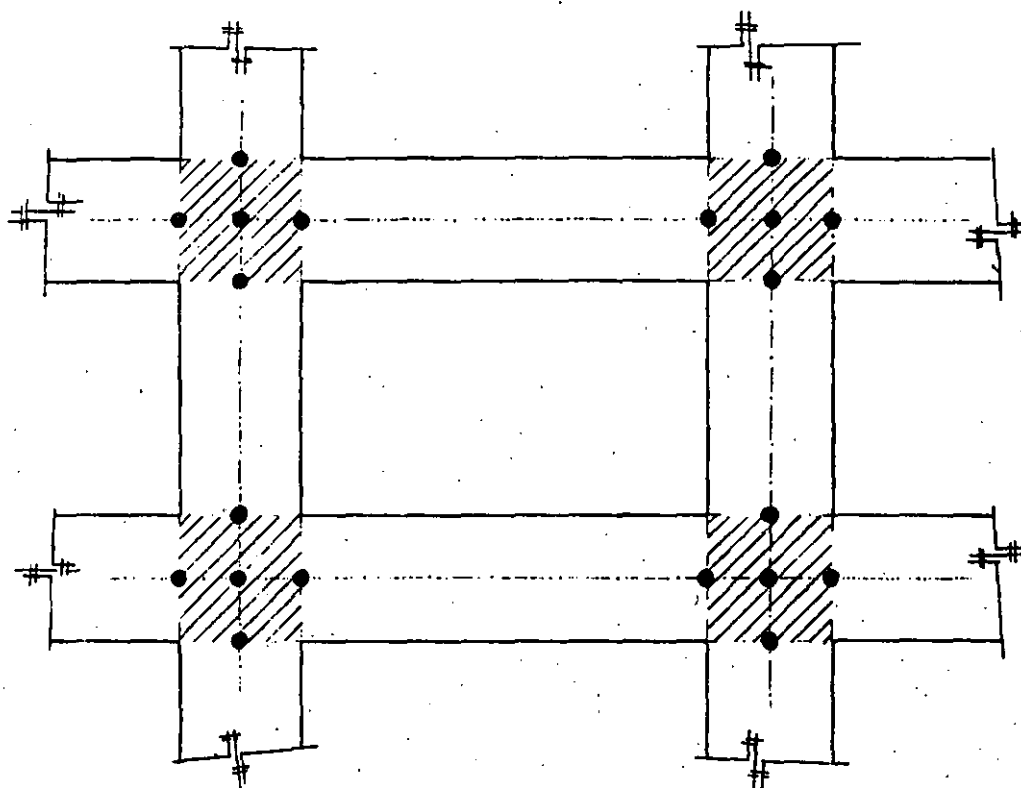


Variación usual de los momentos flexionantes en columnas (carga vertical o lateral)

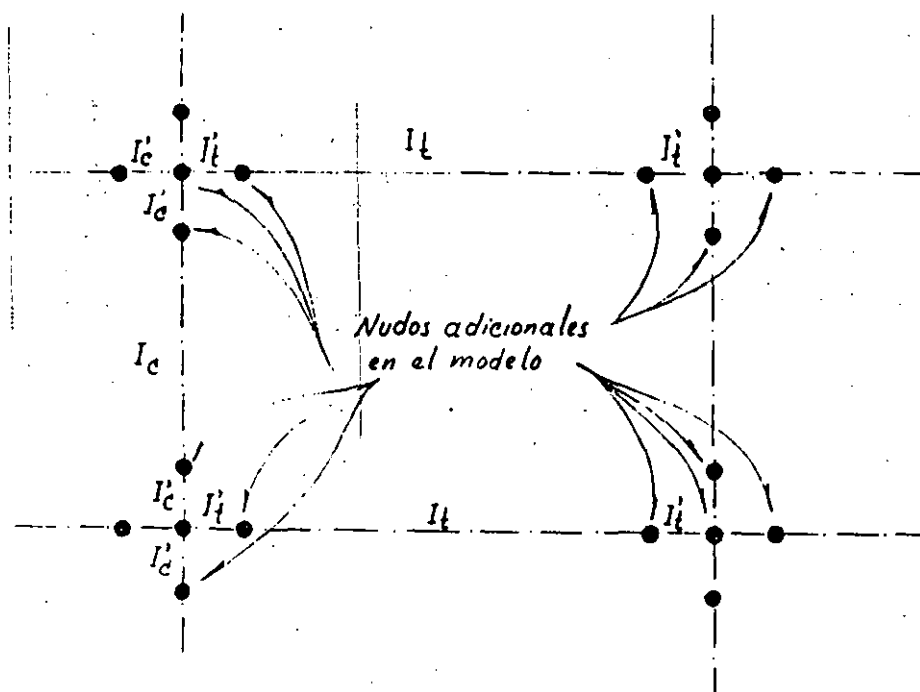


Variación usual de momentos flexionantes en trabes

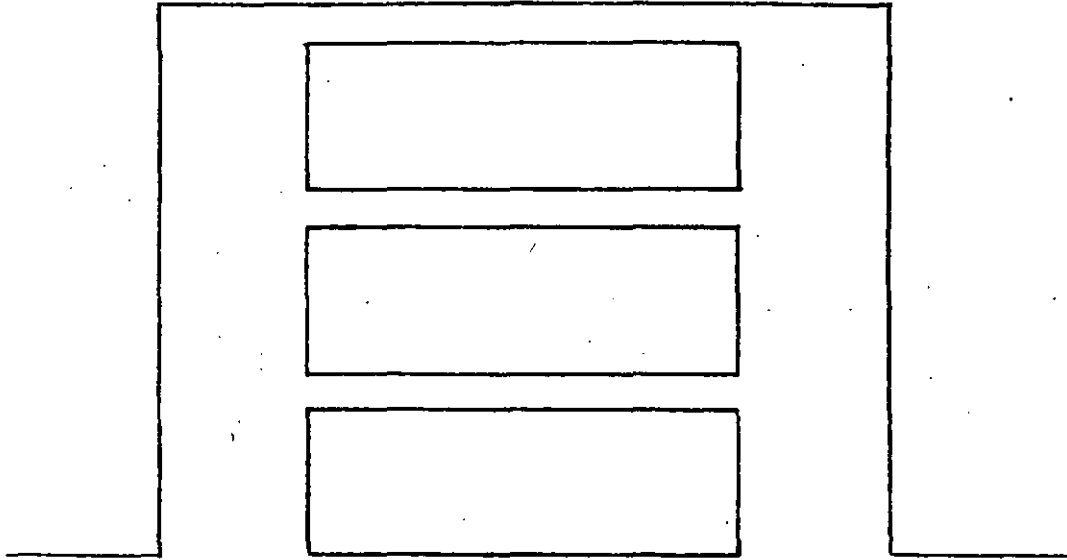
Efecto de la variación de momentos flexionantes a lo largo del claro de una borra estructural



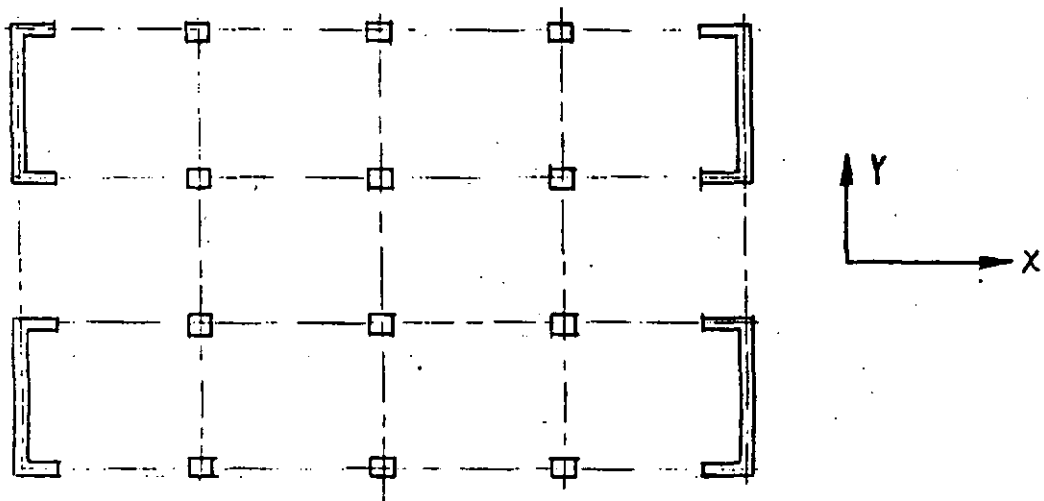
Marco con zonas de intersección
entre traves y columnas importantes



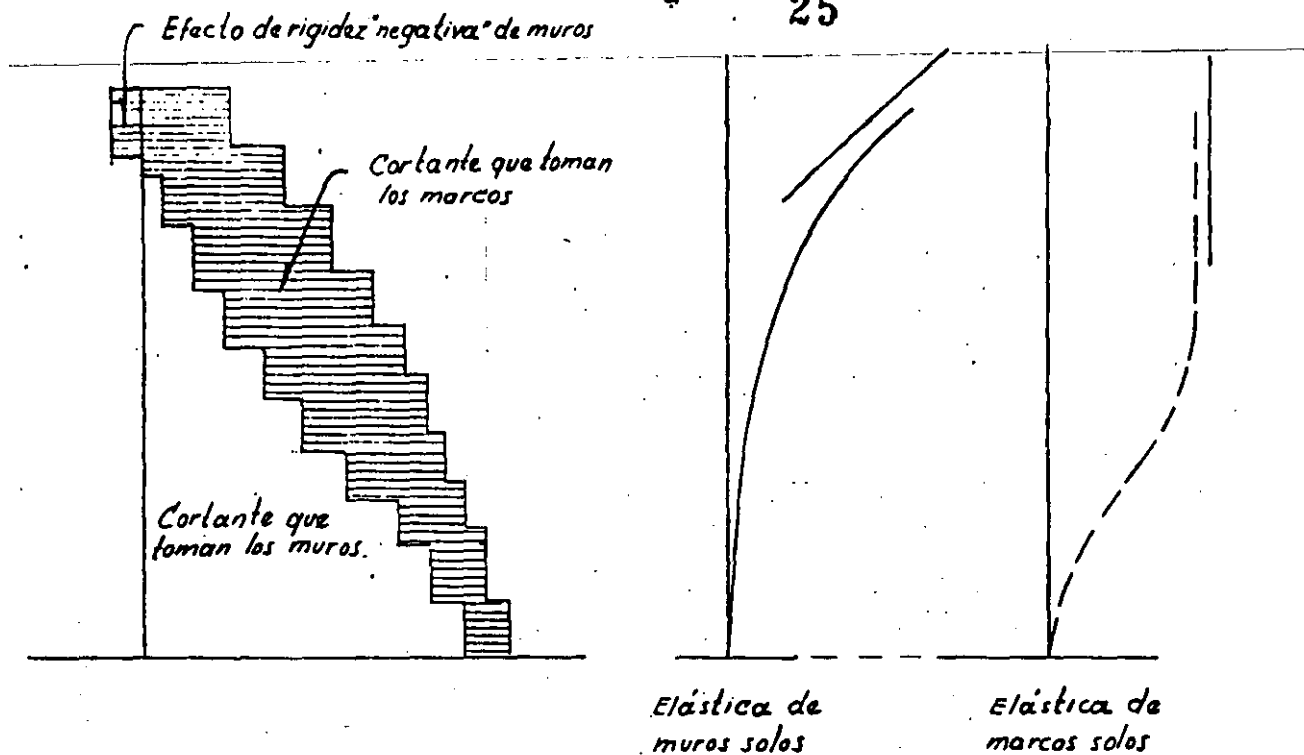
Modelo con nudos adicionales y diferentes
propiedades en las barras



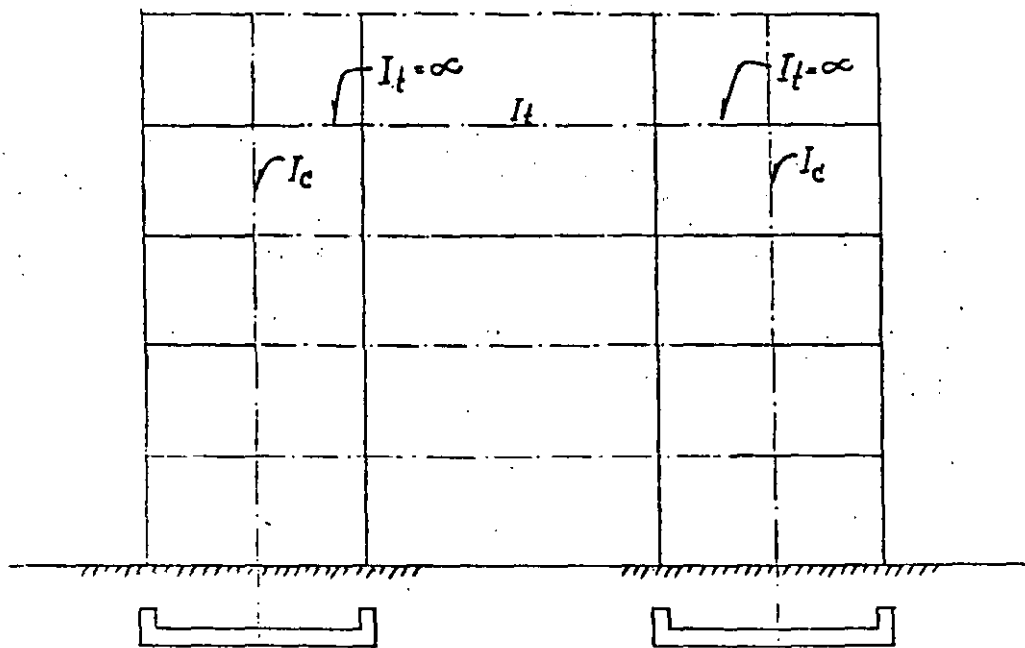
VOLADIZO DISFRAZADO DE MARCO



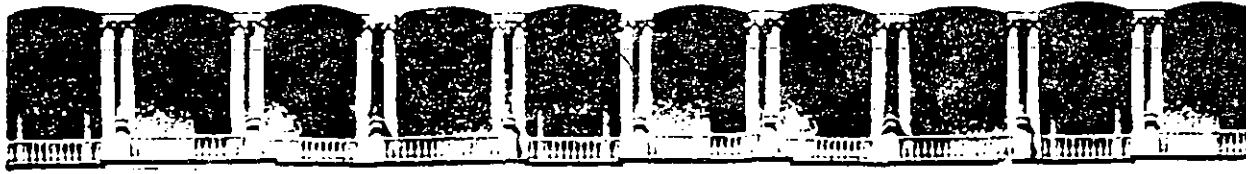
EDIFICIO CON MARCOS Y MUROS DE RIGIDEZ EN DIRECCION Y



Distribución de fuerzas cortantes laterales entre marcos y muros y elásticas sin interacción.



Idealización de muros como columnas anchas



**FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA**

XX CURSO INTERNACIONAL DE INGENIERIA SISMICA

MODULO III: DISEÑO SISMICO DE EDIFICIOS

DISEÑO SISMICO DE ESTRUCTURAS DE ACERO

**ING. OSCAR DE BUEN LOPEZ
DE HEREDIA**

DISEÑO SISMICO DE ESTRUCTURAS DE ACERO PARA EDIFICIOS

OSCAR DE BUEN LOPEZ DE HEREDIA *

INTRODUCCION

El objetivo que se persigue al construir una estructura es satisfacer una necesidad, que puede ser salvar una barranca para unir dos poblaciones que se encuentran a uno y otro lado de ella, detener el agua de un río para formar un embalse que permita utilizarla para generar energía eléctrica, o crear un espacio en el que se desarrollen actividades que no podrían llevarse a cabo a la intemperie. En el primer caso se construye un puente, en el segundo la cortina de una presa y en el tercero un edificio.

En un edificio urbano, para oficinas o departamentos, deben crearse espacios en los que se viva o trabaje en condiciones adecuadas de seguridad y confort.

Uno de los fenómenos más característicos de nuestra época es el gran crecimiento de las ciudades, ocasionado en parte por el aumento general de población y en parte por la emigración continua del campo hacia ellas; a su vez, la necesidad de proporcionar alojamiento y lugar de trabajo a un número cada vez mayor de personas dentro de un área reducida, ha sido la razón principal de que en las últimas décadas se hayan construido muchos edificios, algunos de gran altura, y de que esta tendencia subsista en la actualidad.

Todos los elementos requeridos para crear los espacios mencionados arriba, así como las personas que los ocuparán, y el mobiliario y equipo necesarios para desarrollar sus actividades, pesan, y su peso debe transmitirse hasta el terreno en el que se apoya el edificio; es el peso de pisos, plafones, fachadas, muros divisorios y de linderos, instalaciones, muebles y personas, el que crea la necesidad de contar con una estructura cuya finalidad primaria es transmitir esos pesos, y el suyo propio, hasta la cimentación y el terreno.

Pero, una vez construido, el edificio constituye un obstáculo para el libre flujo de las corrientes de aire, lo que da lugar a que aparezcan presiones y succiones en sus fachadas; además, en buena parte de nuestro planeta, y potencialmente en todo él, la corteza terrestre experimenta de vez en cuando movimientos que se transmiten a los edificios construidos sobre ella: tanto el viento como los sismos ocasionan solicitaciones que deben ser resistidas por la estructura, al mismo tiempo que sigue soportando las cargas verticales.

Dijimos al principio que el objeto de un edificio es crear espacios en los que se viva y se trabaje en condiciones adecuadas de seguridad y confort; para ello, la estructura debe tener resistencia suficiente para soportar la combinación de solicitaciones ocasionada por las cargas verticales y el viento o sismo y, además, ser de rigidez adecuada para que sus deformaciones, bajo esas solicitaciones, no sean

* Profesor emérito de la Facultad de Ingeniería, U.N.A.M. Ingeniero - consultor en estructuras.

excesivas, con lo que se evita el pánico entre los ocupantes y se reducen a un mínimo los daños en los elementos no estructurales y en las instalaciones.

Las cargas verticales, muertas y vivas, se pueden evaluar con precisión aceptable, y se sabe bastante sobre el comportamiento de elementos estructurales y estructuras completas sometidos a cargas de ese tipo. En cambio, es imposible predecir la intensidad de los temblores que deberá resistir un edificio, y hay todavía bastantes lagunas en nuestro conocimiento sobre el comportamiento de las estructuras sometidas a sollicitaciones sísmicas. Nos encontramos, pues, ante un problema que aparentemente no tiene solución, que caracteriza al diseño sísmico: diseñar y construir estructuras que resistan sollicitaciones desconocidas mediante mecanismos que no se entienden todavía demasiado bien; y, para complicar más aún el problema, teniendo en cuenta, como en todas las obras de ingeniería, consideraciones económicas de importancia fundamental.

Muchos edificios construidos hasta ahora han estado sometidos a temblores de tierra intensos; algunos han quedado totalmente destruidos, otros se han mantenido en pie, pero sufriendo daños severos en elementos estructurales y no estructurales, mientras que el resto ha resistido los temblores con daños muy reducidos, o aún nulos.

Los métodos modernos de diseño sísmico provienen en gran parte del estudio del comportamiento, satisfactorio o no, de edificios que han experimentado movimientos telúricos importantes, y la filosofía en que se basan esos métodos proviene de la aceptación del hecho de que es imposible construir edificios que tengan una probabilidad nula de falla o de experimentar daños durante los temblores, desconocidos, a que puedan quedar sometidos durante su vida útil.

La solución ideal, desde un punto de vista económico, consiste en escoger sistemas estructurales que se diseñen para soportar las cargas verticales, y que sean capaces de resistir la combinación de éstas y las sollicitaciones sísmicas sin que el aumento de esfuerzos (o la disminución de factores de carga respecto a la falla) exceda el incremento permitido en los reglamentos para sollicitaciones producidas por cargas permanentes y accidentales combinadas; al mismo tiempo, debe revisarse que los desplazamientos horizontales relativos entre niveles consecutivos no sobrepasen límites aceptables, y comprobarse que se tiene una seguridad adecuada contra la inestabilidad de conjunto de la construcción.

Los edificios de pocos pisos, con muros de carga, suelen satisfacer automáticamente las dos condiciones anteriores de resistencia y rigidez; al aumentar el número de niveles y requerirse una estructura el problema se vuelve más difícil, y para evitar incrementos excesivos en costo y en el tamaño de los elementos estructurales deben utilizarse sistemas estructurales adecuados; si el número de pisos no es muy grande, los marcos rígidos constituyen una buena solución, mientras que para alturas mayores suelen obtenerse buenos resultados combinando los marcos con contraventeos o muros de rigidez, y en edificios muy altos conviene recurrir a sistemas estructurales especiales.

Una estructura puede diseñarse de manera que tenga resistencia y rigidez suficiente para que su respuesta ante la combinación de cargas verticales y sísmicas sea predominantemente elástica, pero al hacerlo se obtienen soluciones mucho más costosas que las empleadas tradicionalmente en edificios construidos en zonas sísmicas que han tenido, en general, un comportamiento aceptable durante temblores reales. Sin embargo, este tipo de soluciones puede ser recomendable en estructuras especiales, en las que se desee mantener los daños a niveles muy bajos, aún bajo temblores de gran intensidad; uno de esos casos lo constituyen las centrales nucleoelectricas.

FILOSOFIA DEL DISEÑO SISMICO.

En la mayoría de las construcciones convencionales los problemas económicos hacen que no se justifique la solución anterior, ya que el aumento de costo requerido para resistir vibraciones laterales de gran intensidad debe analizarse teniendo en cuenta la importancia de la estructura y la probabilidad de ocurrencia de los temblores. Esto hace que la filosofía actual del diseño de edificios que se construirán en zonas sísmicas, de donde provienen los criterios para fijar los niveles de carga indicados en los reglamentos modernos, sea la siguiente: los edificios deben ser capaces de resistir temblores menores sin sufrir daños, temblores moderados sin daños estructurales, pero con algunos daños en elementos no estructurales, y temblores muy intensos sin colapso, pero con daños no estructurales y estructurales. Se acepta, pues, la posibilidad de que el edificio sufra desperfectos importantes, pero no la de que se pierdan vidas. El objetivo de los códigos es, por consiguiente, obtener estructuras que se comporten elásticamente bajo temblores que puede esperarse que ocurran más de una vez durante la vida del edificio y que sean capaces de sobrevivir, sin colapso, el temblor de intensidad máxima que puede presentarse durante su vida útil. Para evitar el colapso durante el temblor más intenso los miembros, y la estructura en conjunto, han de poseer ductilidad suficiente para absorber y disipar energía por medio de deformaciones postelásticas, lo que exige excursiones importantes en el intervalo inelástico, con poca o ninguna pérdida de resistencia. La ductilidad necesaria puede estar asociada, en casos extremos, con deformaciones permanentes muy grandes, de manera que aunque no se presente el colapso de la estructura los daños que sufra pueden ser tales que no puedan repararse económicamente, y la construcción se pierda por completo.

La filosofía mencionada sigue siendo la base de los códigos modernos de diseño sísmico; sin embargo, a raíz de los últimos temblores intensos, sobre todo los de la Ciudad de México de septiembre de 1985, empieza a cuestionarse, si no la filosofía en sí, al menos el nivel de daños que debe permitirse durante movimientos de tierra de gran intensidad, pues los costos de reparación y refuerzo de las construcciones son tan elevados que seguramente se justifica aumentar la inversión inicial para disminuir los riesgos de que se presenten daños importantes en estructura, acabados o instalaciones.

ELECCION DEL SISTEMA ESTRUCTURAL.

Las características principales que debe tener un edificio que se va a construir en una zona sísmica son:

Resistencia. El edificio ha de tener una seguridad adecuada, contra el colapso durante temblores intensos. Para ello, debe diseñarse para que soporte solicitaciones sísmicas relativamente altas, compatibles con la sismicidad de la zona.

Rigidez. Es necesaria para evitar daños en muros, cancelas, instalaciones y otros elementos no estructurales, durante temblores frecuentes de poca intensidad, y para impedir fallas por inestabilidad, debida a amplificación excesiva de los momentos por interacción carga vertical - desplazamiento horizontal, en temblores intensos. La rigidez apropiada se logra manteniendo los desplazamientos laterales de entrepiso por debajo de límites adecuados, que se indican en los reglamentos.

Ductilidad. Esta propiedad no es indispensable, en teoría, puesto que pueden construirse estructuras que, también en teoría, se comporten elásticamente bajo temblores de cualquier intensidad; constituye, sin embargo, una manera económica de obtener estructuras capaces de soportar temblores intensos, si bien sufriendo daños que pueden ser importantes. Además, como no se conocen las características (intensidad, duración, contenido de frecuencias, etc.) del temblor más desfavorable a que quedará sometida la construcción, no puede suprimirse la ductilidad, al menos en zonas críticas de la estructura, sin correr el riesgo de que el comportamiento real esté muy por debajo del previsto.

En las últimas décadas se ha dado una importancia excesiva a la ductilidad; los reglamentos de diseño sísmico han estimulado el uso de estructuras dúctiles, generalmente flexibles, y han penalizado a las rígidas, a pesar de que en los temblores que han ocurrido últimamente en distintas partes del planeta se ha comprobado, de manera sistemática, el superior comportamiento de las estructuras rígidas y resistentes, especialmente si se les proporciona ductilidad adecuada en las zonas donde pueden concentrarse las deformaciones inelásticas.

R. Park y T. Paulay, en su libro "Estructuras de concreto reforzado", afirman lo siguiente:

"Como es imposible predecir con precisión las características de los movimientos de tierra que pueden ocurrir en un sitio dado, también es imposible evaluar el comportamiento completo de una estructura sometida a sismos intensos de características desconocidas*. Sin embargo, las estructuras pueden diseñarse y construirse de manera que tengan características que aseguren que su comportamiento será el más deseable. En términos de daños, ductilidad, disipación de energía, o falla, ha de lograrse una secuencia deseable en el deterioro, y en la destrucción eventual, de la compleja cadena de resistencia de la estructura, lo que implica una jerarquización adecuada de sus modos de falla, que sólo puede lograrse si se conoce la resistencia de cada uno

* La incertidumbre es el aspecto que caracteriza todo el diseño sísmico: debe diseñarse para solicitaciones desconocidas, sin conocer tampoco el mecanismo de respuesta de los elementos y sistemas estructurales - sometidos a ellos. Aunque se sabe bastante más acerca de este segundo punto que del primero, todavía existen lagunas muy importantes en -- nuestro conocimiento.

de los eslabones que forman esa cadena, es decir, de cada uno de los elementos que componen la estructura.

A pesar de la naturaleza probabilística del fenómeno, la mejor manera de obtener una estructura que se comporte con éxito ante temblores de intensidad media, y no llegue al colapso durante terremotos catastróficos consiste, dados los conocimientos actuales, en distribuir determinísticamente sus propiedades de resistencia y ductilidad para obtener el modo de falla más conveniente. Esta filosofía puede incorporarse en un proceso de diseño basado en la resistencia última de la estructura, durante el cual se escogen y detallan adecuadamente los elementos que formarán parte de los mecanismos disipadores de energía, y se proporciona a los elementos estructurales restantes resistencia suficiente para asegurar que los mecanismos escogidos conservarán toda, o casi toda, su resistencia durante los ciclos de carga y deformación producidos por el temblor".

La obra citada se publicó en 1975; sin embargo, los aspectos señalados siguen en vigor, por completo, hoy en día, y se pusieron de manifiesto durante los terremotos de septiembre de 1985. Ha de tenerse en cuenta, además, que las construcciones reales son muy complejas, mucho más que los modelos que se emplean para analizarlas y diseñarlas, por lo que para lograr el comportamiento deseable mencionado deben satisfacerse requisitos adicionales de simetría, uniformidad a lo largo de la altura, trabajo de conjunto, etc.

MÉTODOS PARA EL ANÁLISIS SISMICO.

No se pretende estudiar aquí los métodos que se emplean para evaluar las fuerzas sísmicas para las que debe diseñarse un edificio; sin embargo, conviene recordar los procedimientos más comunes. El más sencillo y, probablemente, el más utilizado, consiste en determinar un conjunto de fuerzas estáticas horizontales aplicadas en los diferentes pisos del edificio, cuya suma es igual a una cierta fracción, especificada en los códigos de diseño, del peso de la construcción; en general, las fuerzas laterales se distribuyen en la altura del edificio siguiendo una ley de variación triangular, con el vértice en la base de la construcción.

Un segundo procedimiento consiste en modelar el edificio como un sistema de masas concentradas en los pisos, conectadas entre sí por resortes cuya rigidez lateral depende de las características de la estructura, y en realizar un análisis dinámico modal del sistema. Las fuerzas cortantes de diseño se encuentran superponiendo adecuadamente unos cuantos modos de vibración y utilizando los espectros para diseño sísmico especificados en los reglamentos. Este enfoque dinámico es más apropiado que el estático, sobre todo para edificios irregulares, pero sigue teniendo muchas imprecisiones, que provienen en buena parte de la suposición de que el comportamiento del edificio es exclusivamente elástico.

Por este motivo, las construcciones importantes se analizan a veces teniendo en cuenta, al modelarlas, el comportamiento inelástico de la estructura, y sometiendo el modelo a temblores de características

adecuadas; la respuesta inelástica de la estructura, a lo largo del tiempo, se obtiene por medio de un proceso de integración paso a paso. Aunque costoso y complejo, éste es el método más preciso de análisis sísmico con que se cuenta en la actualidad, dada su precisión conceptual intrínseca; sin embargo, la intensidad, duración y demás características de los temblores futuros permanecen, como siempre, desconocidas.

Ha de recordarse siempre que las fuerzas laterales de diseño especificadas en los códigos son mucho menores que las que puede esperarse que actúen sobre las construcciones durante un movimiento de tierra importante, por lo que debe reconocerse que los sismos intensos harán que los elementos críticos de las estructuras se comporten inelásticamente; es, pues, esencial que el diseño y la construcción se lleven a cabo de manera que se garantice el comportamiento dúctil de miembros y conexiones sujetos a ciclos severos de inversión de cargas, independientemente de cual haya sido el método utilizado para determinar la distribución hipotética de fuerzas que obran sobre la estructura.

El acero estructural es un material muy dúctil, y tiene propiedades físicas que lo hacen ideal para construir estructuras resistentes a sismos. Sin embargo, su ductilidad intrínseca no se conserva necesariamente en la estructura terminada, sino puede perderse por fenómenos de inestabilidad local, de miembros individuales o de conjunto, porque la falla se presente de manera que no se obtenga la respuesta buscada (por ejemplo, por cortante), o porque el comportamiento de las conexiones sea defectuoso. Por todo ello, debe procederse con mucho cuidado durante el diseño y la construcción para evitar la pérdida de esas propiedades.

La ductilidad de los elementos de acero estructural varía con el tipo de sollicitación; es máxima en miembros en tensión, en los que se alcanza la ductilidad del material, y mínima en elementos en compresión axial. Para obtener ductilidades adecuadas en compresión directa, flexocompresión y cortante, es necesario tomar precauciones para evitar fenómenos prematuros de pandeo local y/o lateral.

SISTEMAS PARA PROPORCIONAR RIGIDEZ Y RESISTENCIA LATERALES.

A pesar de que la razón de ser de la estructura de un edificio proviene de la necesidad de soportar cargas verticales, la elección del sistema estructural queda determinada, casi siempre, por la manera en que han de resistirse las fuerzas horizontales; más todavía, aunque no hubiese más que cargas verticales, también se tendría que pensar en cómo obtener rigidez lateral adecuada, puesto que siempre es teóricamente posible que un edificio completo o alguno de sus entresijos falle por inestabilidad lateral. Las sollicitaciones horizontales son, pues, las que determinan las características principales de los sistemas estructurales de los edificios excepto, quizá, en los que no tienen más de dos o tres niveles.

Las estructuras deben ser estables bajo cualquier condición posible de carga. Cuando lo son, las sollicitaciones exteriores ocasionan en ellas deformaciones pequeñas, y las fuerzas interiores les devuelven su forma original cuando desaparecen las cargas. En cambio,

si una estructura es inestable las cargas producen deformaciones muy grandes, que crecen aunque las solicitaciones se mantengan constantes; además, las acciones interiores estabilizadoras no logran que la estructura recupere su configuración inicial cuando se descarga. El conjunto de vigas y columnas de la fig. 1a. es claramente inestable, pues no resiste fuerzas horizontales ni tiene ningún mecanismo que haga que recupere su forma inicial.

En la fig. 1.d se ilustran los pocos mecanismos que pueden utilizarse para obtener sistemas estructurales estables, capaces de resistir los efectos producidos por fuerzas horizontales. El primero consiste en añadir una diagonal, con lo que se obtiene una estructura contraventeada. En el segundo la estabilidad lateral se logra por medio de muros de cortante*, de mampostería de tabique o de concreto reforzado, que son elementos planos verticales de gran rigidez y resistencia. Por último, los miembros que forman la estructura pueden unirse entre sí por medio de conexiones rígidas, que impiden las grandes rotaciones asociadas con el colapso: la estabilidad lateral se consigue con el uso de marcos rígidos.

Para asegurar la estabilidad, en todas las direcciones, de un edificio, puede utilizarse uno solo de los sistemas mencionados, o una combinación de varios de ellos.

MARCOS RIGIDOS.

Los marcos rígidos tridimensionales, formados por un conjunto de vigas y columnas, constituyen un sistema estructural eficiente para edificios de altura pequeña o media, hasta unos 10 ó 12 pisos. En edificios destinados a habitación no suele justificarse su empleo como únicos elementos resistentes, pues por requisitos de funcionamiento se cuenta con gran número de muros, que separan unas habitaciones de otras, colocados en las mismas posiciones en todos los niveles, que pueden utilizarse con ventaja, solos o en combinación con los marcos. En cambio, los edificios de oficinas carecen casi por completo de divisiones de carácter permanente, por lo que en ellos sí puede convenir utilizar los marcos rígidos como único sistema estructural, pues proporcionan la máxima libertad en la planeación y operación de los edificios.

Los marcos rígidos constituyen una solución adecuada en edificios de poca o mediana altura que se van a construir en zonas sísmicas porque, además de proporcionar la resistencia necesaria ante cargas verticales y horizontales de una manera económica, permiten obtener estructuras de ductilidad elevada, capaces de incursionar en el intervalo inelástico bajo solicitaciones sísmicas intensas, disipando una parte importante de la energía que les transmite el terreno sin sufrir daños, o experimentando desperfectos locales, de pequeña cuantía y fácil reparación.

Los marcos rígidos bien diseñados, detallados y contruidos, tienen un comportamiento dúctil estable bajo cargas cíclicas que los hacen trabajar fuera del intervalo elástico, y la mayor parte de los có-

* También llamados "muros de rigidez".

digos de construcción los consideran sistemas estructurales preferenciales, para los que especifican cargas laterales menores que las correspondientes a otros sistemas.

Es una práctica aceptada generalmente la de que el dimensionamiento de los miembros que componen los marcos rígidos se haga de manera que las articulaciones plásticas se formen en las vigas antes que en las columnas, con lo que se logra que las deformaciones plásticas más importantes se concentren en zonas que pueden aceptarlas con poca, o ninguna, pérdida de resistencia. Esta es la filosofía de diseño conocida como "columnas resistentes - vigas débiles".

Sin embargo, la ductilidad se convierte en la principal desventaja de los marcos rígidos cuando se pretende utilizarlos en edificios altos carentes de elementos estructurales adicionales que contribuyan a la resistencia y rigidez lateral del conjunto, pues se hace necesario aumentar las dimensiones de vigas y columnas, muy por encima de las requeridas para soportar las cargas verticales, primero para obtener la resistencia necesaria ante cargas horizontales y después, cuando crece el número de pisos, para controlar los desplazamientos laterales y mantenerlos dentro de límites adecuados.

Los marcos rígidos constituyen el esqueleto resistente de un gran número de construcciones modernas de muy diversos tipos (Fig. 2). Su nombre proviene de que los elementos principales que los componen, vigas y columnas, están ligados entre sí por medio de conexiones rígidas, capaces de transmitir los momentos, fuerzas normales y cortantes, sin que haya desplazamientos lineales o angulares relativos entre los extremos de las barras que concurren en cada nudo, lo que hace que la estructura resultante pueda resistir por sí sola, sin la ayuda de elementos adicionales de otros tipos, cargas verticales y horizontales. El dimensionamiento de las conexiones entre vigas y columnas constituye uno de los aspectos más importantes del diseño de los marcos rígidos.

En edificios de varios pisos se emplean marcos dispuestos en dos direcciones frecuentemente ortogonales, de manera que constituyen una estructura tridimensional. Sin embargo, la práctica seguida para su análisis y diseño ha consistido tradicionalmente en separarlos en dos familias y en analizar cada marco como una estructura plana, soportada lateralmente por los normales a él, despreciando los momentos torsionantes en las vigas pero teniendo en cuenta que las columnas están sometidas a flexión biaxial, puesto que cada una forma parte al mismo tiempo de los dos marcos que se cruzan en ella. (Fig. 2.d).

Aunque el empleo creciente de las computadoras electrónicas hace suponer que en un futuro cercano será económico y conveniente analizar las estructuras que se acaban de mencionar como lo que realmente son, de tres dimensiones, en la actualidad se siguen analizando, en la mayor parte de los casos, como estructuras planas, y se diseñan teniendo en cuenta la flexión biaxial en las columnas y la continuidad que debe proporcionarse en las dos direcciones. La descomposición de los marcos tridimensionales reales en dos familias de marcos planos es posible por la pequeña rigidez torsional de las vigas.

En edificios altos, en los que las solicitaciones producidas por viento o sismo se vuelven predominantes en el diseño, el marco rígido convencional deja de ser una solución adecuada, pues para darle la resistencia y rigidez necesarias se requieren vigas y columnas de dimensiones y costo excesivos. En esos casos conviene utilizar elementos estructurales adicionales, muros de rigidez o contraventeos, que resistan las fuerzas horizontales más eficiente y económicamente.

El uso de los elementos mencionados hace que el marco rígido deje de ser indispensable pues la estructura de soporte de un edificio puede construirse con vigas y columnas articuladas entre sí, proporcionando la rigidez y resistencia laterales necesarias para evitar problemas de inestabilidad y para soportar los efectos producidos por fuerzas horizontales por medio, por ejemplo, de armaduras verticales formadas por columnas, vigas y contraventeos en diagonal colocados entre ellas, como se ve en la fig. 3a. (En estructuras reales no es posible utilizar articulaciones en los nudos, pero sí se pueden conectar las vigas con las columnas, que pasan a través de los nudos, por medio de apoyos flexibles). Sin embargo, suele ser conveniente utilizar marcos rígidos aún cuando se empleen elementos resistentes adicionales, de manera que las cargas verticales permanentes sean soportadas principalmente por ellos, de una manera eficiente y económica, y ayuden a los muros de rigidez o crujiás contraventeadas a resistir las solicitaciones horizontales eventuales (Fig. 3.b).

En un mismo edificio se puede emplear una combinación de marcos rígidos, contraventeos, muros de rigidez y vigas articuladas en las columnas, cambiando incluso la forma de trabajo en las dos direcciones principales, ya que, de acuerdo con sus características arquitectónicas y funcionales, una combinación de dos o más de los sistemas estructurales mencionados puede proporcionar la solución más eficiente y económica.

Elementos que componen un marco rígido. Un marco rígido está formado siempre por vigas, columnas y conexiones entre ellas; además puede haber también elementos de contraventeo o muros de rigidez (Fig. 4).

Las vigas son los elementos, generalmente horizontales o con pequeña inclinación, que soportan directamente las cargas verticales permanentes, muertas y vivas, que obran sobre la estructura; además, hacen que las columnas de marcos carentes de contraventeo puedan adoptar la configuración necesaria para resistir fuerzas horizontales, y contribuyen a la rigidez de conjunto de la estructura; en marcos contraventeados forman parte del sistema que soporta las fuerzas horizontales. Están sometidas a la acción de fuerzas transversales y de momentos aplicados en sus extremos, que aparecen por la continuidad con el resto de la estructura, que ocasionan en ellas momentos flexionantes y fuerzas cortantes importantes; las fuerzas normales suelen ser despreciables, excepto en las vigas de las crujiás contraventeadas de marcos altos. Se tratan básicamente como miembros en flexión, aunque deben tenerse en cuenta los efectos de las fuerzas cortantes y normales cuando son significativos.

Las columnas, cuyos ejes son verticales en general, deben ser capaces de soportar las cargas que les transmiten las vigas adyacentes

y los trabos de columnas que se encuentran sobre ellas, llevándolas eventualmente a la cimentación, así como los momentos producidos por las cargas verticales que reciben de las vigas. Además, deben ayudar a soportar las fuerzas horizontales en marcos contraventeados, y resistirlas en su totalidad en los que no tienen contraventeo ni muros de rigidez; también contribuyen a darle al marco la rigidez necesaria para evitar problemas de pandeo de conjunto. Trabajan casi siempre en flexocompresión (la compresión axial es una condición poco frecuente), y los efectos que las fuerzas cortantes ocasionan en ellas suelen ser despreciables. En general están sometidas a flexocompresión biaxial, pues forman parte al mismo tiempo de dos marcos, frecuentemente ortogonales.

El objeto de las conexiones es transmitir los elementos mecánicos, momentos flexionantes y fuerzas cortantes y normales, de las vigas a las columnas y viceversa, así como las fuerzas que aparecen en las diagonales de contraventeo al marco propiamente dicho, para que todos los elementos de la estructura trabajen en conjunto.

Las conexiones se han tratado tradicionalmente como simples puntos de intersección de varias barras; sin embargo, en los últimos años se ha reconocido el importante papel que desempeñan en el comportamiento de los marcos rígidos por lo que en la actualidad su diseño no se limita, como antes, al de los elementos de unión entre vigas y columnas, sino se incluye en él la revisión de la junta propiamente dicha, es decir, de la zona común a todas las barras.

Los contraventeos y marcos de rigidez son elementos situados en planos verticales que no forman parte del marco propiamente dicho, pero que contribuyen a resistir las fuerzas horizontales que obran sobre él, a contrarrestar los momentos secundarios creados por el desplazamiento lineal relativo de los extremos de las columnas (efecto $P\Delta$), a evitar el pandeo de conjunto del edificio y a mejorar su rigidez lateral. En los marcos de varios pisos se utilizan muros de rigidez, de tabique o de concreto reforzado, y contraventeos compuestos por elementos de acero estructural colocados en diagonal, en K, o con alguna otra configuración adecuada.

Comportamiento de marcos rígidos. En la discusión que sigue se considera tan sólo comportamiento en el plano, pues los marcos rígidos en estudio forman parte de estructuras tridimensionales en las que hay otros marcos que impiden que se salgan del plano que ocupan originalmente, en el que suelen estar alojadas todas las cargas.

Formas de falla. La falla de un marco rígido puede ser parcial o de conjunto.

Se presenta una falla del primer tipo cuando se agota la resistencia de alguno o algunos de los elementos que lo forman, viga, columna o conexión. La falla de una viga puede ser por inestabilidad (pandeo lateral por flexotorsión o pandeo local) o por formación de un mecanismo con articulaciones plásticas*, y una columna puede fallar también por inestabilidad o porque se agote su resistencia al formarse

* Aunque menos frecuentes, son también posibles las fallas por cortante, y las deformaciones excesivas constituyen en muchas ocasiones el límite de utilidad estructural.

una o más articulaciones plásticas; una conexión falla cuando aparece una discontinuidad lineal o angular, producida por fracturas o deformaciones locales excesivas, que hace que el comportamiento de los elementos que llegan a ella sea diferente del supuesto en el análisis.

Aunque una falla parcial, sobre todo de una columna, pueda tener consecuencias graves, no suele ocasionar el colapso total de la estructura, pues el alto grado de hiperestaticidad de los marcos rígidos, sobre todo los de tres dimensiones, hace que haya diferentes trayectorias posibles de transmisión de cargas, y cuando un miembro no trabaja se produce una redistribución que lleva las cargas que le correspondían a los elementos cercanos.

El diseño de marcos rígidos siguiendo métodos convencionales se basa principalmente en evitar fallas parciales, ya que después de hacer el análisis y determinar los elementos mecánicos en cada uno de los miembros, éstos se dimensionan para evitar las formas de falla mencionadas arriba, presta poca atención al trabajo de conjunto de la estructura.

Además de las parciales, pueden presentarse fallas de conjunto, por pandeo o por inestabilidad.

Los marcos simétricos en geometría y carga en los que ésta no produce flexión primaria pueden fallar por pandeo, caracterizado por una bifurcación del equilibrio que se presenta cuando las solicitaciones alcanzan el valor crítico; cuando no hay elementos exteriores que lo impidan el cabezal se desplaza lateralmente, pero si se evita este movimiento cambia la forma de pandeo y la carga crítica aumenta considerablemente; éste es uno de los papeles principales del contraventeo (Fig. 5.a). Si, en cambio, las cargas ocasionan flexión desde un principio, el colapso puede ser por inestabilidad, que se presenta eventualmente al ir aumentando la magnitud de las solicitaciones (Fig. 5.b).

Las curvas de la Fig. 5 representan las formas de falla mencionadas; las cuatro corresponden a un mismo marco, pero I y II (Fig. 5.a) describen fallas por pandeo, caracterizadas por un punto de bifurcación del equilibrio, mientras que en III y IV (Fig. 5.b) el colapso es por inestabilidad, sin que haya pandeo.

III y IV son ligeramente curvas desde el principio, a causa de la interacción momento-fuerza axial debida a cambios de geometría en el marco; su pendiente se reduce más rápidamente cuando comienza la plastificación del material, y se anula cuando la carga alcanza el valor máximo; la rama descendente corresponde a estados de equilibrio inestable.

Diseño. El diseño de un marco rígido consiste en la determinación de los perfiles necesarios en vigas y columnas, en el proporcionamiento de las conexiones entre ellas, y en la revisión posterior del conjunto para asegurarse de que tiene un coeficiente de seguridad adecuado contra el colapso por pandeo o inestabilidad y de que su comportamiento bajo cargas de trabajo es satisfactorio. Si el marco

tiene rigidez lateral elevada, propia o proporcionada por contraventeos o muros de cortante, el diseño obtenido al considerar los miembros aislados suele ser correcto, pues la única falla de conjunto posible es por pandeo sin desplazamientos laterales (se está considerando que éstos son tan pequeños que la interacción carga vertical-desplazamiento no afecta significativamente la resistencia de la estructura); en cambio, si es poco rígido puede fallar por pandeo bajo cargas predominantemente verticales, o por inestabilidad bajo cargas verticales y horizontales.

La revisión de los perfiles preliminares obtenidos para un marco que falla por inestabilidad cuando actúan sobre él cargas verticales y horizontales combinadas puede hacerse trazando su curva carga-desplazamiento.

Curvas carga-desplazamiento. El comportamiento de conjunto de los marcos rígidos que fallan por inestabilidad bajo la acción combinada de cargas verticales y horizontales queda representado, lo mismo que el de los miembros estructurales aislados, por sus curvas carga-desplazamiento, es decir, por la relación entre la intensidad creciente de las sollicitaciones exteriores y algún desplazamiento resultante significativo.

Las características de la curva dependen de la geometría y propiedades mecánicas del marco y de las cargas, incluyendo la manera en que se aplican.

Para que la relación carga-desplazamiento sea única y a cada problema le corresponda un solo resultado final se requiere que las fuerzas exteriores se apliquen lentamente, de manera que su efecto pueda considerarse estático, y que sus intensidades guarden una relación constante durante todo el proceso; es decir, la estructura debe estar sujeta a un sistema de cargas que crece monotónicamente y en forma continua hasta que se alcanza la resistencia máxima. Debe suponerse, además, que inicialmente es elástica y está libre de esfuerzos, y que no hay inversión en el signo de éstos, en ningún caso, en el intervalo plástico.

Estas condiciones no se cumplen en las estructuras reales, pero permiten simplificaciones importantes en los métodos de análisis y llevan a la obtención de cargas de colapso que son, aparentemente, conservadoras*.

Una curva como la IV de la Fig. 5.b, trazada tomando como base los perfiles obtenidos en el diseño preliminar, contiene buena parte de la información necesaria sobre el comportamiento de un marco que falla por inestabilidad lateral, pues además de proporcionar su resistencia máxima permite determinar el desplazamiento correspondiente a cualquier intensidad de las sollicitaciones y da una medida de su capacidad de absorción de energía. Conocida la curva carga-desplazamiento se puede

* En estructuras reales hay ocasiones en las que no se considera que todas las cargas crecen proporcionalmente; en el análisis sísmico de edificios se supone, de acuerdo con la realidad, que las fuerzas horizontales se empiezan a aplicar cuando ya actúan las cargas verticales completas.

determinar el factor de seguridad de un marco con respecto al colapso y la magnitud de los desplazamientos que experimenta bajo cargas de trabajo; si el primero o los segundos no son aceptables deben cambiarse sus características, ajustándolas hasta que la curva indique que el comportamiento es el deseado.

Aunque teóricamente conviene conocer la curva $P\Delta$ de toda estructura que falle por inestabilidad de conjunto bajo cargas verticales y horizontales combinadas, su obtención es en general complicada, o aún imposible, por lo que en la mayor parte de los problemas reales de diseño se recurre a métodos aproximados para determinar la carga de colapso y las deformaciones producidas por las sollicitaciones de trabajo.

Marcos contraventeados. Los marcos provistos de diagonales de contraventeo constituyen una forma eficiente de resistir fuerzas laterales. Son mucho más rígidos y resistentes que los marcos no contraventeados, pero ocasionan, con frecuencia, restricciones en la operación de los edificios, por lo que suelen usarse los dos sistemas combinados.

En la Fig. 6 se muestran algunos posibles arreglos de las diagonales. En todos ellos se busca que los ejes de los miembros, vigas, columnas y contraventeos, se crucen en un punto, por lo que estos sistemas se conocen como marcos provistos de contraventeos concéntricos.

La gran rigidez y resistencia de los marcos contraventeados hacen que se minimicen los daños, tanto no estructurales como estructurales, producidos por los temblores; sin embargo, hay algunos problemas relativos al comportamiento de las diagonales bajo carga cíclica. Sobre todo, se han observado comportamientos bastante pobres cuando se emplean únicamente miembros en tensión para formar al contraventeo. Por ejemplo, cuando se usan contraventeos en X, una fuerza sísmica intensa en una dirección ocasiona un alargamiento de una de las diagonales mientras que la otra, incapaz de trabajar en compresión, simplemente se cuelga, sin aceptar fuerza alguna. Cuando, en el siguiente ciclo de carga, vuelve a aplicarse la fuerza lateral en la misma dirección, la diagonal que se alargó en el primer ciclo no ofrece ninguna resistencia hasta que se restira, y entonces vuelve a alargarse. Esto dá lugar a ciclos histeréticos aplastados, como los que se muestran en la Fig. 7, en los que se observan grandes desplazamientos laterales producidos por incrementos muy pequeños de las cargas, lo que hace que el sistema absorba y disipe una cantidad reducida de la energía que recibe durante los temblores. Para evitar este comportamiento inadecuado, los contravientos deben arreglarse y diseñarse de tal manera que cada diagonal que trabaje en tensión esté acompañada siempre por otra que resista las fuerzas sísmicas trabajando en compresión.

Aún en este caso los elementos de contraventeo han de diseñarse con cuidado, pues en estudios de laboratorio se ha comprobado que la resistencia en compresión de los miembros sometidos a cargas axiales cíclicas, que producen tensiones y compresiones alternadas, disminuye drásticamente después del primer ciclo de carga. Por este motivo, en

las recomendaciones tentativas publicadas en octubre de 1985 por el Comité de Sismología de la Asociación de Ingenieros Estructurales de California se indica que los elementos de contraventeo deben tener una esbeltez L/r no mayor que $6040/\sqrt{F_y}$ (120, para acero A36), y que su resistencia en compresión axial debe reducirse multiplicando la correspondiente a carga estática por un factor de carga cíclica, menor que la unidad, que vale $1/(1+(KL/r)/2Cc)$, o $1/(1+(KL/r)/252.2)$ para acero A36. (Para este acero, el factor disminuye de 0.93, cuando $KL/r = 20$, a 0.68 para $KL/r = 120$). Además, se indica que todos los elementos que forman parte del contraventeo han de diseñarse tomando como base esa resistencia reducida, independientemente de que trabajen en tensión o en compresión.

Marcos con contraventeos excéntricos. En la Fig. 8 se muestran cuatro marcos provistos de otros tantos tipos de contraventeos excéntricos. Las fuerzas axiales que aparecen en las diagonales, como un resultado de las acciones sísmicas, se transmiten a las columnas o a otras diagonales a través de un tramo corto de viga, llamado "eslabón activo", que trabaja en flexión y cortante. Escogiendo adecuadamente su geometría puede lograrse que un marco contraventeado excéntricamente tenga una rigidez elástica muy cercana a la de marcos similares provistos de contraventeos concéntricos y que, por otro lado, los eslabones activos se deformen inelásticamente durante temblores severos, absorbiendo y disipando energía de una manera análoga a la de los marcos rígidos no contraventeados. Se obtiene así un sistema estructural que posee características favorables de los dos sistemas, y que puede satisfacer, en forma eficiente, los dos requisitos de rigidez y ductilidad característicos del diseño sísmico.

La capacidad de los eslabones activos de disipar grandes cantidades de energía durante sobrecargas extremas es de importancia crítica para la ductilidad de conjunto del sistema estructural; se ha encontrado, por medio de estudios de laboratorio, que los eslabones que fluyen principalmente en cortante son más eficientes que los que fluyen en flexión.

La elección de las excentricidades constituye uno de los pasos más importantes en el diseño de marcos contraventeados excéntricamente, pues de sus valores depende tanto la rigidez elástica del marco como la demanda de ductilidad en los eslabones activos.

En resumen, los marcos contraventeados excéntricamente son estructuras dúctiles en las que las deformaciones inelásticas se confinan a regiones en las que no afectan de manera adversa la resistencia y estabilidad de conjunto de la estructura.

Los contraventeos, las columnas y las vigas, estas últimas en las zonas que no forman parte de los eslabones activos, se diseñan para que permanezcan en el intervalo elástico, y no se pandeen; prácticamente toda la actividad inelástica se concentra, pues, en zonas escogidas, diseñadas y detalladas especialmente. El resto de la estructura se dimensiona para que resista, trabajando elásticamente, las sollicitaciones que aparecen en ella mientras los eslabones activos fluyen plásticamente, las que se determinan estudiando el mecanismo de

colapso del marco; posteriormente se revisa su comportamiento bajo cargas de trabajo, utilizando métodos elásticos.

MUROS DE CORTANTE Y MUROS COMBINADOS CON MARCOS RIGIDOS.

El empleo sistemático de los muros de cortante se inició poco después de la terminación de la segunda guerra mundial; en esa época se empezó a construir gran número de edificios altos por lo que se buscó un sistema estructural capaz de resistir las fuerzas horizontales de una manera más económica que el marco rígido, que al mismo tiempo limitase adecuadamente los desplazamientos laterales de entrepiso.

Los muros de cortante se utilizaron por primera vez como elementos para proporcionar rigidez y resistencia ante fuerzas laterales en conjuntos habitacionales construidos en la ciudad de Nueva York en los últimos años de la década de los cuarenta, y tuvieron un impacto importante en los edificios altos. Los muros, que trabajan simultáneamente como elementos para resistir cargas verticales, como muros divisorios y como eficientes contraventeos, se han convertido en un elemento estructural básico en edificios de altura media, al grado de que en la actualidad es rara la construcción de más de 12 a 15 pisos que no los utiliza como elementos principales para resistir las fuerzas horizontales.

Los muros de cortante no pueden usarse con libertad cuando las barreras que forman crean problemas de funcionamiento; cuando esto sucede, como es común en edificios de oficinas, se pueden emplear sistemas estructurales constituidos por marcos rígidos o por una combinación de éstos y muros de cortante o contraventeos en diagonal.

En edificios de oficinas de pocos pisos o de altura media se suelen utilizar marcos rígidos combinados con muros de cortante o contraventeos en diagonal que se colocan en los linderos o alrededor de los núcleos de servicios, donde no ocasionan problemas de operación.

Cuando se utilizan muros de cortante y marcos rígidos en un mismo edificio, los sistemas de piso han de diseñarse de manera que actúen como diafragmas horizontales, capaces de repartir las fuerzas laterales entre los elementos verticales resistentes, en proporción a sus rigideces. Los pisos de concreto reforzado suelen ser capaces de desarrollar ese papel sin dificultad.

La estructura de la gran mayoría de los edificios altos actuales está formada por una combinación de marcos rígidos y muros de cortante o contraventeos, en la que los muros de los núcleos de elevadores, escaleras y servicios, o los contraventeos colocados en esas zonas, trabajan como elementos rigidizantes, complementados con frecuencia con muros o contraventeos aislados adicionales, colocados de manera que no interfieran con las zonas en que se necesitan áreas libres grandes.

La capacidad de absorción de energía de un sistema con muros de cortante es menor que la de una estructura compuesta sólo por marcos rígidos, lo que hace que las fuerzas sísmicas de diseño sean mayores en

el primer caso que en el segundo. Sin embargo, esa desventaja se ve compensada favorablemente por la mayor rigidez del sistema y porque los muros combinados con marcos resisten las solicitaciones horizontales en forma más económica que los marcos solos. Quizá no sea exagerado afirmar que en edificios con alturas comprendidas entre 10 ó 12 y 15 ó 20 pisos sólo pueden obtenerse soluciones económicas empleando muros de cortante o contraventeos en combinación con marcos rígidos.

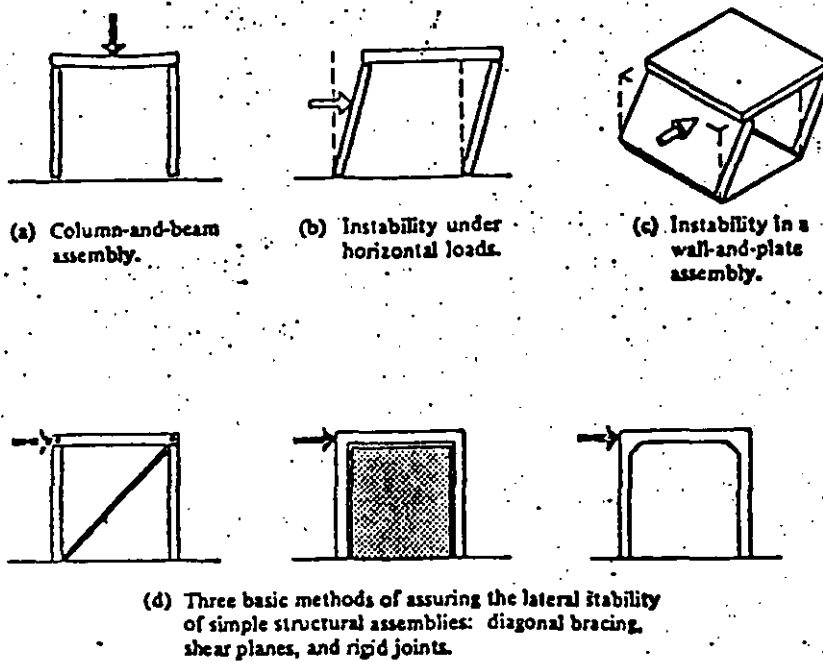


FIG. 1

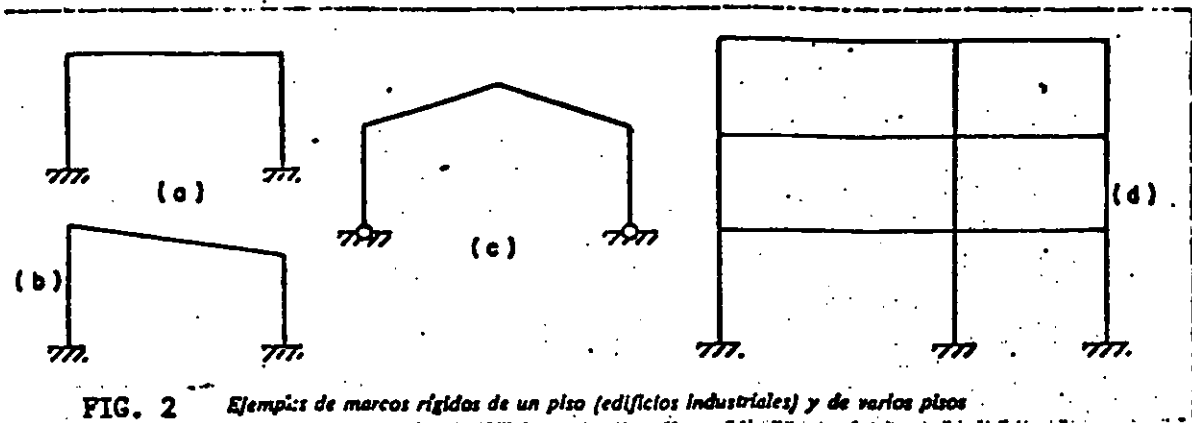


FIG. 2 Ejemplos de marcos rígidos de un piso (edificios industriales) y de varios pisos

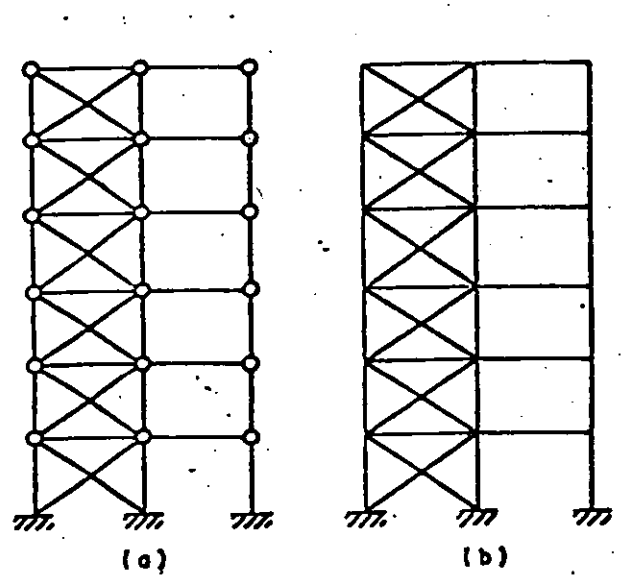
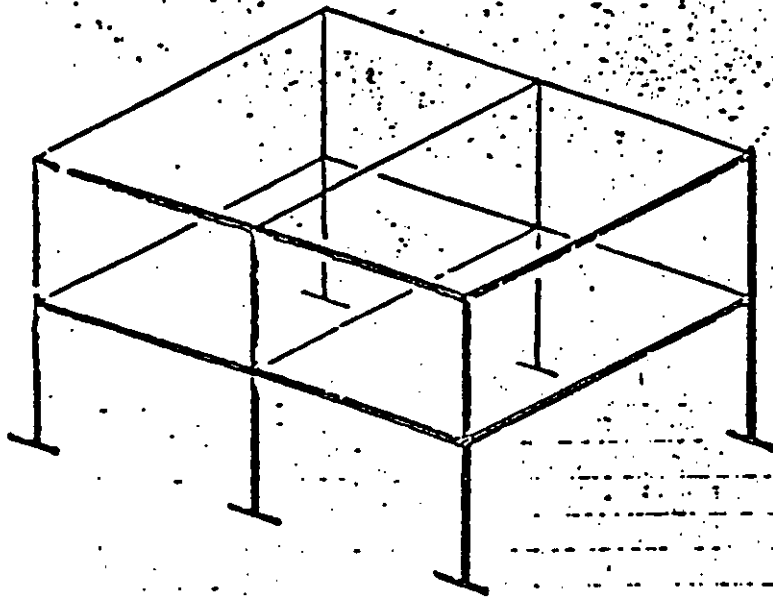


FIG. 3 Marcos contraentados

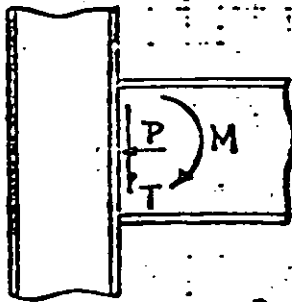
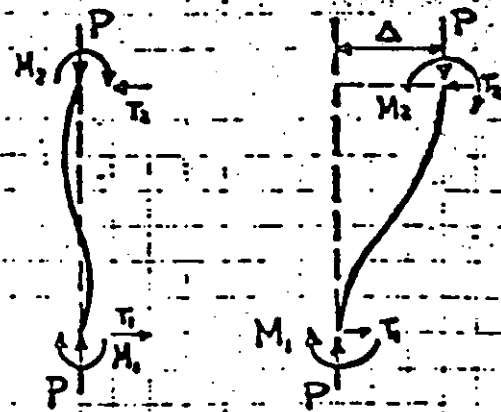
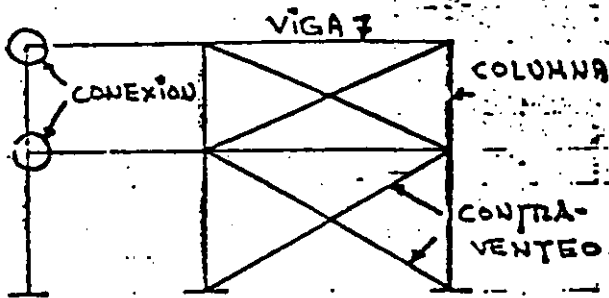
NÚMERO DE ESTRUCTURAS



MARCOS PLANOS

MARCO ESPACIAL (TRIDIMENSIONAL)

ELEMENTOS QUE COMPONEN UN MARCO RÍGIDO, PAPEL QUE DESEMPEÑAN Y SOLICITACIONES A LAS QUE ESTÁN SOMETIDOS



$$\theta_A = \theta_B = \theta_C = \theta_{\text{UNDO}}$$

CONEXIONES

COLUMNAS

FIG. 4

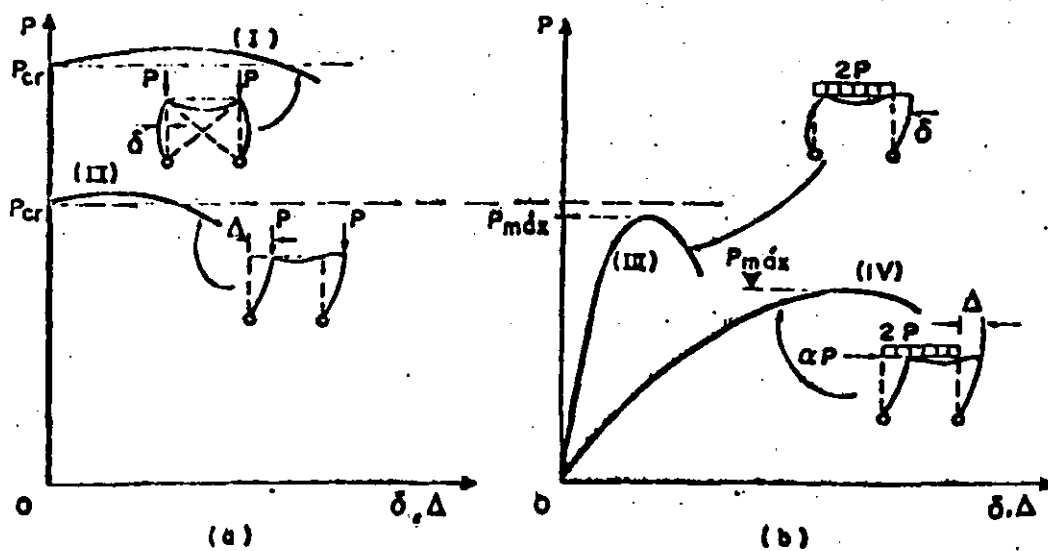


FIG. 5 Curvas carga-desplazamiento de marcos que fallan por pandeo y por inestabilidad

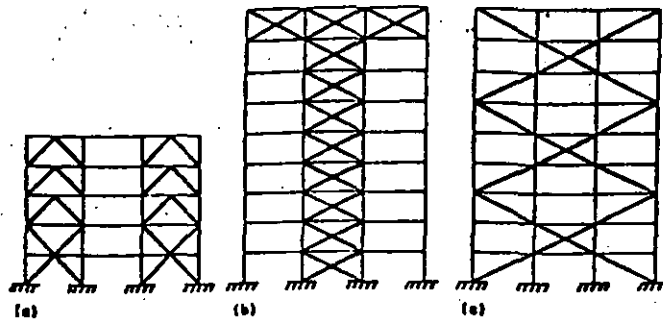


FIG. 6

Arrangements of Bracing Systems

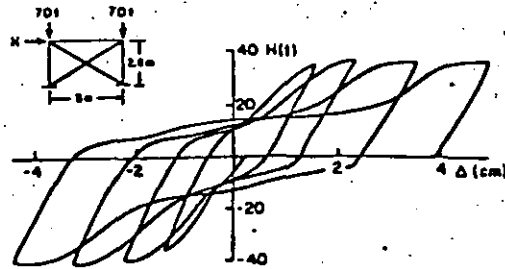


FIG. 7 Typical Pinched Hysteretic Loops for Concentrically Braced Frame (26) (1 cm = 0.39 in.; 1 ton = 2.20 kips)

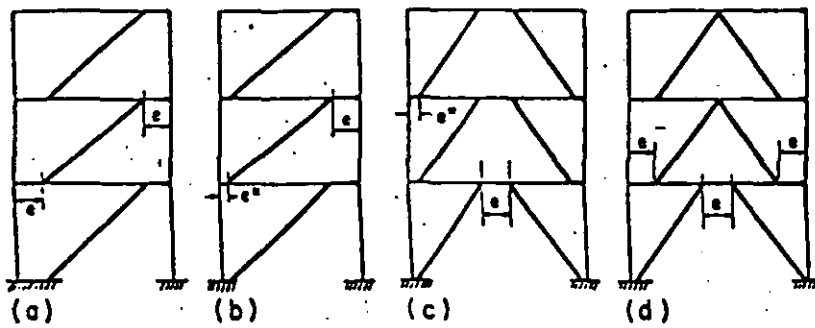


FIG. 8

Alternative Arrangements of Eccentric Bracing (5)

PARTES QUE COMPONEN LAS NTC PARA DISEÑO DE ESTRUCTURAS DE ACERO (RDF 87).

1. CONSIDERACIONES GENERALES
2. PROPIEDADES GEOMÉTRICAS
3. RESISTENCIA
 - 3.1 MIEMBROS EN TENSIÓN
 - 3.2 MIEMBROS EN COMPRESIÓN
 - 3.3 MIEMBROS EN FLEXIÓN
 - 3.4 MIEMBROS FLEXOCOMPRESIÓN
 - 3.5 MIEMBROS EN FLEXOTENSIÓN
 - 3.6 CONSTRUCCIÓN COMPUESTA
 - 3.7 ALMAS Y PATINES CON CARGAS CONCENTRADAS
4. REQUISITOS ADICIONALES PARA DISEÑO
5. CONEXIONES
6. ESTADOS LÍMITE DE SERVICIO
7. EFECTOS DE CARGAS VARIABLES REPETIDAS (FATIGA)
8. FALLA FRÁGIL
9. OTROS METALES
10. EJECUCIÓN DE LAS OBRAS
11. ESTRUCTURAS DÚCTILES

CONSIDERACIONES GENERALES

CRITERIOS DE DISEÑO. EL DIMENSIONAMIENTO SE EFECTUARÁ SIGUIENDO LOS CRITERIOS RELATIVOS A ESTADOS LÍMITE DE FALLA Y DE SERVICIO QUE SE ESTABLECEN EN EL TÍTULO VI DEL REGLAMENTO.

SE PERMITEN PROCEDIMIENTOS ALTERNATIVOS QUE PROPORCIONEN, A JUICIO DEL DEPARTAMENTO DEL D.F., NIVELES DE SEGURIDAD NO MENORES QUE LOS QUE SE OBTIENEN CON LAS NTC Y EL REGLAMENTO.

$$F_c R_N \geq F_c \sum S_N$$

DEBE REVISARSE QUE SE CUMPLE ESTA CONDICIÓN PARA LOS EDOS. LÍMITE DE FALLA CORRESPONDIENTES A TODAS LAS CONDICIONES DE CARGA DE TUBEDÉS, Y QUE SE SATISFACEN TAMBIÉN LOS EDOS. LÍMITE DE SERVICIO PROPIOS DEL PROBLEMA EN ESTUDIO.

LOS VALORES DE LAS ACCIONES, SUS COMBINACIONES Y LOS FACTORES DE CARGA (2º MIEMBRO DE LA EXPRESIÓN: ACCIONES DE DISEÑO) SE FIJAN EN EL TÍTULO VI DEL REGLAMENTO, MIENTRAS QUE EN LAS NTC SE ESTIPULAN LOS FACTORES DE RESISTENCIA Y LOS PROCEDIMIENTOS PARA EVALUAR LAS RESISTENCIAS NOMINALES DE LOS ELEMENTOS MÁS COMUNES EN ESTRUCTURAS METÁLICAS (1º MIEMBRO: RESISTENCIAS DE DISEÑO).

TIPOS DE ESTRUCTURAS Y MÉTODOS DE ANÁLISIS

ESTRUCTURAS TIPO 1 (ESTR. CONTINUAS, MARCOS RÍGIDOS)

ESTRUCTURAS TIPO 2 (CONEXIONES LIBRES ANGULARMENTE)

LAS ESTRUCTURAS DE CUALQUIERA DE LOS DOS TIPOS PUEDEN ANALIZARSE ELÁSTICAMENTE. LAS DEL TIPO 1 PUEDEN ANALIZARSE TAMBIÉN UTILIZANDO MÉTODOS PLÁSTICOS, PERO PARA ELLO ES NECESARIO QUE EL MATERIAL TENGA CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS ADECUADAS Y QUE SE EVITEN FALLAS PREMATURAS POR PANDEO, LOCAL, LATERAL O DE CONJUNTO, O DE TIPO FRÁGIL.

EN LAS ESTR. TIPO 1, ANALIZADAS ELÁSTICAMENTE, SE PERMITE REDISTRIBUIR LOS MOMENTOS OBTENIDOS DEL ANÁLISIS, SI SE CUMPLEN CIERTOS REQUISITOS QUE SE ESTIPULAN EN LAS NTC.

PROPIEDADES GEOMÉTRICAS

ÁREAS DE LAS SECCIONES TRANSVERSALES. SE DEFINEN "ÁREA TOTAL", "ÁREA NETA" Y "ÁREA NETA EFECTIVA" DE UN MIEMBRO, Y SE INDICA CÓMO DETERMINARLAS.

EL "ÁREA NETA" SE REFIERE A ELEMENTOS CON AGUJEROS, PARA REMACHES O TORNILLOS, Y EL "ÁREA NETA EFECTIVA" A LA MANERA EN QUE LOS MIEMBROS EN TENSIÓN ESTÁN CONECTADOS CON EL RESTO DE LA ESTRUCTURA Y A LA FORMA EN QUE SE TRANSMITEN LAS FUERZAS QUE OBRAN EN ELLOS.

ESTABILIDAD Y RELACIONES DE ESBELTEZ. SE ESPECIFICAN AQUÍ REQUISITOS DE CARÁCTER GENERAL PARA ASEGURAR LA ESTABILIDAD DE LAS ESTRUCTURAS EN CONJUNTO Y LA DE CADA UNO DE SUS ELEMENTOS.

SE DEFINE RELACIÓN DE ESBELTEZ PARA MIEMBROS EN COMPRESIÓN O EN TENSIÓN, Y SE INDICA CÓMO CALCULAR EL FACTOR DE LONGITUD EFECTIVA DE LAS COLUMNAS, PARA LO CUAL SE CONSIDERAN TRES CASOS, QUE DEPENDEN DE LAS CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LA ESTRUCTURA DE LA QUE FORMA PARTE EL MIEMBRO QUE SE ESTÁ DISEÑANDO Y DE LAS CONDICIONES DE SUJECIÓN EN SUS EXTREMOS:

- MIEMBROS CON EXTREMOS FIJOS LINEALMENTE ($K \leq 1.0$).
- MIEMBROS EN LOS QUE PUEDEN DESPRECIARSE LOS EFECTOS DE ESBELTEZ DEBIDOS A DESPLAZAMIENTOS LINEALES DE SUS EXTREMOS ($K \leq 1.0$).
- MIEMBROS EN LOS QUE NO PUEDEN DESPRECIARSE LOS EFECTOS ANTERIORES ($K > 1.0$).

LAS COLUMNAS DE ESTRUCTURAS REGULARES SE ENCUENTRAN EN EL CASO b CUANDO SE CUMPLE LA CONDICIÓN

$$\frac{\Delta}{h} \leq 0.08 \frac{V}{\Sigma P}$$

Δ ES EL DESPLAZAMIENTO RELATIVO DE LOS NIVELES QUE LIMITAN EL ENTREPISO EN ESTUDIO, h LA ALTURA DE ENTREPISO, V LA FUERZA CORTANTE EN EL ENTREPISO Y ΣP EL PESO TOTAL DE LA CONSTRUCCIÓN POR ENCIMA DE ÉL.

EN EL CÁLCULO DE LOS DESPLAZAMIENTOS SE TOMA EN CUENTA LA RIGIDEZ DE TODOS LOS ELEMENTOS QUE FORMAN PARTE DE LA ESTRUCTURA.

LA EXPRESIÓN ANTERIOR SE APLICA A ENTREPISOS COMPLETOS, NO A MARCOS AISLADOS.

AL FINAL DE ESTE CAPÍTULO SE PROPORCIONAN RECOMENDACIONES DE CARÁCTER GENERAL PARA EL DISEÑO DE MARCOS CONTRAVENTEADOS Y DE MARCOS SIN CONTRAVENTEADO.

RELACIONES ANCHO/GRUESO Y PANDEO LOCAL

LAS SECCIONES ESTRUCTURALES SE CLASIFICAN EN CUATRO TIPOS, EN FUNCIÓN DE LAS RELACIONES ANCHO/GRUESO MÁXIMAS DE SUS ELEMENTOS PLANOS QUE TRABAJAN EN COMPRESIÓN AXIAL, EN COMPRESIÓN DEBIDA A FLEXIÓN O EN FLEXOCOMPRESIÓN.

LAS SECCIONES TIPO 1 (SECCIONES PARA DISEÑO PLÁSTICO) PUEDEN ALCANZAR EL MOMENTO PLÁSTICO Y CONSERVARLO DURANTE LAS DOTACIONES NECESARIAS PARA LA REDISTRIBUCIÓN DE MOMENTOS EN LA ESTRUCTURA.

LAS SECCIONES TIPO 2 (SECCIONES COMPACTAS) PUEDEN ALCANZAR EL MOMENTO PLÁSTICO, PERO NO TIENEN CAPACIDAD DE DOTACIÓN BAJO MOMENTO CONSTANTE DE ESA MAGNITUD.

LAS SECCIONES TIPO 3 (SEC. NO COMPACTAS) PUEDEN ALCANZAR EL MOMENTO CORRESPONDIENTE A LA INICIACIÓN DEL FLUJO PLÁSTICO.

LAS SECCIONES TIPO 4 (SEC. ESBELTAS) TIENEN COMO EDO. LÍMITE DE RESIST. EL PANDEO LOCAL DE ALGUNO DE LOS ELEMENTOS PLANOS QUE LAS COMPUEN.

LOS EDO. LÍMITE DE RESISTENCIA SON:

SEC. TIPO 1. DESARROLLO DEL MOMENTO PLÁSTICO EN VIGAS Y DEL MOM. PLÁSTICO REDUCIDO POR COMPRESIÓN EN BARRAS FLEXOCOMPRESIONADAS, CON CAPACIDAD DE DOTACIÓN SUFICIENTE PARA SATISFACER LOS REQUISITOS DEL ANÁLISIS PLÁSTICO.

SEC. TIPO 2. IGUAL QUE LAS TIPO 1, PERO SIN REQUISITOS DE CAPACIDAD DE DOTACIÓN

SEC. TIPO 3. DESARROLLO DEL MOMENTO CORRESPONDIENTE A LA INICIACIÓN DEL FLUJO PLÁSTICO EN VIGAS, O DE ESE MOMENTO REDUCIDO POR FLEXOCOMPRESIÓN EN BARRAS FLEXOCOMPRESIONADAS.

SEC. TIPO 4. PANDEO LOCAL DE ALGUNO DE LOS ELEMENTOS PLANOS QUE LAS COMPUEN.

DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA DE DISEÑO DE SEC. TIPO 4 (ESBELTAS)

✓ ELEMENTOS PLANOS NO ATIESADOS. EN LA DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA DE DISEÑO DE ELEMENTOS PLANOS NO ATIESADOS COMPRIMIDOS, DE RELACIÓN ANCHO/GRUESO MAYOR QUE EL LÍMITE CORRESPONDIENTE A SEC. TIPO 3, Y EN LA DE MIEMBROS ESTRUCTURALES QUE CONTIENEN ELEMENTOS PLANOS DE ESTE TIPO, DEBE INCLUIRSE UN FACTOR DE REDUCCIÓN Q_s , QUE SE CALCULA COMO SIGUE :

a) PARA ÁNGULOS AISLADOS:

$$\text{SI } 640/\sqrt{F_y} < b/t < 1300/\sqrt{F_y}, \quad Q_s = 1.340 - 0.00053 (b/t) \sqrt{F_y} \quad (2.3.1)$$

$$\text{SI } b/t \geq 1300/\sqrt{F_y}, \quad Q_s = 1.090.000 / [F_y (b/t)^2] \quad (2.3.2)$$

b) PARA ÁNGULOS O PLACAS QUE SOBRESALEN DE COLUMNAS U OTROS MIEMBROS COMPRIMIDOS, Y PARA PATINES COMPRIMIDOS DE VIGAS Y TRABES ARJADAS:

$$\text{SI } 830/\sqrt{F_y} < b/t < 1470/\sqrt{F_y}, \quad Q_s = 1.415 - 0.00052 (b/t) \sqrt{F_y} \quad (2.3.3)$$

$$\text{SI } b/t \geq 1470/\sqrt{F_y}, \quad Q_s = 1.400.000 / [F_y (b/t)^2] \quad (2.3.4)$$

ELEMENTOS PLANOS ATIESADOS. EN LA DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES GEOMÉTRICAS NECESARIAS PARA CALCULAR LA RESISTENCIA DE DISEÑO DE MIEMBROS ESTRUCTURALES QUE CONTIENEN ELEMENTOS PLANOS ATIESADOS COMPRIMIDOS DE RELACIÓN ANCHO/GRUESO MAYOR QUE EL LÍMITE CORRESPONDIENTE A SEC. TIPO 3, DEBE UTILIZARSE UN ANCHO EFECTIVO REDUCIDO b_e , QUE SE CALCULA:

a) PARA PATINES DE SEC. CUADRADAS O RECTANGULARES HUECAS, CON PAREDES DE GRUESO UNIFORME:

$$b_e = \frac{2730t}{\sqrt{f}} \left[1 - \frac{540}{(b/t)\sqrt{f}} \right] \leq b \quad (2.3.5)$$

b) PARA CUALQUIER OTRO ELEMENTO PLANO ATIESADO COMPRIMIDO UNIFORMEMENTE:

$$b_e = \frac{2730t}{\sqrt{f}} \left[1 - \frac{480}{(b/t)\sqrt{f}} \right] \leq b \quad (2.3.6)$$

b y t SON EL ANCHO Y EL GRUESO DEL ELEMENTO COMPRIMIDO, b_e EL ANCHO EFECTIVO REDUCIDO, Y f ES EL ESFUERZO DE COMPRESIÓN EN EL ELEMENTO ATIESADO, PRODUCIDO POR LAS SOLICITACIONES DE DISEÑO, BASADO EN LAS PROPIEDADES GEOMÉTRICAS QUE SE EMPLEAN PARA CALCULAR LA RESISTENCIA DE DISEÑO DEL ELEMENTO ESTRUCTURAL DEL QUE FORMA PARTE.

EL FACTOR DE ÁREA Q_2 ES EL COCIENTE DEL ÁREA EFECTIVA DE LA SECCIÓN ENTRE SU ÁREA TOTAL, Y EL ÁREA EFECTIVA ES IGUAL A LA TOTAL MENOS LA SUMA DE LOS PRODUCTOS $(b-b_e)t$ DE TODOS LOS ELEMENTOS PLANOS ATIESADOS QUE HAYA EN LA SECCIÓN.

SECCIONES FORMADAS POR ELEMENTOS PLANOS ATIESADOS Y ELEMENTOS PLANOS NO ATIESADOS. EN LA DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA DE DISEÑO DE MIEMBROS CUYA SECCIÓN TRANSVERSAL CONTIENE ELEMENTOS PLANOS NO ATIESADOS Y ELEMENTOS PLANOS ATIESADOS INTERVIENE EL FACTOR $Q=Q_1Q_2$. EL ESFUERZO f QUE SE UTILIZA EN LA EC. 2.3.5 Ó 2.3.6 PARA CALCULAR EL ANCHO EFECTIVO b_e DE LOS ELEMENTOS PLANOS ATIESADOS NO TIENE QUE SER MAYOR QUE EL PRODUCTO Q_1F_y DONDE Q_1 , QUE SE CALCULA CON LA EC. 2.3.3 Ó 2.3.4, CORRESPONDE AL ELEMENTO NO ATIESADO QUE TIENE LA MAYOR RELACIÓN b/t .

RESISTENCIA

EN ESTE CAPÍTULO SE PROPORCIONAN FÓRMULAS Y RECOMENDACIONES PARA DETERMINAR LA RESISTENCIA DE DISEÑO DE MIEMBROS DE ACERO ESTRUCTURAL Y DE MIEMBROS COMPUESTOS, FORMADOS POR PERFILES DE ACERO QUE TRABAJAN EN CONJUNTO CON ELEMENTOS DE CONCRETO REFORZADO O CON RECUBRIMIENTOS O RELLENOS DE ESTE MATERIAL, SOMETIDOS A LAS SOLICITACIONES MÁS COMUNES EN ESTRUCTURAS REGICULARES.

PARTES QUE DEBEN COMPONER CADA UNO DE LOS CAPÍTULOS DE DISEÑO DE ELEMENTOS ESTRUCTURALES.

- I. ESTADOS LÍMITE DE INTERÉS, TANTO DE FALLA COMO DE SERVICIO
- II. COMBINACIONES DE CARGA QUE DEBEN CONSIDERARSE AL ESTUDIAR CADA ESTADO LÍMITE. FACTORES DE CARGA.
- III. FÓRMULAS Y PROCEDIMIENTOS PARA DETERMINAR LA RESISTENCIA DE DISEÑO CORRESPONDIENTE A CADA ESTADO LÍMITE DE FALLA. FACTORES DE RESISTENCIA.
- IV. MÉTODOS PARA DISEÑAR LA ESTRUCTURA EN CONDICIONES DE SERVICIO.

MIEMBROS EN TENSIÓN

ESTADOS LÍMITE. SE CONSIDERARÁN LOS ESTADOS LÍMITE DE FLUJO PLÁSTICO EN LA SECCIÓN TOTAL Y DE FRACTURA EN EL ÁREA NETA.

RESISTENCIA DE DISEÑO. LA RESISTENCIA DE DISEÑO R_t DE UN ELEMENTO ESTRUCTURAL EN TENSIÓN ES LA MENOR DE LAS SIGUIENTES :

a. ESTADO LÍMITE DE FLUJO PLÁSTICO EN LA SECCIÓN TOTAL :

$$F_R = 0.90, \quad R_t = A_t F_y F_R$$

b. ESTADO LÍMITE DE FRACTURA EN LA SECCIÓN NETA :

$$F_R = 0.75, \quad R_t = A_e F_u F_R$$

A_t ES EL ÁREA TOTAL DE LA SECCIÓN TRANSVERSAL DEL MIEMBRO, A_e SU ÁREA NETA EFECTIVA, F_y EL ESFUERZO EN EL LÍMITE INFERIOR DE FLUENCIA DEL MATERIAL Y F_u SU ESFUERZO MÍNIMO ESPECIFICADO DE RUPTURA EN TENSIÓN. F_R ES EL FACTOR DE DISMINUCIÓN DE LA RESISTENCIA.

MIEMBROS EN COMPRESIÓN

ESTADOS LÍMITE. PARA EL DISEÑO DE MIEMBROS COMPRIMIDOS HECHOS CON SECCIONES TIPO 1, 2 O 3 SE CONSIDERARÁ EL ESTADO LÍMITE DE PAUDEO POR FLEXIÓN; EN SECCIONES TIPO 4 SE CONSIDERARÁ, ADEMÁS, EL EDO. LÍMITE DE PAUDEO LOCAL. EN COLUMNAS DE SECCIÓN TRANSVERSAL CON UNO O NINGÚN EJE DE SIMETRÍA, COMO ÁNGULOS O TÉS, O CON DOS EJES DE SIMETRÍA PERO BAJA RIGIDEZ TORSIONAL, COMO LAS SECCIONES EN FORMA DE CRUZ O LAS FORMADAS POR PLACAS DE PEQUEÑO ESPESOR, SE TENDRÁN EN CUENTA TAMBIÉN LOS EDOS. LÍMITE DE PAUDEO POR FLEXOTORSIÓN Y POR TORSIÓN.

EN COLUMNAS COMPUESTAS, DEL TIPO DE LAS FORMADAS POR CUATRO ÁNGULOS LIGADOS ENTRE SÍ POR CELOSÍAS, SE CONSIDERARÁN LOS EDOS. LÍMITE DEL MIEMBRO COMPLETO Y DE CADA UNO DE LOS ELEMENTOS COMPRIMIDOS QUE LO FORMAN.

RESISTENCIA DE DISEÑO. LA RESISTENCIA DE DISEÑO R_c DE UN ELEMENTO ESTRUCTURAL DE EJE RECTO Y DE SECCIÓN TRANSVERSAL CONSTANTE SOMETIDO A COMPRESIÓN AXIAL SE DETERMINA COMO SE INDICA A CONTINUACIÓN (PRESENTAREMOS AQUÍ SOLAMENTE LAS FÓRMULAS QUE CORRESPONDEN A SECCIONES TIPO 1, 2 O 3; EN LAS NTC SE CUBREN TAMBIÉN LAS SECCIONES TIPO 4).

ESTADO LÍMITE DE PAUDEO POR FLEXIÓN.

a. MIEMBROS DE SECCIÓN TRANSVERSAL H O RECTANGULAR HUECA

$$F_r = 0.90$$

$$R_c = \frac{F_y}{[1 + \lambda^{2n} - 0.15^{2n}]^{1/n}} A_t F_e$$

A_t ES EL ÁREA TOTAL DE LA SECCIÓN TRANSVERSAL DE LA COLUMNA.

$\lambda = \frac{KL}{r} \sqrt{\frac{F_y}{\pi^2 E}}$, DONDE KL/r ES LA RELACIÓN DE ESBELTEZ EFECTIVA MÁXIMA DE LA COLUMNA.

n ES UN COEFICIENTE ADIMENSIONAL, QUE VALE :

COLUMNAS DE SECCIÓN TRANSVERSAL H, LAMINADAS O HECHAS CON TRES PLACAS SOLDADAS, OBTENIDAS CORTÁNDOLAS CON OXÍGENO DE PLACAS MÁS ANCHAS, Y COLUMNAS DE SECCIÓN TRANSVERSAL RECTANGULAR HUECA, LAMINADAS O HECHAS CON CUATRO PLACAS SOLDADAS, QUE CUMPLEN LOS REQUISITOS DE LAS SECCIONES TIPO 1, 2 Ó 3 :

$$n = 1.4$$

COLUMNAS DE SECCIÓN TRANSVERSAL H, HECHAS CON TRES PLACAS LAMINADAS SOLDADAS ENTRE SÍ, QUE CUMPLEN LOS REQUISITOS DE LAS SECCIONES TIPO 1, 2 Ó 3 :

$$n = 1.0$$

CUANDO EL VALOR DE F_y DEL ACERO ES 3500 KG/CM² O MÁS, PUEDE UTILIZARSE VALORES MAYORES DE n , SI SE EFECTÚA UN ESTUDIO QUE LO JUSTIFIQUE

b. MIEMBROS CUYA SECCIÓN TRANSVERSAL TIENE UNA FORMA CUALQUIERA,

NO INCLUIDA EN a. $F_e = 0.85$

$$\text{Si } KL/r \geq (KL/r)_c, \quad R_c = \frac{20120000}{(KL/r)^2} A_t F_e$$

$$\text{Si } KL/r < (KL/r)_c, \quad R_c = A_t F_y \left[1 - \frac{(KL/r)^2}{2(KL/r)_c^2} \right] F_e$$

$$(KL/r)_c = 6340 / \sqrt{F_y}$$

KL/r ES LA RELACIÓN DE ESBELTEZ EFECTIVA MÁXIMA DE LA COLUMNA Y $(KL/r)_c$ EL VALOR DE LA MISMA QUE SEPARA EL PANDEO ELÁSTICO DEL INELÁSTICO.

TOMANDO A_t EN CM² Y F_y EN KG/CM², R_c SE OBTIENE EN KG.

ESTADO LÍMITE DE PANDEO LOCAL. CUANDO LA SECCIÓN TRANSVERSAL DE LA COLUMNA ES TIPO 4, LA RESISTENCIA DE DISEÑO R_c SE DETERMINA, CUALQUIERA QUE SEA LA FORMA DE LA SECCIÓN, COMO SIGUE:

$$\text{SI } KL/r \geq (KL/r)_c^*, \quad R_c = \frac{20120000}{(KL/r)^2} A_t F_2 \quad (3.2.4)$$

$$\text{SI } KL/r < (KL/r)_c^*, \quad R_c = QA_t F_y \left[1 - \frac{(KL/r)^2}{2(KL/r)_c^2} \right] F_2 \quad (3.2.5)$$

$$(KL/r)_c^* = 6340 / \sqrt{Q F_y}; \quad F_2 = 0.75$$

EN MIEMBROS DE SECCIÓN TRANSVERSAL H O RECTANGULAR HUECA, LOS VALORES DE R_c OBTENIDOS CON LAS ECS. 3.2.4 Y 3.2.5 NO DEBEN SER MAYORES QUE LOS OBTENIDOS CON LA EC. 3.2.1 MULTIPLICADOS POR EL FACTOR Q .

EL ÁREA A_t Y EL RADIO DE GIRO r DE LAS ECS. 3.2.4 Y 3.2.5 SON LOS DE LA SECCIÓN TRANSVERSAL TOTAL.

Q ES UN FACTOR DE PANDEO LOCAL, DADO POR

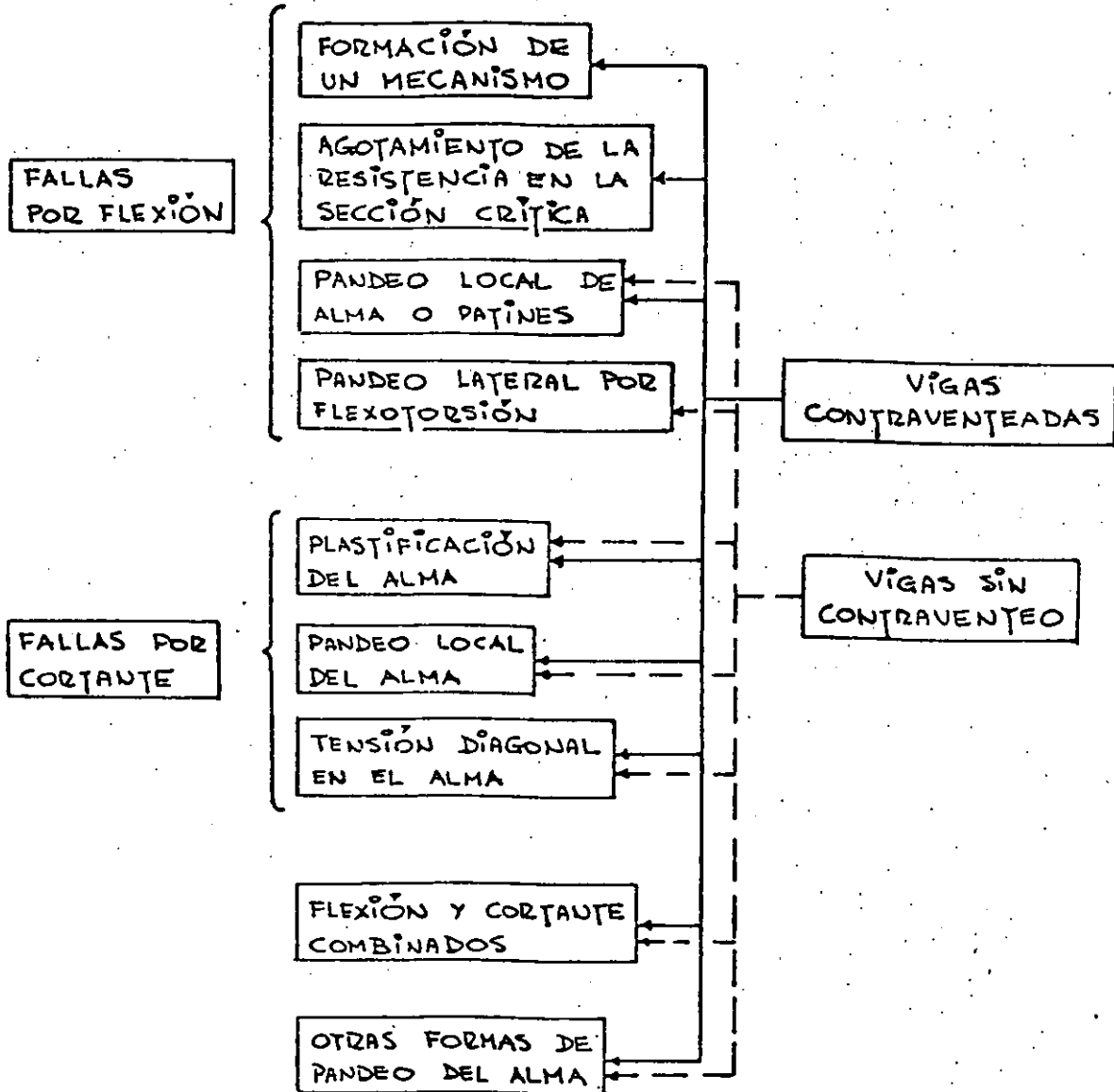
$$Q = Q_1 Q_2$$

Q_1 Y Q_2 SE CALCULAN COMO SE INDICÓ MÁS ARRIBA; Q_1 CORRESPONDE AL ELEMENTO PLANO NO ATIESADO QUE TIENE LA MAYOR RELACIÓN b/t .

EN SECCIONES FORMADAS EXCLUSIVAMENTE POR ELEMENTOS PLANOS ATIESADOS Q_1 SE TOMA IGUAL A 1.0, Y EN SECCIONES FORMADAS EXCLUSIVAMENTE POR ELEMENTOS PLANOS NO ATIESADOS Q_2 SE TOMA IGUAL A 1.0.

MIEMBROS EN FLEXIÓN

ESTADOS LÍMITE



SÓLO LOS ESTADOS LÍMITE POR FORMACIÓN DE UN MECANISMO CON ARTICULACIONES PLÁSTICAS Y POR PANDEO LATERAL NO SON COMUNES A LAS VIGAS CONTRAVENTEADAS Y A LAS QUE NO TIENEN CONTRAVENTEADO. LOS ESTADOS LÍMITE RESTANTES PUESEN PRESENTARSE EN UNO U OTRO CASO.

RESISTENCIA DE DISEÑO. LA RESISTENCIA DE DISEÑO, M_R , DE UNA VIGA O TRABE DE EJE RECTO Y SECCIÓN TRANSVERSAL CONSTANTE SE DETERMINA COMO SE INDICA EN LO QUE SIGUE.

MIEMBROS SOPORTADOS LATERALMENTE ($L \leq L_u$)

SECCIONES TIPO 1 Ó 2: $M_R = F_y Z F_y = F_y M_p$

PUEDE UTILIZARSE LA TEORÍA PLÁSTICA CUANDO LAS SECCIONES SON TIPO 1 Y LA DISTANCIA ENTRE PUNTOS DEL PATÍN COMPRIMIDO SOPORTADOS LATERALMENTE NO EXCEDE DE L_p , EN ZONAS DE FORMACIÓN DE ARTICULACIONES PLÁSTICAS ASOCIADAS CON EL MECANISMO DE COLAPSO.

SECCIONES TIPO 3: $M_R = F_y S F_y = F_y M_y$

EN SECCIONES I O H FLEXIONADAS ALREDEDOR DE CUALQUIERA DE SUS EJES CENTROIDALES Y PRINCIPALES PUEDE TOMARSE UN VALOR DE M_R COMPRENDIDO ENTRE $F_y M_y$ Y $F_y M_p$, CALCULADO POR INTERPOLACIÓN LINEAL, TENIENDO EN CUENTA QUE ESOS VALORES CORRESPONDEN, RESPECTIVAMENTE, A RELACIONES ANCHO/GRUESO DE LOS PATINES DE $830/\sqrt{F_y}$ Y $540/\sqrt{F_y}$.

NO HAY LÍMITES EN LA LONGITUD SIN SOPORTE LATERAL CUANDO LA SECCIÓN TRANSVERSAL ES TIPO 1, 2 Ó 3, CIRCULAR O CUADRADA, HUECA O MACIZA, O CUANDO LA VIGA, CUALQUIERA QUE SEA LA FORMA DE SU SECCIÓN TRANSVERSAL, SE FLEXIONA ALREDEDOR DEL EJE DE MENOR MOMENTO DE INERCIA.

SECCIONES TIPO 4. SE DAN RECOMENDACIONES PARA TOMAR EN CUENTA LA POSIBLE FALLA POR PANDEO LOCAL DE ESTAS SECCIONES.

EN LAS EXPRESIONES ANTERIORES, $F_y = 0.90$, Z Y S SON LOS MÓDULOS DE SECCIÓN PLÁSTICO Y ELÁSTICO, $M_p = Z F_y$ ES EL MOMENTO PLÁSTICO RESISTENTE DE LA SECCIÓN, Y $M_y = S F_y$ EL MOMENTO CORRESPONDIENTE A LA AMBICIÓN DEL ESFUERZO DE FLUENCIA EN ELLA (SIN CONSIDERAR ESFUERZOS RESIDUALES).

L ES LA DISTANCIA ENTRE PUNTOS DEL PATÍN COMPUESTO DE LA VIGA
POCOTADOS LATERALMENTE.

L_p ES LA LONGITUD MÁXIMA NO SOPORTADA LATERALMENTE PARA LA QUE EL MIEMBRO PUEDE DESARROLLAR TODAVÍA EL MOMENTO M_p , Y CONSERVARLO DURANTE LAS ROTACIONES NECESARIAS PARA LA FORMACIÓN DEL MECANISMO DE COLAPSO.

PARA SECCIONES I:
$$L_p = \frac{253000 + 155000 (M_s/M_p)}{F_y} \gamma_y$$

PARA SECCIONES II:
$$L_p = \frac{352000 + 211000 (M_s/M_p)}{F_y} \gamma_y \leq \frac{211000 \gamma_y}{F_y}$$

TOMANDO F_y EN KG/CM^2 Y γ_y EN CM, L_p SE OBTIENE EN CM.

L_u ES LA LONGITUD MÁXIMA NO SOPORTADA LATERALMENTE PARA LA QUE EL MIEMBRO PUEDE DESARROLLAR TODAVÍA EL MOMENTO M_p , SIN EXIGIR CAPACIDAD DE ROTACIÓN. MÁS ADELANTE SE DAN FÓRMULAS PARA CALCULARLA.

MIEMBROS NO SOPORTADOS LATERALMENTE ($L > L_u$)

SECCIONES TIPO 1 Ó 2 CON DOS EJES DE SIMETRÍA, FLEXIONADAS ALREDEDOR DEL

EJE DE MAYOR MOMENTO DE INERCIA:

SI $M_u > \frac{2}{3} M_p$,
$$M_R = 1.15 F_R M_p \left(1 - \frac{0.28 M_p}{M_u} \right) \leq F_R M_p$$

SI $M_u \leq (2/3) M_p$,
$$M_R = F_R M_u$$

M_u , MOMENTO RESISTENTE NOMINAL DE LA SECCIÓN, CUANDO EL PANDEO SE INICIA EN EL INTERVALO ELÁSTICO, VALE

$$M_u = \frac{\pi}{CL} \sqrt{EI_y GJ + \left(\frac{\pi E}{L} \right)^2 I_y C_a} = \frac{E\pi}{CL} \sqrt{I_y \left[\frac{J}{2.6} + \left(\frac{\pi}{L} \right)^2 C_a \right]}$$

EN SECCIONES I LAMINADAS O HECHAS CON PLACAS, DE DIMENSIONES SEMEJANTES A LAS LAMINADAS, PUEDE TOMARSE

$$M_u = \frac{1}{C} \sqrt{M_{c1}^2 + M_{c2}^2}, \text{ DONDE } M_{c1} = \frac{EAt}{L/\gamma_y}, \quad M_{c2} = \frac{4.7EAd}{(L/\gamma_y)^2}$$

$F_p = 0.90$, A y d SON EL ÁREA TOTAL Y EL PUNTO DE LA SECCIÓN, I_y Y r_y SU MOMENTO DE INERCIA Y RADIO DE GIRO RESPECTO AL EJE DE SIMETRÍA SITUADO EN EL PLANO DEL ALMA, t EL GROSOR DEL PATÍN COMPRIMIDO, J Y C_2 LAS CONSTANTES DE TORSIÓN DE S. VENANT Y DE TORSIÓN POR ALABEO DE LA SECCIÓN, Y C , QUE PUEDE TOMARSE CONSERVADORAMENTE IGUAL A 1.0, ESTÁ DADO POR:

$$C = 0.60 + 0.40 M_1/M_2 \text{ PARA TRAMOS EN CURVATURA SIMPLE}$$

$$C = 0.60 - 0.40 M_1/M_2 \geq 0.40, \text{ PARA TRAMOS EN CURVATURA DOBLE}$$

$C = 1.0$ CUANDO EL MOMENTO EN CUALQUIER SECCIÓN DEL TRAMO NO SOPORTADO LATERALMENTE ES MAYOR QUE M_2 .

M_1 Y M_2 SON, RESPECTIVAMENTE, EL MENOR Y EL MAYOR DE LOS MOMENTOS EN LOS EXTREMOS DEL TRAMO EN ESTUDIO, TOMADOS EN VALOR ABSOLUTO.

L_r ES LA LONGITUD NO SOPORTADA LATERALMENTE QUE SEPARA EL PÁNDEO ELÁSTICO DEL INELÁSTICO.

PARA MIEMBROS DE SECCIÓN I, L_u Y L_r ESTÁN DADOS POR

$$L_u = \frac{\sqrt{2} \pi}{X_u} \sqrt{\frac{EC_2}{GJ}} \sqrt{1 + \sqrt{1 + X_u^2}}, \quad L_r = \frac{\sqrt{2} \pi}{X_r} \sqrt{\frac{EC_2}{GJ}} \sqrt{1 + \sqrt{1 + X_r^2}}$$

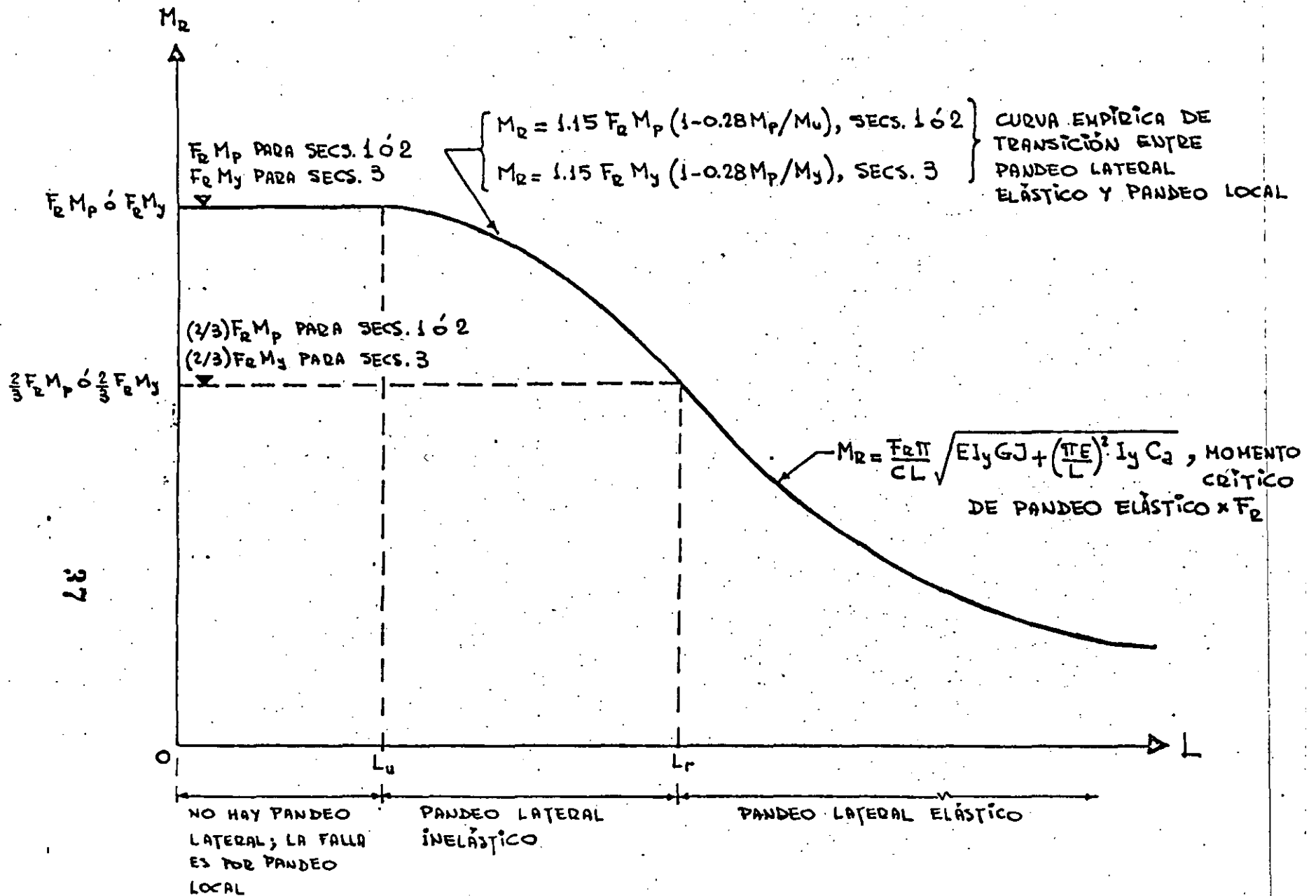
$$E = 2040000 \text{ Kg/cm}^2, \quad G = 784000 \text{ Kg/cm}^2$$

$$X_u = 4.293 C \frac{Z F_y}{GJ} \sqrt{\frac{C_2}{I_y}} = 8.720 X_r, \quad X_r = \frac{4}{3} C \frac{Z F_y}{GJ} \sqrt{\frac{C_2}{I_y}}$$

EN LAS NTC SE DAN TAMBIÉN EXPRESIONES APROXIMADAS PARA CALCULAR L_u Y L_r EN SECCIONES I LAMINADAS, ASÍ COMO PARA SECCIONES TRANSVERSALES RECTANGULARES.

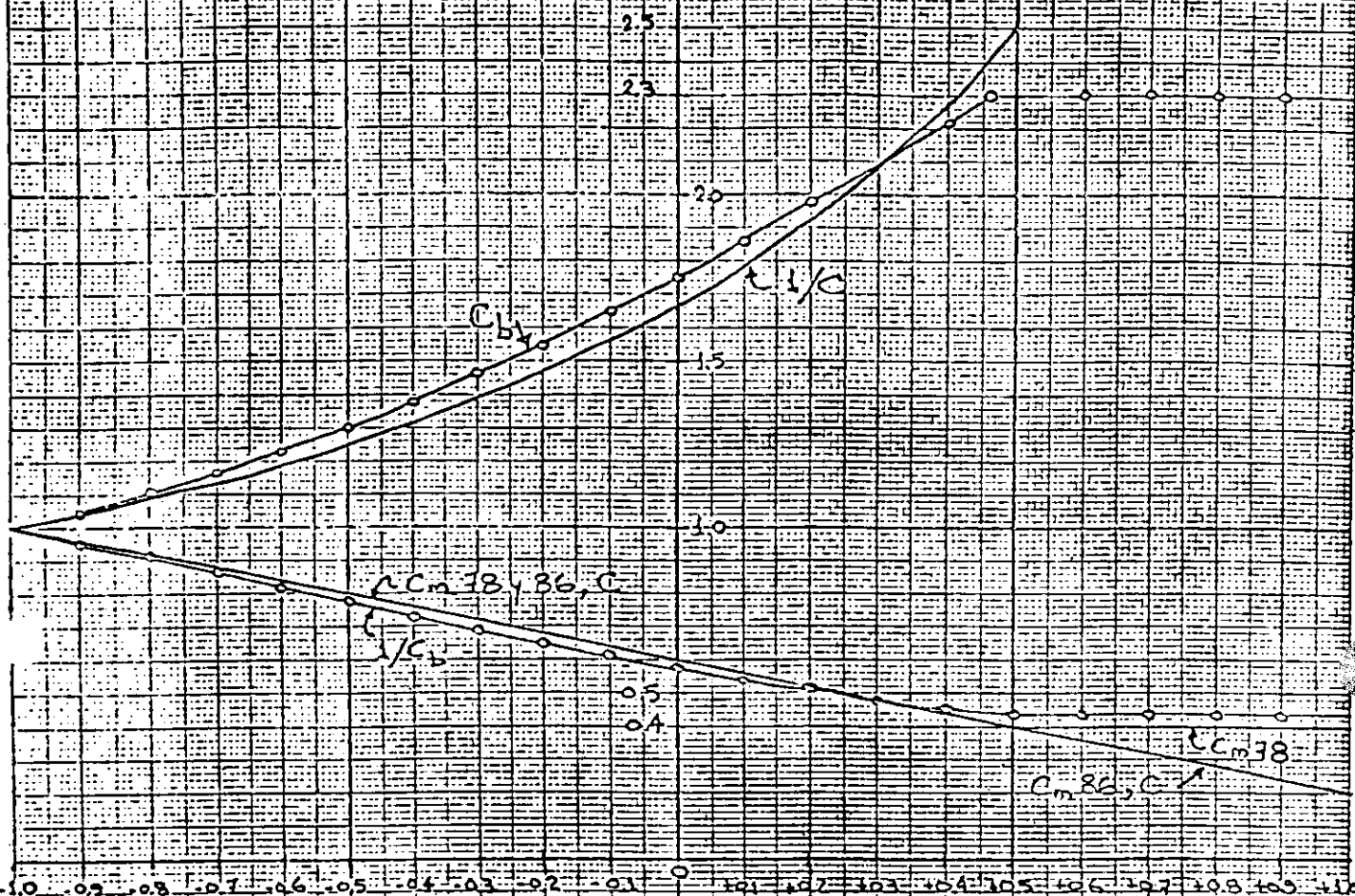
TAMBIÉN SE INDICA COMO CALCULAR LA RESISTENCIA DE DISEÑO M_d PARA SECCIONES TIPO 3 Ó 4 CON DOS EJES DE SIMETRÍA Y PARA CANALES EN LAS QUE ESTÉ IMPEDIDA LA ROTACIÓN ALREDEDOR DEL EJE LONGITUDINAL, FLEXIONADAS ALREDEDOR DEL EJE DE MAYOR MOMENTO DE INERCIA.

REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LA RESISTENCIA DE DISEÑO DE MIEMBROS EN FLEXIÓN



COEFICIENTES

C_b, C_m, C



M_1/M_2

AISC 78 y 86 $C_b = 1.75 + 1.05(M_1/M_2) + 0.3(M_1/M_2)^2 \quad \lambda = 2.3$

AISC 78 $C_m = 0.6 - 0.4(M_1/M_2) \geq 0.4$

AISC 86 $C_m = 0.6 - 0.4(M_1/M_2)$ DESAPARECE EL LIMITE 0.4

NTC 87 FLEXIÓN $C = 0.60 + 0.40 M_1/M_2$ CURV. SIMPLE

$C = 0.60 - 0.40 M_1/M_2 \geq 0.4$ CURV. DOBLE

FLEXOCOMPRESIÓN $C = 0.60 + 0.40 M_1/M_2$ CURVATURA SIMPLE

DESAPARECE EL LIM. 0.4 $C = 0.60 - 0.40 M_1/M_2$ CURVATURA DOBLE

MIEMBROS EN FLEXIÓN :

VALORES DEL COEFICIENTE C PARA DISTINTOS CASOS DE CARGA Y SOPORTE LATERAL

CARGAS							
SOPORTE LATERAL (PLANTA)							
DIAGRAMA DE MOMENTOS							
VALORES DE C	1.0	$L_1 : 1.0$ 1.0 $L_2 : 0.60$	Si $M_1 > M_2$, $0.6 + 0.4 \frac{M_1}{M_2} \geq 0.4$ Si $M_1 < M_2$, 1.0	$L_1 : 0.6 - 0.4 \frac{M_2}{M_1} \geq 0.4$ $L_2 : 0.6 - 0.4 \frac{M_2}{M_1} \geq 0.4$	$L_1 : 0.6 - 0.4 \frac{M_3}{M_1} \geq 0.4$ $L_2 : 1.0$ $L_3 : 0.6 - 0.4 \frac{M_3}{M_4} \geq 0.4$	$L_1 : 0.6$ $L_2 : 1.0$	L_1 y $L_3 : 0.6$ $L_2 : 0.6 + 0.4 \frac{M_1}{M_2}$

RESISTENCIA DE DISEÑO AL CORTANTE. LA RESISTENCIA DE DISEÑO AL CORTANTE, V_R , DE UNA VIGA O TRABE DE EJE RECTO Y SECCIÓN TRANSVERSAL CONSTANTE, DE SECCIÓN I, C O EN CAJÓN, ES

$$V_R = F_R V_N = F_R A_w F_s$$

$F_R = 0.90$, Y $V_N = A_w F_s$ ES LA RESISTENCIA NOMINAL, QUE SE DETERMINA MULTIPLICANDO EL ÁREA DEL ALHA O ALHAS POR EL VALOR DE F_s QUE CORRESPONDA AL CASO EN CONSIDERACIÓN. F_s SE TOMA DE LA FIGURA DE LA HOJA SIGUIENTE.

PARA PODER TOMAR COMO ESTADO LÍMITE LA FALLA POR TENSIÓN DIAGONAL, LA SECCIÓN DEBE TENER UNA SOLA ALHA (SECCIONES I LAMINADAS O FORJADAS POR PLACAS) Y ESTAR REFORZADA CON ATIESADORES TRANSVERSALES DISEÑADOS ADECUADAMENTE.

$$k = 5.0 + \frac{5.0}{(a/h)^2}$$

"a" ES LA SEPARACIÓN ENTRE ATIESADORES TRANSVERSALES Y h EL PERALTE DEL ALHA (DISTANCIA LIBRE ENTRE PATINES). k ES UN COEFICIENTE SIN DIMENSIONES.

k SE TOMA IGUAL A 5.0 CUANDO a/h ES MAYOR QUE 3.0 O QUE $\left(\frac{260}{h/t}\right)^2$. EN ALHAS SIN ATIESADORES TRANSVERSALES, a/h = ∞ .

MIEMBROS FLEXOCOMPRESIDOS

ESTA ES UNA DE LAS PARTES DE LAS NTC QUE HA EXPERIMENTADO CAMBIOS DE MAYOR IMPORTANCIA. EN ELLA SE TRATA EL DISEÑO DE MIEMBROS DE EJE RECTO Y SECCIÓN TRANSVERSAL CONSTANTE, CON DOS EJES DE SIMETRÍA, SUJETOS A COMPRESIÓN Y A FLEXIÓN BIAXIAL.

... LAS ESTRUCTURAS SE CLASIFICAN EN REGULARES E IRREGULARES Y SE PROPORCIONAN MÉTODOS DE ANÁLISIS Y DISEÑO QUE SOLO SON APLICABLES A LAS PRIMERAS, ASÍ COMO OTROS MÉTODOS DE CARÁCTER GENERAL.

MÉTODOS DE ANÁLISIS Y DISEÑO. LOS ELEMENTOS MECÁNICOS DE DISEÑO PUEDEN OBTENERSE CON UN ANÁLISIS DE PRIMER ORDEN, BASADO EN LA GEOMETRÍA INICIAL DE LA ESTRUCTURA, O MEDIANTE UN ANÁLISIS DE SEGUNDO ORDEN EN EL QUE SE TOMEN EN CUENTA, COMO MÍNIMO, LOS INCREMENTOS DE LAS FUERZAS INTERNAS PRODUCIDOS POR LAS CARGAS VERTICALES AL ACTUAR SOBRE LA ESTRUCTURA DEFORMADA Y, CUANDO SEAN SIGNIFICATIVOS, LA INFLUENCIA DE LA FUERZA AXIAL EN LAS RIGIDECES Y FACTORES DE TRANSPORTE DE LAS COLUMNAS Y EN LOS MOMENTOS DE EMPOTRAMIENTO, ASÍ COMO LOS EFECTOS DE LA PLASTIFICACIÓN PARCIAL DE LA ESTRUCTURA.

LOS FACTORES QUE NO SE CONSIDERAN EN EL ANÁLISIS SE INCLUYEN, DE MANERA INDIRECTA, EN LAS FÓRMULAS DE DISEÑO.

ESTADOS LÍMITE. DEBEN CONSIDERARSE LOS EDOS. LÍMITE DE FALLA SIGUIENTES:

PAUDEO DE CONJUNTO DE UN ENTREPISO, BAJO CARGA VERTICAL.

PAUDEO INDIVIDUAL DE UNA O MÁS COLUMNAS, BAJO CARGA VERTICAL.

INESTABILIDAD DE CONJUNTO DE UN ENTREPISO, BAJO CARGAS VERTICALES Y HORIZONTALES COMBINADAS.

... FALLA INDIVIDUAL DE UNA O MÁS COLUMNAS, BAJO CARGAS VERTICALES Y HORIZONTALES COMBINADAS, POR INESTABILIDAD O PORQUE SE AGOTE LA RESISTENCIA DE ALGUNA DE SUS SECCIONES EXTREMAS.

PAUDEO LOCAL.

DEBE CONSIDERARSE TAMBIÉN UN ESTADO LÍMITE DE SERVICIO, DE DEFORMACIONES LATERALES DE ENTREPISO.

MIEMBROS FLEXOCOMPRESOS

ES UNO DE LOS CAPÍTULOS QUE HA EXPERIMENTADO CAMBIOS DE MAYOR IMPORTANCIA.

LAS ESTRUCTURAS SE CLASIFICAN EN "REGULARES" E "IRREGULARES", PORQUE SE PROPORCIONAN MÉTODOS DE ANÁLISIS Y DISEÑO QUE SÓLO SON APLICABLES A LAS PRIMERAS. OTROS MÉTODOS SON DE CARÁCTER GENERAL.

SE PERMITE EL ANÁLISIS DE PRIMER O DE SEGUNDO ORDEN, Y SE INDICAN LOS EFECTOS QUE DEBEN INCLUIRSE EN ÉSTE. SE DA UN MÉTODO APROXIMADO PARA EL ANÁLISIS DE SEGUNDO ORDEN DE ESTRUCTURAS REGULARES.

ESTADOS LÍMITE. DEBEN CONSIDERARSE LOS ESTADOS LÍMITE DE FALLA SIGUIENTES:

PANDEO DE CONJUNTO DE UN ENTREPISO, BAJO CARGA VERTICAL.

PANDEO INDIVIDUAL DE UNA O MÁS COLUMNAS, BAJO CARGA VERTICAL.

INESTABILIDAD DE CONJUNTO DE UN ENTREPISO, BAJO CARGAS VERTICALES Y HORIZONTALES COMBINADAS.

FALLA INDIVIDUAL DE UNA O MÁS COLUMNAS, BAJO CARGAS VERTICALES Y HORIZ. COMBINADAS, POR INESTABILIDAD O PORQUE SE AGOTE LA RESISTENCIA DE ALGUNA DE SUS SECCIONES EXTREMAS.

DEBE CONSIDERARSE TAMBIÉN UN ESTADO LÍMITE DE SERVICIO, DE DEFORMACIONES LATERALES DE ENTREPISO.

DIMENSIONAMIENTO DE COLUMNAS EN ESTRUCTURAS REGULARES.

REVISIÓN DE LAS SECCIONES EXTREMAS.

a) SECCIONES TIPO 1 Y 2. EN CADA UNO DE LOS EXTREMOS DE LA COLUMNA DEBE SATISFACERSE LA CONDICIÓN

$$\left(\frac{M_{uox}}{M_{pcx}}\right)^\alpha + \left(\frac{M_{uoy}}{M_{pcy}}\right)^\alpha \leq 1.0 \quad (3.4.1)$$

M_{pcx} y M_{pcy} SON LOS MOMENTOS RESISTENTES DE DISEÑO DE LA SECCIÓN FLEXIONADA ALREDEDOR DE CADA UNO DE LOS EJES CENTROIDALES Y PRINCIPALES, CALCULADOS TENIENDO EN CUENTA LA FUERZA DE COMPRESIÓN Y SUPONIENDO, EN CADA CASO, QUE EL OTRO MOMENTO ES NULO.

$$M_{pcx} = 1.18 F_c M_{px} \left(1 - \frac{P_u}{F_c P_y}\right) \leq F_c M_{px}; \quad M_{pcy} = 1.67 F_c M_{py} \left(1 - \frac{P_u}{F_c P_y}\right) \leq F_c M_{py}$$

α TIENE ALGUNO DE LOS VALORES SIGUIENTES:

SECCIONES H	$\alpha = 1.60 - p/2L_n$
SECCIONES EN CAJÓN, CUADRADAS	$\alpha = 1.70 - p/2L_n$
CUALQUIER OTRA SECCIÓN	$\alpha = 1.0$

P_u , M_{uox} Y M_{uoy} SON LA FUERZA AXIAL DE DISEÑO QUE OBRA EN LA COLUMNA Y LOS MOMENTOS DE DISEÑO EN EL EXTREMO CONSIDERADO.

$F_c = 0.90$, $M_{px} = Z_x F_y$, $M_{py} = Z_y F_y$, $P_y = A_t F_y$, $p = P_u / F_c P_y$. L_n INDICA LOGARITMO NATURAL.

SI SE TOMA $\alpha = 1.0$, LA EC. 3.4.1 SE TRANSFORMA EN

$$\frac{P_u}{F_c P_y} + \frac{0.85 M_{uox}}{F_c M_{px}} + \frac{0.60 M_{uoy}}{F_c M_{py}} \leq 1.0$$

ESTA ECUACIÓN DEBE UTILIZARSE CUANDO NO SE CONOCE α Y PUEDE EMPLEARSE, CONSERVADORAMENTE, EN VEZ DE LA EC. 3.4.1, SIN CONOCIENDO α .

b) SECCIONES TIPO 3 Y 4. EN CADA EXTREMO DEBE CUMPLIRSE:

$$\frac{P_u}{F_c P_y} + \frac{M_{uox}}{M_{rx}} + \frac{M_{uoy}}{M_{ry}} \leq 1.0$$

M_{rx} Y M_{ry} SE CALCULAN COMO SE INDICA EN EL CAPÍTULO DE FLEXIÓN, PARA MIEMBROS SOPORTADOS LATERALMENTE.

REVISIÓN DE LA COLUMNA COMPLETA

a) SECCIONES TIPO 1 Y 2. DEBE SATISFACERSE LA CONDICIÓN

$$\left(\frac{M_{uox}^*}{M_{ucx}}\right)^\beta + \left(\frac{M_{uoy}^*}{M_{ucy}}\right)^\beta \leq 1.0 \quad (3.4.6)$$

M_{ucx} Y M_{ucy} SON LOS MOMENTOS RESISTENTES DE DISEÑO DE LA COLUMNA FLEXIONADA EN CADA UNO DE SUS PLANOS DE SIMETRÍA, REDUCIDOS POR LA PRESENCIA DE LA FUERZA DE COMPRESIÓN Y POR POSIBLE PANDEO LATERAL.

$$M_{ucx} = M_m \left(1 - \frac{P_u}{P_c}\right); \quad M_{ucy} = F_R M_{py} \left(1 - \frac{P_u}{P_c}\right)$$

β TIENE ALGUNO DE LOS VALORES SIGUIENTES :

SECCIONES H

$$\beta = 0.4 + p + B/D \geq 1.0, \text{ PARA } \frac{B}{D} \geq 0.3 \\ = 1.0, \text{ PARA } B/D < 0.3$$

SECCIONES EN CAJÓN, CUADRADAS

$$\beta = 1.3 + 1000 p / (L/r)^2 \geq 1.4$$

CUALQUIER OTRA SECCIÓN

$$\beta = 1.0$$

D ES EL PERALTE TOTAL DE LA SECCIÓN, Y B EL ANCHO DE LOS PATINES.

$$F_R = 0.90$$

P_u , M_{uox}^* Y M_{uoy}^* SON LA FUERZA AXIAL DE DISEÑO Y LOS MOMENTOS DE DISEÑO.

SE UTILIZAN SIEMPRE LOS MOMENTOS DE DISEÑO MÁXIMOS, ALREDEDOR DE LOS EJES X Y Y, AUNQUE LOS DOS NO SE PRESENTEN EN EL MISMO EXTREMO DE LA COLUMNA.

M_m ES EL MOMENTO RESISTENTE DE DISEÑO PARA FLEXIÓN ALREDEDOR DE X.

SE CALCULA COMO SE INDICA EN EL CAP DE FLEXIÓN 0, EN FORMA APROXIMADA,

$$\text{CON LA EC. } M_m = F_R \left[1.07 - \frac{(L/r_x) \sqrt{F_y}}{26500} \right] M_{px} \leq M_{px} F_R$$

P_c ES LA RESISTENCIA DE DISEÑO EN COMPRESIÓN.

SI $\beta = 1.0$, LA EC. 3.4.6 SE TRANSFORMA EN

$$\frac{P_u}{P_c} + \frac{M_{uox}^*}{M_m} + \frac{M_{uoy}^*}{F_R M_{py}} \leq 1.0$$

ESTA EC. SE UTILIZA CUANDO NO SE CONOCE β Y PUEDE USARSE, DE MANERA CONSERVADORA, AUNQUE SE CONOZCA.

b) SECCIONES TIPO 3 Y 4. DEBE CUMPLIRSE LA CONDICIÓN

$$\frac{P_u}{R_c} + \frac{M_{uox}^*}{M_{Ry}} + \frac{M_{uoy}^*}{M_{Rx}} \leq 1.0$$

M_{Rx} y M_{Ry} SE CALCULAN COMO SE INDICA EN EL CAP. DE FLEXIÓN.

DETERMINACIÓN DE LOS MOMENTOS DE DISEÑO M_{uox} , M_{uoy} , M_{uox}^* Y M_{uoy}^* .

a) ANÁLISIS DE PRIMER ORDEN. SI LAS FUERZAS NORMALES Y LOS MOMENTOS SE OBTIENEN POR MEDIO DE UN ANÁLISIS CONVENCIONAL DE PRIMER ORDEN, LOS MOMENTOS DE DISEÑO SE DETERMINAN COMO SIGUE:

$$M_{u0} = M_{T1} + B_2 M_{TP} \quad (3.4.11)$$

$$M_{u0}^* = B_1 M_{T1} + B_2 M_{TP} \quad (3.4.12)$$

EN LA EC. 3.4.11, M_{T1} ES EL MOMENTO DE DISEÑO EN EL EXTREMO EN CONSIDERACIÓN DE LA COLUMNA, Y EN LA EC. 3.4.12 ES UNO DE LOS MOMENTOS DE DISEÑO QUE ACTÚAN EN LOS DOS EXTREMOS, PRODUCIDOS, EN AMBOS CASOS, POR CARGAS QUE NO OCASIONAN DESPLAZAMIENTOS LATERALES APRECIABLES DE ESOS EXTREMOS. ~~XXXXXXXXXXXX~~

LOS MOMENTOS M_{TP} SON ANÁLOGOS A LOS M_{T1} , PERO PRODUCIDOS POR CARGAS QUE SÍ OCASIONAN DESPLAZAMIENTOS LATERALES APRECIABLES DE LOS EXTREMOS DE LA COLUMNA.

EN MARCOS QUE FORMAN PARTE DE ESTRUCTURAS REGULARES PROVISTAS DE CONTRAVIENTOS O MUROS DE CORTANTE DE RIGIDEZ ADECUADA PARA QUE PUEDAN DESPRECIARSE LOS EFECTOS DE ESBELTEZ DEBIDOS A DESPLAZAMIENTOS LATERALES DE ENTREPISO DESAPARECE EL TÉRMINO $B_2 M_{TP}$ DE LAS ECS. 3.4.11 Y 3.4.12, Y LOS MOMENTOS M_{T1} SON LA SUMA DE LOS PRODUCIDOS POR LAS CARGAS VERTICALES Y LAS HORIZONTALES.

B_1 Y B_2 SON FACTORES DE AMPLIFICACIÓN DE LOS MOMENTOS; SE CALCULAN CON LAS ECUACIONES SIGUIENTES: 15

$$B_1 = \frac{C}{1 - \frac{P_u}{F_R P_E}} \geq 1.0 \quad (3.4.13)$$

$$B_2 = \frac{1}{1 - \frac{\sum P_u}{F_R (\sum P_E)}} \quad (3.4.14) \quad \text{ó} \quad B_2 = \frac{1}{1 - \frac{\sum P_u \Delta_{OH}}{F_R (\sum H)L}} \quad (3.4.15)$$

C ES UN COEFICIENTE QUE DEPENDE DE LA LEY DE VARIACIÓN DEL MOMENTO FLEXIONANTE. TIENE ALGUNO DE LOS VALORES SIGUIENTES, APLICABLES A COLUMNAS QUE FORMAN PARTE DE MARCOS CON O SIN CONTRAVIENTO:

PARA TRAMOS QUE SE FLEXIONAN EN CURVATURA SIMPLE, $0.6 + 0.4 \frac{M_1}{M_2}$

PARA TRAMOS EN CURVATURA DOBLE, $0.6 - 0.4 \frac{M_1}{M_2}$ ~~#####~~

M_1 Y M_2 SON EL MENOR Y EL MAYOR DE LOS MOMENTOS EN LOS EXTREMOS DEL TRAMO DE BARRA. EN ESTUDIO, TOMADOS EN VALOR ABSOLUTO.

EN LA EC. 3.4.13 SE CALCULA LA CARGA P_E CON UN COEFICIENTE K QUE CORRESPONDE A COLUMNAS CUYOS EXTREMOS NO SE DESPLAZAN LATERALMENTE, MIENTRAS QUE EN LAS ECS. 3.4.14 Y 3.4.15 SE USA UN COEFICIENTE K EN EL QUE SE TIENE EN CUENTA QUE LA COLUMNA FORMA PARTE DE UN MARCO EN EL QUE LOS DESPLAZAMIENTOS LATERALES DE ENTREPISO SON SIGNIFICATIVOS.

$$P_E = A_t \pi^2 E / (KL/r)^2$$

$\sum P_E$ = SUMA DE CARGAS CRÍTICAS DE PANDEO ELÁSTICO DE TODAS LAS COLUMNAS DEL ENTREPISO EN ESTUDIO, EN EL PLANO QUE SE ESTÉ ANALIZANDO.

$\sum P_u$ = SUMA DE FUERZAS AXIALES DE DISEÑO EN TODAS LAS COLUMNAS DEL ENTREPISO EN CONSIDERACIÓN.

Δ_{OH} = DESPLAZAMIENTO HORIZONTAL RELATIVO DE LOS NIVELES QUE LIMITAN EL ENTREPISO EN CONSIDERACIÓN

ΣH = SUMA DE TODAS LAS FUERZAS HORIZONTALES DE DISEÑO QUE OBRAN ENCIMA DEL ENTREPISO EN CONSIDERACIÓN (FUERZA CORTANTE DE DISEÑO EN EL ENTREPISO).

L = ALTURA DEL ENTREPISO.

ENTREPISOS CUYO DISEÑO QUEDA REGIDO POR CARGAS VERTICALES. EN COLUMNAS QUE FORMAN PARTE DE ENTREPISOS CUYO DISEÑO QUEDA REGIDO POR CARGAS VERTICALES ÚNICAMENTE, LO QUE ES FRECUENTE EN EDIFICIOS DE BAJA ALTURA Y EN LOS ENTREPISOS SUPERIORES DE EDIFICIOS ALTOS, LOS MOMENTOS M_{TP} SUELEN SER NULOS EN LA CONDICIÓN DE CARGA DE DISEÑO.

SI SE DEMUESTRA QUE EL PANDEO DE CONJUNTO DE UN ENTREPISO, CON DESPLAZAMIENTOS LATERALES RELATIVOS DE LOS NIVELES QUE LO LIMITAN, NO ES CRÍTICO, B_2 VALE CERO Y P_E SE CALCULA CON $K \leq 1.0$. SI NO SE ESTUDIA EL PANDEO DE CONJUNTO, O SI ÉSTE ES CRÍTICO, LOS MOMENTOS DE DISEÑO VALEN

$$M_{UO} = M_{TI}, \quad M_{UO}^* = B_2 M_{TI}$$

B_2 SE CALCULA CON LA EC. 3.4.14.

SE CONSIDERARÁ QUE EL PANDEO DE CONJUNTO DE UN ENTREPISO NO ES CRÍTICO CUANDO $(P_{cr} / \Sigma P_u) \geq 2.5$. P_{cr} ES LA CARGA CRÍTICA DE DISEÑO DE PANDEO CON DESPLAZAMIENTO LATERAL DEL ENTREPISO Y ΣP_u ES LA SUMA DE LAS FUERZAS AXIALES DE DISEÑO DE TODAS LAS COLUMNAS DE DICHO ENTREPISO.

MÁS ADELANTE ~~SE DA~~ SE DA UN PROCEDIMIENTO APROXIMADO PARA CALCULAR LA CARGA CRÍTICA DE ENTREPISOS DE ESTRUCTURAS REGULARES. 17

b) ANÁLISIS DE SEGUNDO ORDEN. SI LAS FUERZAS NORMALES Y LOS MOMENTOS SE OBTIENEN POR MEDIO DE UN ANÁLISIS DE SEGUNDO ORDEN. SI SE DEMUESTRA QUE LOS EFECTOS DE 2º ORDEN NO SON SIGNIFICATIVOS, LOS MOMENTOS DE DISEÑO SE DETERMINAN COMO SIGUE:

$$M_{\text{D}} = M_{\text{TI}} + M_{\text{TP}} \quad (3.4.16)$$

$$M_{\text{D}}^* = B_1 (M_{\text{TI}} + M_{\text{TP}}) \quad (3.4.17)$$

TODAS LAS LÍTERAS TIENEN LOS MISMOS SIGNIFICADOS QUE EN LAS ECS. 3.4.11 Y 3.4.12, PERO P_E SE CALCULA CON $K \leq 1.0$.

DETERMINACIÓN DE CARGAS CRÍTICAS. LA CARGA CRÍTICA DE ESTRUCTURAS REGULARES PUEDE DETERMINARSE CON MÉTODOS RACIONALES QUE TENGAN EN CUENTA, CUANDO SEAN SIGNIFICATIVOS, LOS EFECTOS DE LA PLASTIFICACIÓN PARCIAL QUE SUELE PRECEDER A LA FALLA POR PANDEO.

LA CARGA CRÍTICA DE UN ENTREPISO PUEDE EVALUARSE CON LAS FÓRMULAS APROXIMADAS SIGUIENTES:

$$\text{SI } P_{\text{cr}} \leq \Sigma P_y / 2, \quad P_{\text{cr}} = F_R RL / 1.2 \quad (3.4.18)$$

$$\text{SI } P_{\text{cr}} > \frac{\Sigma P_y}{2}, \quad P_{\text{cr}} = F_R \Sigma P_y \left(1 - \frac{0.3 \Sigma P_y}{2L} \right) \quad (3.4.19)$$

P_{cr} ES LA CARGA CRÍTICA DE DISEÑO DE PANDEO CON DESPLAZAMIENTO LATERAL DEL ENTREPISO, $\Sigma P_y = \Sigma A_c F_y$ ES LA SUMA DE FUERZAS AXIALES QUE, OBRANDO POR SÍ SOLAS, OCASIONARÍAN LA PLASTIFICACIÓN DE TODAS LAS COLUMNAS DEL ENTREPISO, R ES LA RIGIDEZ DEL ENTREPISO, DETERMINADA POR MEDIO DE UN ANÁLISIS ELÁSTICO DE PRIMER ORDEN, Y L ES LA ALTURA DEL ENTREPISO. $F_R = 0.9$.

EN EL CÁLCULO DE R DEBE INCLUIRSE TODOS LOS MARCOS, MUROS Y CONTRAVIENTOS QUE FORMAN PARTE DEL ENTREPISO Y CONTRIBUYEN A SU RIGIDEZ LATERAL EN LA DIRECCIÓN ANALIZADA, Y ΣP_y CORRESPONDE A TODAS LAS COLUMNAS CONSIDERADAS AL CALCULAR R .

ANÁLISIS DE SEGUNDO ORDEN. EL ANÁLISIS DE SEGUNDO ORDEN DE ESTRUCTURAS REGULARES DEBE HACERSE UTILIZANDO MÉTODOS RACIONALES QUE TENGAN EN CUENTA, POR LO MENOS, LOS EFECTOS QUE SE INDICARON ARRIBA.

UNA MANERA APROXIMADA DE CALCULAR LOS MOMENTOS DE SEGUNDO ORDEN EN LOS EXTREMOS DE COLUMNAS CUYO DISEÑO QUEDE REGIDO POR LA COMBINACIÓN DE

CARGAS VERTICALES Y HORIZONTALES CONSISTE EN EVALUAR POR SEPARADO LOS MOMENTOS PRODUCIDOS POR LOS DOS TIPOS DE CARGAS, UTILIZANDO MÉTODOS CONVENCIONALES DE ANÁLISIS DE PRIMER ORDEN, Y EN MULTIPLICAR LOS MOMENTOS OCASIONADOS POR LAS CARGAS HORIZONTALES POR EL FACTOR DE AMPLIFICACIÓN

$$FA = 1 + \frac{W_u/L}{(R/Q) - 1.2 W_u/L} \quad (3.4.20)$$

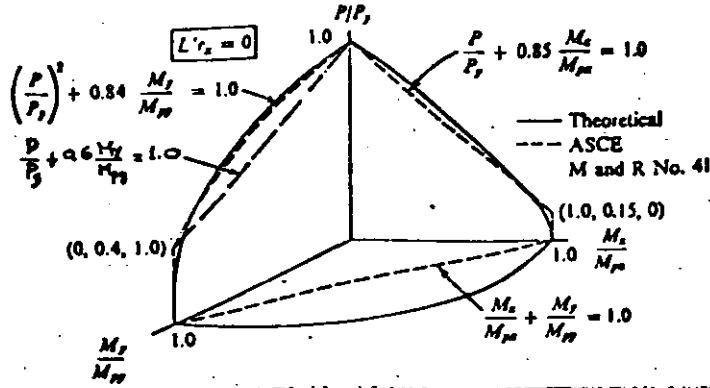
LOS MOMENTOS FINALES DE 2º ORDEN SE OBTIENEN SUMANDO LOS DE CARGA VERTICAL DE 1º ORDEN CON LOS PRODUCIDOS POR CARGAS HORIZONTALES AMPLIFICADOS.

... W_u ES LA SUMA DE LAS CARGAS DE DISEÑO MUERTAS Y VIVAS (CARGAS NOMINALES MULTIPLICADAS POR LOS FACTORES DE CARGA CORRESPONDIENTES A LA COMBINACIÓN DE ACCIONES EN ESTUDIO), ACUMULADAS DESDE EL EXTREMO SUPERIOR DE LA ESTRUCTURA HASTA EL ENTREPISO CONSIDERADO. Q ES EL FACTOR DE COMPORTAMIENTO SÍSMICO (EN DISEÑO POR VIENTO SE TOMA $Q = 1.0$).

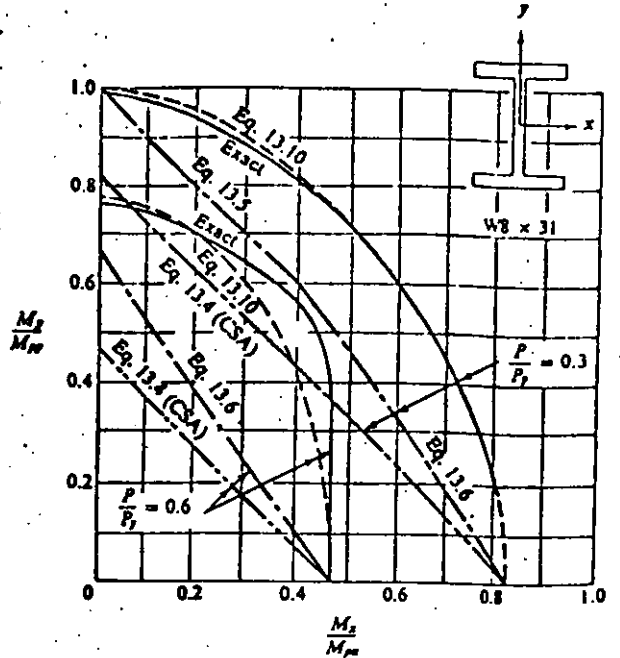
TODAS LAS FUERZAS INTERNAS Y, EN ESPECIAL, LOS MOMENTOS EN LAS TRABES, DEBEN INCREMENTARSE DE MANERA QUE SE SATISFAGA EL EQUILIBRIO CON LOS MOMENTOS AMPLIFICADOS DE LAS COLUMNAS.

DIMENSIONAMIENTO DE COLUMNAS EN ESTRUCTURAS IRREGULARES. SE CONSERVAN BÁSICAMENTE LAS FÓRMULAS DE LAS NTC 76, TANTO PARA REVISAR LAS SECCIONES EXTREMAS COMO PARA LA REVISIÓN DE LA COLUMNA COMPLETA. ESTO SE DEBE A QUE SE SABE QUE LOS MÉTODOS RECOMENDADOS PARA EL DISEÑO DE COLUMNAS QUE FORMAN PARTE DE ESTRUCTURAS REGULARES NO SON APLICABLES EN ALGUNOS CASOS, Y EN OTROS NO SE HA DEMOSTRADO QUE LO SEAN.

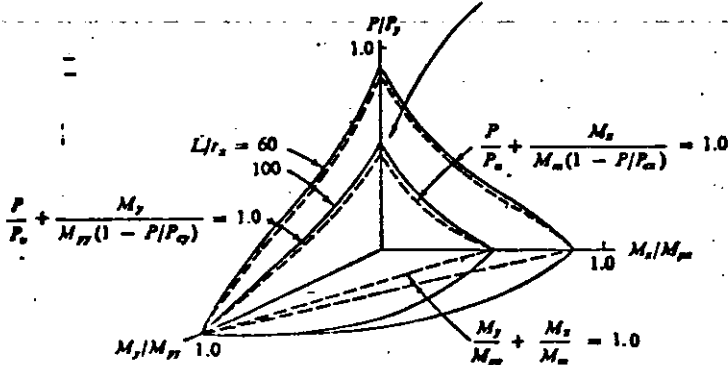
... ADENÁS, NO SE CONOCEN LOS VALORES DE LOS EXPONENTES α Y β PARA SECCIONES QUE NO SEAN H O EN CAJÓN.



SUPERFICIE DE INTERACCIÓN PARA COLUMNAS CORTAS DE SECCIÓN H Y ECUACIONES APROXIMADAS.

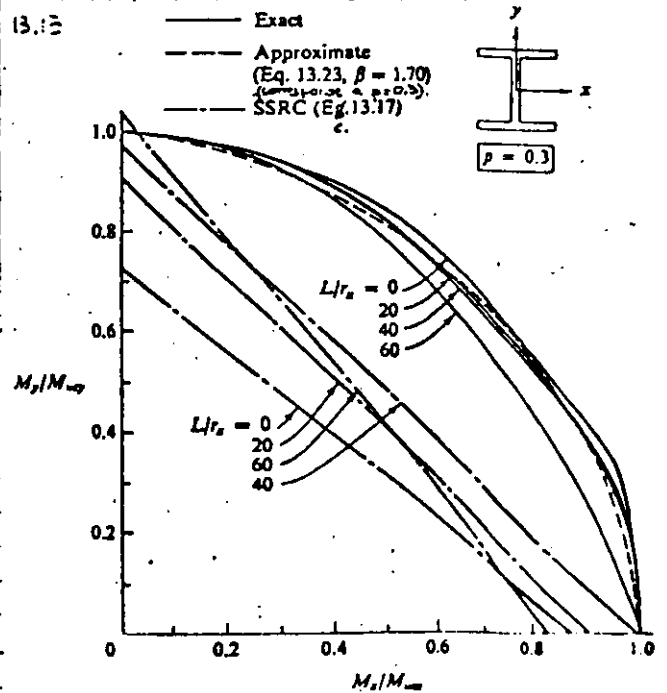


$$\frac{P}{P_c} + \frac{M_x}{M_{px}(1 - P/P_c)} + \frac{M_y}{M_{py}(1 - P/P_c)} = 1.0$$

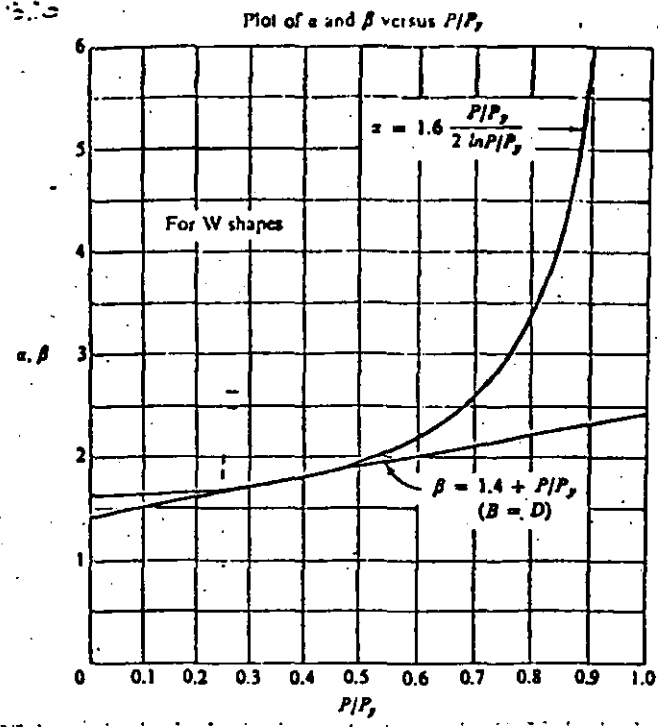


SUPERFICIES DE INTERACCIÓN PARA COLUMNAS LARGAS DE SECCIÓN H Y ECUACIONES APROX.

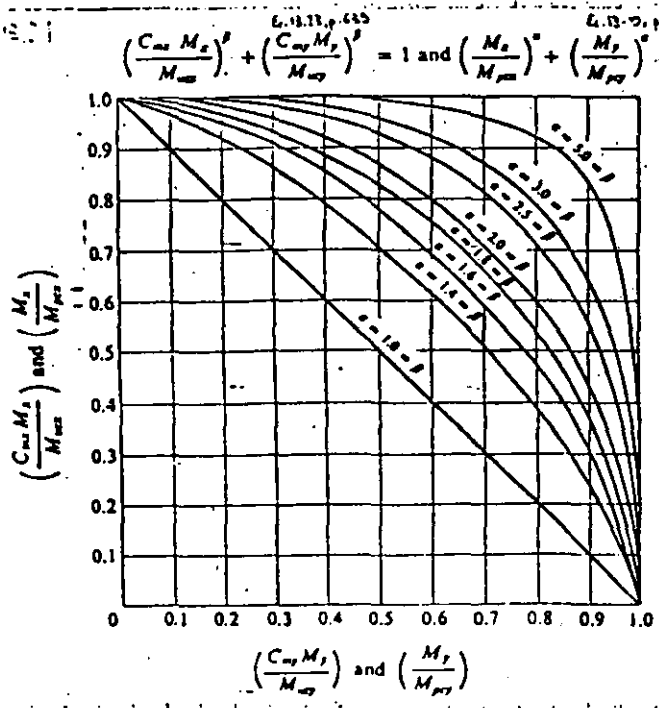
CURVAS DE INTERACCIÓN PARA COLUMNAS DE LONGITUD NULA.



COMPARACIÓN DE CURVAS DE INTERACCIÓN PARA COLUMNAS LARGAS



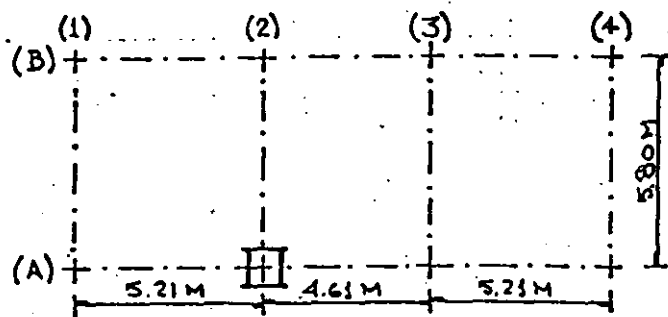
COEFICIENTES
 α y β (Ecs. 3.4.1
y 3.4.6)



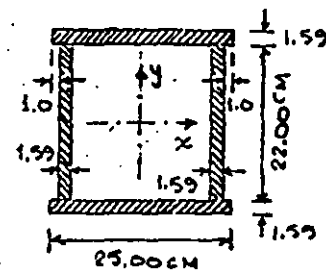
REPRESENTACION
GRAFICA DE LAS
ECS. 3.4.3 y 3.4.6.

EJEMPLO

EN LA FIG. SE MUESTRAN LA PLANTA Y ELEVACIONES DE UN EDIFICIO DE OCHO NIVELES, DISEÑADO CON RDF 66 Y CONSTRUIDO EN LA ZONA DE ALTA COMPRESIBILIDAD. EN ESTE EJEMPLO SE VA A REVISAR EL TRABAJO DEL NIVEL 3 AL 4 DE LA COLUMNA A2, UTILIZANDO EL RDF 87 PARA DETERMINAR LAS FUERZAS SÍSMICAS Y SUS NTC. PARA DISEÑO DE ESTRUCTURAS DE ACERO. LOS PERFILES QUE SE MUESTRAN SON LOS DEL EDIFICIO REAL; EL ACERO ES A36 ($F_y = 2530 \text{ kg/cm}^2$). LOS ELEMENTOS MECÁNICOS MOSTRADOS SON NOMINALES. LAS FUERZAS SÍSMICAS SE DETERMINARON CON EL MÉTODO ESTÁTICO Y LOS MOMENTOS Y FUERZAS NORMALES EN LA COLUMNA SE OBTUVIERON CON LOS MÉTODOS DEL PORTAL Y DEL VOLADIZO, RESPECTIVAMENTE.



PLANTA, EJES Y ORIENTACIÓN COLUMNAS



- $A = 149.5 \text{ cm}^2$
- $I_x = 13899 \text{ cm}^4$
- $Z_x = 1322 \text{ cm}^3$
- $S_x = 1104 \text{ cm}^3$
- $r_x = 9.6 \text{ cm}$
- $I_y = 12173 \text{ cm}^4$
- $Z_y = 1246 \text{ cm}^3$
- $S_y = 974 \text{ cm}^3$
- $r_y = 9.0 \text{ cm}$

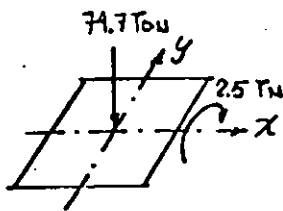
COLUMNA. DIMENSIONES Y PROPS. GEOMÉTRICAS

	$I_{cs} = 10859 \text{ cm}^4$ $I/L = 38.8 \text{ cm}^3$ $I = 7436 \text{ cm}^4$	$I_{cs} = 9911 \text{ cm}^4$ $I/L = 35.4 \text{ cm}^3$ $I = 6073 \text{ cm}^4$; $I/L = 13.2 \text{ cm}^3$
$G = 6.9$	$I/L = 12.8 \text{ cm}^3$ $I_x = 13899 \text{ cm}^4$ $I/L = 49.6 \text{ cm}^3$ $I = 7436 \text{ cm}^4$	$G = 2.9$ $I_y = 12173 \text{ cm}^4$; $I/L = 43.5 \text{ cm}^3$ $I = 6073 \text{ cm}^4$; $I/L = 13.2 \text{ cm}^3$
$K_x = \begin{pmatrix} 2.6 \\ 0.99 \end{pmatrix}$	$I/L = 12.8 \text{ cm}^3$ $I_{cs} = 13899 \text{ cm}^4$ $I/L = 49.6 \text{ cm}^3$	$K_y = \begin{pmatrix} 1.84 \\ 0.89 \end{pmatrix}$ $I_y = 12173 \text{ cm}^4$; $I/L = 43.5 \text{ cm}^3$ $I = 6073 \text{ cm}^4$; $I/L = 13.2 \text{ cm}^3$
$G = 7.8$	$I/L = 12.8 \text{ cm}^3$ $I_{cs} = 13899 \text{ cm}^4$ $I/L = 49.6 \text{ cm}^3$	$G = 3.2$ $I_{cs} = 12173 \text{ cm}^4$ $I/L = 43.5 \text{ cm}^3$
	5.80 M	5.21 M
	<p>MARCO 2</p>	<p>MARCO A</p>

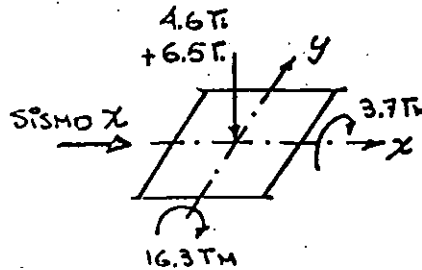
EN LOS I DE LAS VIGAS NO SE HA INCLUIDO NINGÚN EFECTO DE LAS LOSAS. LOS COEFICIENTES I/L DE VIGAS Y COL. SE HAN CALCULADO CON DIST. ENTRE EJES. SE HAN DETERMINADO, CON LOS NOMOGRAMAS DEL AISC, VALORES DE K_x Y K_y PARA DESPLAZAMIENTOS LATERALES DE ENTREPISO PERMITIDOS E IMPEDIDOS.

ELEMENTOS MECÁNICOS EN LA COLUMNA. CORRESPONDEN A CARGAS DE TRABAJO.

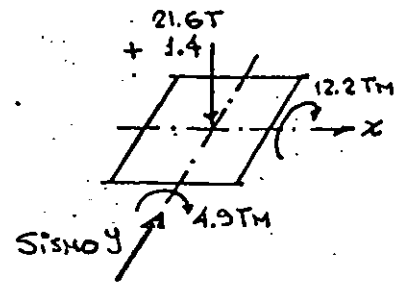
CARGA VERTICAL



SISMO X + 0.30 SISMO Y



SISMO Y + 0.30 SISMO X



TODOS LOS MOMENTOS, POR CARGA VERTICAL Y POR SISMO, SON IGUALES EN LOS DOS EXTREMOS DE LA COLUMNA, Y LA FLEXIONAN EN CURVATURA DOBLE. LA CARGA VERTICAL NO OCASIONA DESPLAZAMIENTOS LINEALES RELATIVOS DE LOS EXTREMOS DE LA COLUMNA, Y EL SISMO SÍ.

CLASIFICACIÓN DE LA SECCIÓN.

LA MAYOR RELACIÓN ANCHO/GRUESO DE LAS PLACAS QUE COMPUEN LA SECCIÓN ES $22.0/1.59 = 13.8$

PATINES. SUPONIENDO QUE TRABAJAN EN COMPRESIÓN PURA, EL LÍMITE PARA SECCIONES TIPO 1 O 2 ES $(h/t)_{\text{MÁX}} = 1600/\sqrt{F_y} = 31.8 > 13.8$.

ALMAS. $P_y = A F_y = 149.5 \times 2.53 = 378.2 \text{ TON}$

P_u (PARA C.VERT. + SISMO X + 0.30 SISMO Y) = $(74.7 + 11.1) \cdot 1.1 = 94.4 \text{ TON}$

$P_u/P_y = 94.4/378.2 = 0.250 < 0.28$

\therefore PARA SEC. TIPO 1, $(h/t)_{\text{MÁX}} = \frac{3500}{\sqrt{F_y}} (1 - 1.4 \times 0.25) = 45.3 > 13.8$

LA SECCIÓN ES TIPO 1.

DETERMINACIÓN DE SI EL PANDEO LATERAL POR FLEXOTORSIÓN ES CRÍTICO.

$P_y = 378.2 \text{ TON}$. $M_{P_x} = Z_x F_y = 1322 \times 2530 \times 10^5 = 33.4 \text{ TM}$; $M_{P_y} = Z_y F_y = 31.5 \text{ TM}$

$$L_{P_x} = \frac{352000 + 211000 (M_{ix}/M_{P_x})}{F_y} \quad \Gamma_x = \frac{352000 + 211000 (6.8/33.4)}{2530} \times 9.6 = 1499 \text{ CM} >$$

$$> 211000 \times 9.6 / 2530 = 800.6 \text{ CM}$$

ANÁLOGAMENTE SE OBTIENE $L_{P_y} = 750.6 \text{ CM}$

LA LONGITUD MENOR, 750.6 CM, ES MUCHO MAYOR QUE LA ALTURA DE LA COLUMNA, 2.50 M, DE MANERA QUE EL PANDEO LATERAL NO ES CRÍTICO, Y LA COLUMNA PODRÍA DISEÑARSE CON LA T. PLÁSTICA (PARA SABER QUE EL PANDEO LATERAL NO ES CRÍTICO BASTA CON DEMOSTRAR QUE LA LONGITUD DE LA COLUMNA ES MENOR QUE L_u).

SOLICITACIONES DE DISEÑO. SE DEVISARÁ LA CONDICIÓN DE CARGA VERTICAL.
SISMO X + 0.30 SISMO Y. $F_c = 1.1$.

$$P_u = (74.7 + 11.1) \cdot 1.1 = 94.4 \text{ TON}; \quad M_x = (2.5 + 3.7) \cdot 1.1 = 6.8 \text{ TM}; \quad M_y = 16.3 \cdot 1.1 = 17.9 \text{ TM}$$

MOMENTOS DE DISEÑO. LOS ELEMENTOS MECÁNICOS SE OBTUVIERON CON UN ANÁLISIS ELÁSTICO DE PRIMER ORDEN.

$C_x = C_y = 0.6 - 0.4 M_1/M_2 = 0.6 - 0.4 = 0.2$ LOS MOMENTOS EN LOS DOS EXTREMOS, TANTO ALREDEDOR DE X COMO DE Y, SON IGUALES EN VALOR ABSOLUTO Y PRODUCEN CURVATURA DOBLE.

$$P_{EX} = A_c \pi^2 E / (KL/r)_x^2 = (149.5 \pi^2 \times 2040 \times 10^3 / 76^2) 10^3 = 521.1 \text{ TON}; \quad P_{EY} = 926.5 \text{ TON}$$

EL EDIFICIO TIENE OCHO COLUMNAS EN PLANTA; EN EL ENTREPISO 2-3 TODAS SON IGUALES $\therefore \sum P_{EX} = 521.1 \times 8 = 4168.8 \text{ TON}$, $\sum P_{EY} = 7412.0 \text{ TON}$

USANDO UN MÉTODO APROXIMADO SE OBTUVO:

$$\text{MARCO A: } R = 686.6 \text{ TON/M}, \quad \Delta_{OH} = V_{SISM.} / R = 38.9 \text{ TON} / 686.6 \text{ T/M} = 0.0567 \text{ M} = 5.67 \text{ CM}$$

$$\text{MARCO 2: } R = 353.5 \text{ TON/M}, \quad \Delta_{OH} = 5.50 \text{ CM} \quad (3.50 / 280 = 0.020)$$

FACTORES DE AMPLIFICACIÓN.

PARA CALCULAR LOS FACTORES B_1 SE UTILIZAN ESBELTECES CORRESPONDIENTES A MARCOS 'CONTRAVENTADOS'.

$(KL/r)_x = 0.95 \times 280 / 9.6 = 28$, $(KL/r)_y = 0.89 \times 280 / 9.0 = 28$ (RESULTARON IGUALES POR CASUALIDAD) $\therefore P_{EX} = P_{EY} = (149.5 \pi^2 \times 2040 \times 10^3 / 28^2) 10^3 = 3839 \text{ TON}$.

a) EN EL PLANO DEL MARCO 2 (FLEXIÓN ALREDEDOR DEL EJE X DE LAS COL.)

$$B_{1x} = \frac{C_x}{1 - P_u / (F_c P_{EX})} = \frac{0.2}{1 - 94.4 / (0.9 \times 3839)} = 0.206 < 1.0 \quad \therefore B_{1x} = 1.0$$

$$B_{2x} = \frac{1}{1 - \sum P_u / F_c \sum P_{EX}} = \frac{1}{1 - 498.8 / 0.9 \times 4168.8} = 1.151$$

LOS DOS VALORES DE B_{2x} DEBEN SER, TEÓRICAMENTE, IGUALES; PARA FINES PRÁCTICOS

$$B_{2x} = \frac{1}{1 - \frac{\sum P_u \Delta_{OH}}{F_c (\sum H) L}} = \frac{1}{1 - \frac{492.8 \times 5.50}{0.9 \times 77.8 \times 280}} = 1.160$$

EN ESTE CASO LO SON.

OBSÉRVESE QUE B_1 DEPENDE DE LAS CARACTERÍSTICAS DE LA COLUMNA INDIVIDUAL Y DE LA CARGA QUE OBRA SOBRE ELLA, MIENTRAS QUE B_2 ES FUNCIÓN DE LAS PROPIEDADES DE TODAS LAS COLUMNAS DEL ENTREPISO Y DE LAS FUERZAS TOTALES QUE ACTÚAN EN ÉL.

b) EN EL PLANO DEL MARCO A (FLEXIÓN ALREDEDOR DEL EJE Y DE LAS COL)

$$B_{1y} = \frac{0.2}{1 - 94.4 / (0.9 \times 3839)} = 0.206 < 1.0 \therefore B_{1y} = 1.00$$

$$B_{2y} = \frac{1}{1 - \frac{492.8}{0.9 \times 7412}} = 1.080 ; B_{2y} = \frac{1}{1 - \frac{492.8 \times 5.67}{0.9 \times 77.8 \times 280}} = 1.166$$

LA DIFERENCIA ENTRE LOS DOS VALORES DE B_2 ES UN POCO MAYOR QUE EN EL MARCO 2.

$$M_{uox} = M_{Tix} + B_{2x} M_{TPx} = 2.5 \times 1.1 + 1.16 \times 2.7 \times 1.1 = 7.5 \text{ Ton}\cdot\text{m}$$

$$M_{uoy} = M_{Tiy} + B_{2y} M_{TPy} = 0 + 1.166 \times 16.3 \times 1.1 = 20.9 \text{ Ton}\cdot\text{m}$$

$$M_{uox}^* = B_{1x} M_{Tix} + B_{2x} M_{TPx} = 7.5 \text{ TM} ; M_{uoy}^* = B_{1y} M_{Tiy} + B_{2y} M_{TPy} = 20.9 \text{ TM}$$

EN ESTE PROBLEMA, COMO $B_{1x} = B_{1y} = 1.00$, Y DADAS LAS CONDICIONES DE CARGA, LOS MOMENTOS M_{u0}^* SON IGUALES A LOS M_{u0} .

REVISIÓN DE LAS SECCIONES EXTREMAS. LAS DOS SE ENCUENTRAN EN LAS MISMAS CONDICIONES.

$$M_{pcx} = 1.18 F_R M_{px} \left(1 - \frac{P_u}{F_R P_y}\right) = 1.18 \times 0.9 \times 33.4 \left(1 - \frac{94.4}{0.9 \times 378.2}\right) = 25.6 \text{ TM} < F_R M_{px} = 30.1 \text{ TM}$$

$$M_{pcy} = 1.67 F_R M_{py} \left[1 - \frac{P_u}{F_R P_y}\right] = 1.67 \times 0.9 \times 31.5 \left(1 - \frac{94.4}{0.9 \times 378.2}\right) = 34.2 \text{ TM} > F_R M_{py} = 28.4 \text{ TM}$$

$\therefore M_{pcy} = 28.4 \text{ TM}$

$$\left(\frac{M_{uox}}{M_{pcx}}\right)^\alpha + \left(\frac{M_{uoy}}{M_{pcy}}\right)^\alpha = \left(\frac{7.5}{25.6}\right)^{1.81} + \left(\frac{20.9}{28.4}\right)^{1.81} = 0.108 + 0.574 = 0.682 < 1.00$$

$$p = P_u / F_R P_y = 94.4 / 0.9 \times 378.2 = 0.277, \alpha = 1.70 - p / 2L_p = 1.70 - 0.277 / 2L_p \times 0.277 = 1.81$$

CONSERVADORAMENTE, PUEDE UTILIZARSE LA ECUACIÓN

$$\frac{P_u}{F_R P_y} + \frac{0.85 M_{uox}}{F_R M_{px}} + \frac{0.60 M_{uoy}}{F_R M_{py}} = 0.277 + \frac{0.85 \times 7.5}{0.9 \times 33.4} + \frac{0.60 \times 20.9}{0.9 \times 31.5} = 0.931 < 1.000$$

REVISIÓN DE LA COLUMNA CONCRETA

$$\beta = 1.3 + 1000 p / (4r)^2 = 1.3 + 1000 \times 0.277 / 31^2 = 1.39$$

$$\lambda = \left(\frac{KL}{r}\right)_{\max} \sqrt{\frac{F_y}{\pi^2 E}} = 76 \sqrt{\frac{2530}{2040 \times 10^3 \pi^2}} = 0.852 ; n = 1.4$$

$$R_c = \frac{F_y}{(1 + \lambda^{2n} - 0.15^{2n})^{1/n}} A_t F_R = \frac{149.5 \times 0.9 \times 2530 \times 10^3}{(1 + 0.852^{2.8} - 0.15^{2.8})^{1/1.4}} = 239.8 \text{ Ton} <$$

$$< F_y A_t F_R = 2530 \times 149.5 \times 0.9 \times 10^3 = 340.4 \text{ Ton}$$

$$M_{uox} = M_m \left(1 - \frac{P_u}{P_c}\right) = 0.9 \times 33.4 \left(1 - \frac{94.4}{340.4}\right) = 21.7 \text{ TM}$$

COMO EL PANDEO LATERAL NO ES CRITICO, $M_m = 0.9 M_{px}$.

$$M_{uoy} = F_y M_{py} \left(1 - \frac{P_u}{P_c}\right) = 0.9 \times 31.4 \left(1 - \frac{94.4}{340.4}\right) = 20.5 \text{ TM}$$

$$\left(\frac{M_{uox}^*}{M_{uox}}\right)^\beta + \left(\frac{M_{uoy}^*}{M_{uoy}}\right)^\beta = \left(\frac{7.5}{21.7}\right)^{1.59} + \left(\frac{20.9}{20.5}\right)^{1.59} = 0.185 + 1.031 = 1.216 > 1.0$$

CONSERVADORAMENTE, PUEDE UTILIZARSE LA ECUACION

$$\frac{P_u}{P_c} + \frac{M_{uox}^*}{M_m} + \frac{M_{uoy}^*}{F_y M_{py}} = \frac{94.4}{340.4} + \frac{7.5}{0.9 \times 33.4} + \frac{20.9}{0.9 \times 31.5} =$$

$$= 0.277 + 0.250 + 0.737 = 1.264 > 1.0$$

LA RESISTENCIA EN LOS EXTREMOS ES ADECUADA, PERO LA COLUMNA ESTÁ ESCASA POR INESTABILIDAD DE CONJUNTO DEL ENTREPISO.

CONEXIONES RIGIDAS ENTRE VIGAS Y COLUMNAS

SE DA EL NOMBRE DE CONEXIÓN AL CONJUNTO DE ELEMENTOS QUE UNEN EL MIEMBRO A LA JUNTA: PLACAS O ÁNGULOS POR PATINES O ALMA, SOLDADURAS, REMACHES, TORNILLOS.

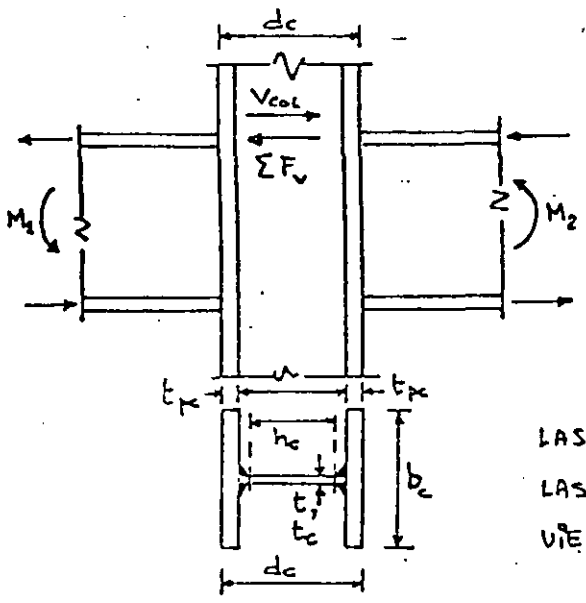
JUNTA ES LA ZONA COMPLETA DE INTERSECCIÓN DE LOS MIEMBROS; EN LA MAYORÍA DE LOS CASOS, ES LA PARTE DE LA COLUMNA, INCLUYENDO ATIESADORES HORIZONTALES O PLACAS ADOSDADAS A SU ALMA, QUE QUEDA COMPRENDIDA ENTRE LOS PLANOS HORIZONTALES QUE PASAN POR LOS BORDES SUPERIOR E INFERIOR DE LA VIGA DE MAYOR PEDALTE.

RESISTENCIA DE LA CONEXIÓN, LA RESISTENCIA DE LA CONEXIÓN DE CADA VIGA DEBE SER SUFICIENTE PARA DESARROLLAR LA MEJOR DE LAS CANTIDADES SIGUIENTES:

- a) LA RESISTENCIA EN FLEXIÓN DE LA VIGA.
- b) EL MOMENTO DEQUERIDO PARA INDUCIR EN EL TABLEDO DEL ALMA DE LA COLUMNA UNA FUERZA CORTANTE IGUAL A $0.8 F_y d_c t_c$, DONDE F_y ES EL ESF. DE FUERZA DEL ACERO DE LA COLUMNA, d_c SU PEDALTE TOTAL Y t_c EL GUESO DEL ALMA.

SE DAN ENSEGUIDA ALGUNAS MANERAS ADECUADAS PARA DESARROLLAR LA RESISTENCIA EN FLEXIÓN DE LA VIGA.

REVISIÓN DEL TABLEDO DE ALMA DE LA COLUMNA. CONVIENE HACER ESTA REVISIÓN ANTES DE DETERMINAR SI SE NECESITAN ATIESADORES HORIZONTALES, PUES SI EL ALMA REQUIERE REFUERZO ÉSTE INFLUYE EN LA POSIBILIDAD DE QUE HAGAN FALTA LOS ATIESADORES.



a) LA RESISTENCIA AL CORTANTE DE LA JUNTA, CALCULADA CON LA EC. 5.8.4, DEBE SER SUFICIENTE PARA RESISTIR LAS FUERZAS CORTANTES HORIZONTALES CORRESPONDIENTES A LOS MOMENTOS FLEXIONANTES EN LOS EXTREMOS DE LAS VIGAS PRODUCIDOS POR LAS CARGAS VERTICALES DE DISEÑO MÁS 1.7 VECES LAS FUERZAS SÍSMICAS, O 1.3 VECES LAS FUERZAS DE VIENTO, AMBAS DE DISEÑO.

CUANDO LA COLUMNA RECIBE VIGAS EN LOS DOS PATINES, LOS MOMENTOS EN LOS EXTREMOS DE LAS VIGAS SE TOMAN CON LOS SENTIDOS QUE OCASIONAN LA FUERZA CORTANTE HORIZONTAL MÁXIMA EN LA JUNTA.

LAS FUERZAS QUE APLICAN LOS PATINES DE LAS VIGAS NO SE TOMARÁN NUNCA MAYORES QUE EL PRODUCTO DEL ÁREA DEL PATÍN POR 1.25 VECES EL ESFUERZO DE FLUENCIA DEL MATERIAL CON EL QUE ESTÁ HECHO.

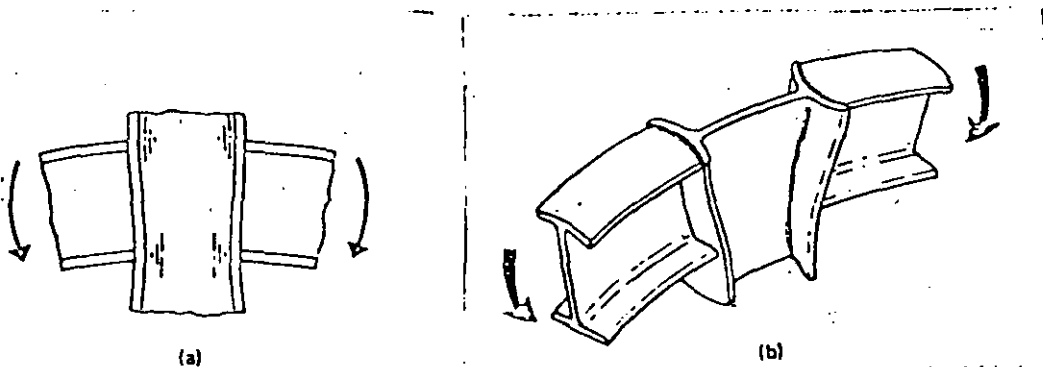
$$V = 0.55 F_{yc} d_c t \left(1 + \frac{3b_e t^2}{d_v d_c t} \right) \quad (5.8.4)$$

LAS LITERALES QUE APARECEN EN ESTA EXPRESIÓN SE EXPLICAN EN LA FIGURA DE LA HOJA ANTERIOR.

b) EL COCIENTE DE LA SOHA DEL PEDALTE MÁS EL ANCHO DEL TABLEDO DE ALHA EN LA JUNTA DIVIDIDA ENTRE EL GRUESO DEL ALHA NO DEBE EXCEDER DE 90. EN ESTE CÁLCULO, EL GRUESO NO DEBE INCLUIR LAS PLACAS ADOADAS AL ALHA DE LA COLUMNA EXCEPTO CUANDO ESTÉN LIGADAS ADECUADAMENTE A ELLA POR MEDIO DE SOLDADURAS DE TAPÓN.

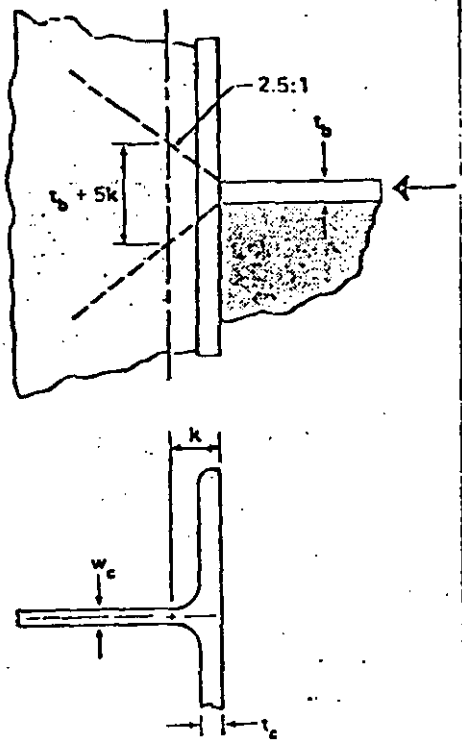
c) LAS PLACAS ADOADAS AL ALHA PARA REDUCIR LOS ESFUERZOS CORTANTES HORIZONTALES O LA RELACIÓN INDICADA EN b) NO DEBEN SEPARARSE DEL ALHA DE LA COLUMNA MÁS DE 1.5 MH, Y SE SOLDARÁN EN TODO SU ANCHO, EN LOS BORDES SUPERIOR E INFERIOR, CON SOLDADURA DE FILETE DE 5 MH O MÁS. ADEMÁS, SE SOLDARÁN A TOPE A LOS PATINES DE LA COLUMNA, CON PENETRACIÓN COMPLETA, O CON SOLDADURAS DE FILETE CAPACES DE DESARROLLAR LA RESISTENCIA AL CORTANTE DE LAS PLACAS.

DISEÑO DE APIESADORES. EN LA FIGURA SE MUESTRAN, EN FORMA ESQUEMÁTICA, LAS POSIBLES FORMAS DE FALLA DE UNA JUNTA VIGAS-COLUMNA.



LOS OBJETIVOS QUE SE PERSIGUEN AL COLOCAR LOS ATIESADORES HORIZONTALES SON VARIOS:

2) EVITAR EL FLUJO PLÁSTICO DEL ACERO DEL ALMA DE LA COLUMNA FRENTE A CADA UNO DE LOS PATINES DE LAS VIGAS, TANTO EN TENSION COMO EN COMPRESION.



LA RESISTENCIA DE DISEÑO EN LA SECCIÓN CRÍTICA DEL ALMA DE COLUMNAS DE SECCIÓN TRANSVERSAL H EN LAS QUE ACTÚAN CARGAS CONCENTRADAS QUE PRODUCEN TENSIONES O COMPRESIONES EN ELLA ES $F_2 R_n$, DONDE $F_2 = 1.0$ Y $R_n = (t_v + 5k) F_{yc} t_c$.

P_{pv} ES LA FUERZA QUE TRANSMITE A LA COLUMNA EL PATÍN DE LA VIGA, O LA PLACA HORIZONTAL DE CONEXIÓN.

SI $P_{pv} < R_n$ NO SE NECESITAN ATIESADORES, MIENTRAS QUE SI $P_{pv} > R_n$ SÍ SE DEQUIEREN. EN ESTE CASO, LA SUMA DE LAS RESISTENCIAS DE DISEÑO DE ALMA Y ATIESADORES DEBE SER IGUAL O MAYOR QUE LA FUERZA EXTERIOR:

$$(t_v + 5k) F_{yc} t_c + A_{at} F_{yat} = P_{pv}$$

DESPEJANDO EL ÁREA DE ATIESADORES, A_{at} , SE OBTIENE

$$A_{at} = \frac{P_{pv} - (t_v + 5k) F_{yc} t_c}{F_{yat}}, \text{ QUE ES LA EC. 5.B.1.}$$

F_{yc} Y F_{yat} SON LOS ESF. DE FLUENCIA DE LA COLUMNA Y DE LOS ATIESADORES.

SI A_{at} , EC. 5.B.1, RESULTA POSITIVO, SE COLOCA UN PAR DE ATIESADORES QUE PROPORCIONEN ESA ÁREA; SI RESULTA NEGATIVO, NO SE NECESITAN ATIESADORES, DESDE EL PUNTO DE VISTA DE LA RESISTENCIA AL FLUJO PLÁSTICO DEL ALMA DE LA COLUMNA.

P_{pv} TIENE ALGUNO DE LOS VALORES SIGUIENTES:

2) CUANDO EL DISEÑO QUEDA REGIDO POR CARGAS HUERTAS Y VIVAS, O POR CARGAS HUERTAS, VIVAS Y DE VIENTO, P_{pv} ES IGUAL A LA FUERZA TRANSMITIDA POR EL PATÍN O LA PLACA DE CONEXIÓN, CORRESPONDIENTE A CARGAS DE DISEÑO

MULTIPLICADAS POR 1.25.

b) CUANDO EN LA COMBINACIÓN DE CARGAS DE DISEÑO INTERVIENE E SISMO, P_{pv} ES IGUAL AL MENOR DE LOS VALORES $1.25 M_{pv}/d_v$ O $1.25 A_p F_{yv}$. M_{pv} ES EL MOMENTO PLÁSTICO RESISTENTE DE LA VIGA, d_v SU PERALTE Y A_p Y F_{yv} EL ÁREA Y EL ESFUERZO DE FLUENCIA DEL PATÍN DE LA VIGA O DE LA PLACA HORIZONTAL QUE TRANSMITE LA FUERZA A LA COLUMNA.

INDEPENDIENTEMENTE DE LOS REQUISITOS ESTABLECIDOS POR LA EC. 5.8.1, SE COLOCARÁN ATIESADORES FRENTE AL PATÍN COMPRESIVO DE LAS VIGAS EN TODOS LOS CASOS EN QUE EL PERALTE DEL ALMA DE LA COLUMNA, h_c , SEA MAYOR QUE

$$\frac{34400 t_c^3 \sqrt{F_{yc}}}{P_{pv}} \cdot F_R \quad (F_R = 0.85) \quad (5.8.2)$$

Y SE COLOCARÁN ATIESADORES FRENTE A LOS PATINES DE LAS VIGAS EN TENSIÓN CUANDO EL GUESO DEL PATÍN DE LA COLUMNA, t_{pc} , SEA MENOR QUE

$$0.4 \sqrt{P_{pv}/F_x} \cdot F_R \quad (F_R = 0.90) \quad (5.8.3)$$

EL OBJETO DE LAS CONDICIONES IMPUESTAS POR LAS EXPRESIONES 5.8.2 Y 5.8.3 ES, RESPECTIVAMENTE, EVITAR EL PANDEO DEL ALMA DE LA COLUMNA FRENTE A LOS PATINES EN COMPRESIÓN DE LAS VIGAS, Y LIMITAR LOS ESFUERZOS DE FLEXIÓN EN LOS PATINES DE LA COLUMNA FRENTE A LOS PATINES EN TENSIÓN DE LAS VIGAS.

LOS ATIESADORES DEBEN DISEÑARSE DE ACUERDO CON EL ART. 3.7.8 DE LAS NTC.

REQUISITOS ADICIONALES PARA DISEÑO POR COMBINACIONES DE CARGA QUE INCLUYAN SISMO.

a) LOS PATINES DE LAS VIGAS DEBEN SATISFACER LAS CONDICIONES CORRESPONDIENTES A SECCIONES TIPO 1; LAS ALMAS PUEDEN SER TIPO 2.

b) EN TODAS LAS JUNTAS DEBE CUMPLIRSE LA CONDICIÓN

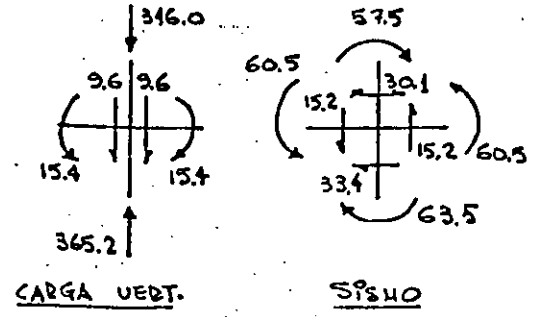
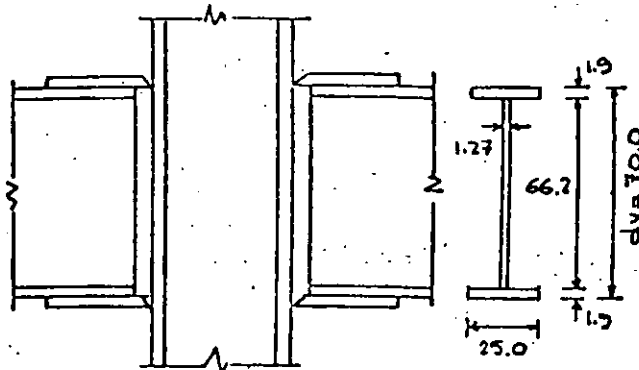
$$\sum Z_c (F_{yc} - f_a) \geq \sum Z_v F_{yv}, \text{ PARA } f_a \geq 0 \quad (5.8.5)$$

$\sum Z_c$ Y $\sum Z_v$ SON LAS SUMAS DE LOS MÓDULOS DE SECCIÓN PLÁSTICOS DE LAS COLUMNAS Y VIGAS QUE CONCURREN EN LA JUNTA EN EL PLANO DEL MARCO EN ESTUDIO, Y f_a ES ^{EL ESFUERZO} ~~LA FUERZA~~ NORMAL EN CADA COLUMNA, PRODUCIDO POR LA FUERZA AXIAL DE DISEÑO.

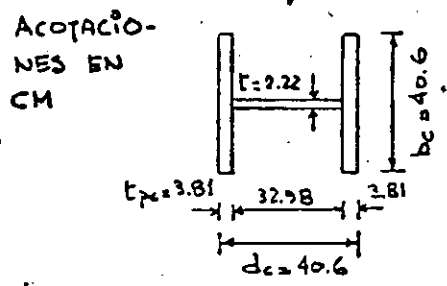
EN LAS NTC SE INDICAN ALGUNOS CASOS EN LOS QUE NO ES NECESARIO SATISFACER LA CONDICIÓN 5.8.5.

EJEMPLO DISEÑAR LA CONEXIÓN RÍGIDA QUE SE MUESTRA EN LA

FIGURA. TANTO LA COLUMNA COMO LAS VIGAS ESTÁN HECHAS CON TRES PLACAS SOLDADAS, DE ACERO CON $F_y = 2530 \text{ KG/CM}^2$. LOS ELEMENTOS MECÁNICOS QUE SE INDICAN CORRESPONDEN A CARGAS DE TRABAJO, LA CONEXIÓN FORMA PARTE DE UNA CONSTRUCCIÓN DEL GRUPO B. SE UTILIZARÁ SOLDADURA MANUAL CON ELECTRODOS E 60XX.



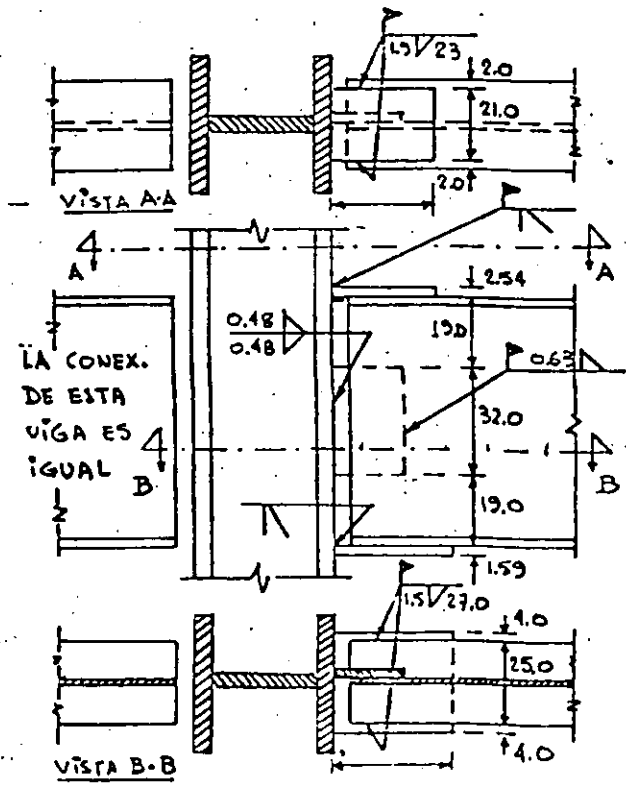
SOLICITACIONES (FZAS. EN TON., MOM. EN TM).



ACCIONES DE DISEÑO. EL DISEÑO SE HARÁ PARA LA COMBINACIÓN DE CARGA VERTICAL + SISMO CON $F_c = 1.1$.

DISEÑO DE LOS ELEMENTOS DE CONEXIÓN. LOS PATINES DE LAS VIGAS SE CONECTARÁN

A LA COLUMNA POR MEDIO DE PLACAS HORIZONTALES, Y EL ALMA CON UNA PLACA VERTICAL. TODA LA CONEXIÓN SERÁ SOLDADA, CON ELECTRODOS E 60XX.



PLACAS HORIZONTALES. PARA FACILITAR LA SOLDADURA DE CAMPO CONVIENE QUE LA DEL PATÍN SUPERIOR SEA MÁS ANGOSTA QUE ÉSTE Y LA DEL INFERIOR MÁS ANCHA.

MOHENTO DE DISEÑO $M = 1.1(15.4 + 60.5) = 83.5 \text{ TM}$

FZA. EN CADA PLACA $T = \frac{M}{d_v} = \frac{83.5}{0.70} = 119.3 \text{ Ton}$

61

AREA NECESARIA EN CADA PLACA :

$A_t F_y F_2 = T \therefore A_t = \frac{T}{F_y F_2} = \frac{119.3}{2.53 \times 0.9} = 52.4 \text{ cm}^2$

PATÍN SUPERIOR: - \varnothing DE 254 x 91.0 CM ($A = 53.3 \text{ cm}^2$)

PATÍN INFERIOR: - \varnothing DE 159 x 33.0 CM ($A = 52.5 \text{ cm}^2$)

SOLDADURA

PLACA SUPERIOR. SE USARÁ SOLDADURA DE FILETE DE 1.9 CM ($3/4"$), QUE TIENE UNA RESISTENCIA DE DISEÑO $F_R F_s A_{ef} = 0.8 \times 0.6 \times 4100 \times 1.905 \cos 45^\circ \times 1 = 2651 \text{ kg/cm}$ \therefore LONGITUD NECESARIA = $119.3 \times 10^3 / 2651 = 45.0 \text{ cm}$.

SE COLOCARÁN DOS FILETES LONGITUDINALES DE 23 CM CADA UNO (PODRÍA UTILIZARSE TAMBIÉN UN FILETE TRANSVERSAL, PERO LA PLACA RESULTARÍA MUY PEQUEÑA).

PLACA INFERIOR. LONGITUD DE SOLD. DE 159 CM = $119.3 \times 10^3 / 2210 = 54.0 \text{ cm}$. SE COLOCARÁN DOS FILETES LONGITUDINALES DE 27.0 CM C/U. (EN ESTA PLACA NO CONVIENE UTILIZAR SOLDADURA TRANSVERSAL, PUES SERÍA SOBRE CABEZA).

LAS DOS PLACAS HORIZONTALES SE SOLDARÁN AL PATÍN DE LA COLUMNA A TOPE, CON SOLDADURAS DE PENETRACIÓN COMPLETA).

PLACA VERTICAL (POR ALHA) $R = 1.1(9.6 + 15.2) = 27.3 \text{ TON}$

DISEÑO DE LA PLACA (POR CORTANTE). $V_R = F_R V_N = 0.9 \times 0.66 F_y A_p = 27300$

$$\therefore A_p = 27300 / (0.9 \times 0.66 \times 2530) = 18.2 \text{ cm}^2$$

LONGITUD NECESARIA DE SOLDADURA DE FILETE DE 0.63 CM = $27300 / 884 = 30.9 \text{ cm}$. SE EMPLEARÁ UNA PLACA DE 32 CM DE LONG. Y 0.63 CM DE GRUESO ($A = 20.2 \text{ cm}^2$), UNIDA AL ALHA DE LA VIGA CON UN FILETE DE 0.63 CM Y A LA COLUMNA CON DOS FILETES DE 0.48 CM.

REVISIÓN DEL TABLEADO DEL ALHA DE LA COLUMNA. CONVIENE HACER ESTA REVISIÓN ANTES DE VER SI SE NECESITAN APRESADORES HORIZONTALES PORQUE EL REFUERZO DEL ALHA POR CORTANTE, DE SER NECESARIO, MODIFICA EL DISEÑO DE LOS APRESADORES.

RESISTENCIA AL CORTANTE DE LA JUNTA:

62

$$V = 0.55 F_y d_c t \left(1 + \frac{3b_c t^2}{d_c t} \right) = 0.55 \times 2530 \times 40.6 \times 2.22 \left(1 + \frac{3 \times 40.6 \times 3.81^2}{70 \times 40.6 \times 2.22} \right) \times 10^3 = 160.6 \text{ TON}$$

ESTA RESISTENCIA SE COMPARA CON LA SUMA DE LA FUERZA CORTANTE HORIZONTAL DE DISEÑO PRODUCIDA POR CARGA VERTICAL MÁS 1.7 VECES LA PRODUCIDA POR SISMO, PERO LAS FUERZAS QUE APLICAN LOS PATINES DE LAS VIGAS NO SE

RESISTENCIA AL CORTE, POR CM DE LONGITUD, DE CADA PLACA :

$$V_n F_D = 0.66 F_y (t \times l) 0.9 = 0.66 \times 2530 \times 1.11 \times 0.9 = 1668 \text{ KG/CM}$$

UN FILEJE DE SOLDADURA DE TAMAÑO IGUAL AL GRUESO DE LA PLACA, 1.11 CM, TIENE UNA RESISTENCIA DE 1547 KG/CM, QUE SE JUZGA ADECUADA.

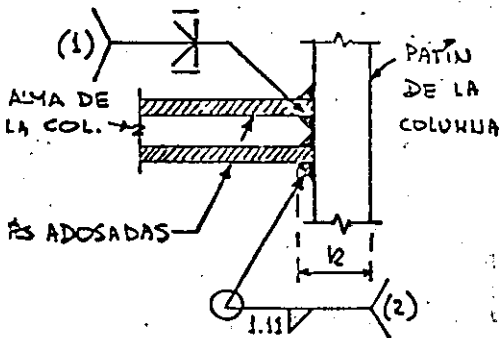
DISEÑO DE ATIESADORES HORIZONTALES.

$$A_{at} = \frac{P_{pv} - F_{yc} t_c (t_v + 5k)}{F_{yat}} \quad (5.8.1)$$

P_{pv} ES IGUAL AL MENOR DE LOS VALORES SIGUIENTES :

$$1.25 M_{pv} / d_v = 1.25 \times 117.0 / 0.70 = 208.9 \text{ TON}; \quad 1.25 A_p F_{yv} = 150.2 \text{ TON} \quad \therefore P_{pv} = 150.2 \text{ T.}$$

M_{pv} = MOMENTO PLÁSTICO RESISTENTE DE LA VIGA = $Z_v F_{yv} = 4626 \times 2530 \times 10^{-5} = 117.0 \text{ TM}$; EL PRODUCTO $1.25 A_p F_{yv}$ SE OBTUVO ARRIBA.



- (1) EN EL ALMA DE LA COLUMNA
- (2) EN CADA PLACA ADOSADA

AL APLICAR LA EC. 5.8.1, t_c SE TOMA IGUAL A LA SUMA DE LOS GRUESOS DEL ALMA Y DE LAS PLACAS ADOSADAS : $t_c = 2.22 + 2 \times 1.11 = 4.44 \text{ CM}$.
 $k = 3.81 + 1.11 = 4.92 \text{ CM}$; $t_v = 1.59 \text{ CM}$ (EN EL PATÍN INFERIOR, QUE ES EL MÁS DESFAVORABLE).

$$A_{at} = \frac{150200 - 2530 \times 4.44 (1.59 + 5 \times 4.92)}{2530} = -56.9$$

EL RESULTADO NEGATIVO INDICA QUE NO SE NECESITAN ATIESADORES HORIZONTALES

PARA EVITAR EL FLUJO PLÁSTICO DEL ACERO DEL ALMA DE LA COLUMNA, FRENTE A NINGUNO DE LOS PATINES DE LAS VIGAS.

INDEPENDIENTEMENTE DEL RESULTADO ANTERIOR, DEBEN COLOCARSE ATIESADORES FRENTE AL PATÍN COMPRIMIDO DE LAS VIGAS SI NO SE CUMPLE LA CONDICIÓN DADA POR LA EC. 5.8.2, Y FRENTE AL PATÍN EN TENSIÓN SI NO SE CUMPLE 5.8.3.

PATÍN COMPRIMIDO. PEDALTE DEL ALMA DE LA COLUMNA $h_c = 32.98 - 1.11 \times 2 = 30.76 \text{ CM}$

$$0.85 \times \frac{34400 t_c^3 \sqrt{F_{yc}}}{P_{pv}} = 0.85 \times \frac{34400 \times 2.22^3 \sqrt{2530}}{150200} = 107.1 \text{ CM} > 30.76 \therefore \text{NO SE NECESITAN ATIESADORES.}$$

PATÍN EN TENSIÓN.

$$0.4 \sqrt{P_{pv} / F_{yc} F_R} = 0.4 \sqrt{150200 / 2530 \times 0.9} = 3.25 \text{ CM} < t_R = 3.81 \text{ CM} \therefore \text{NO SE NECESITAN ATIESADORES.}$$

EN RESUMEN, NO SE NECESITAN ATIESADORES HORIZONTALES EN EL ALMA DE LA COLUMNA.

TOHARÁN NUNCA MAYORES QUE $1.25 A_{pv} F_{yv}$. EN ESTE CASO LA CARGA VERTICAL
) PRODUCE FUERZAS CORTANTES EN LAS COLUMNAS.

LA FUERZA CORTANTE QUE APLICA CADA VIGA A LA COLUMNA TIENE EL MENOR
 DE LOS VALORES SIGUIENTES :

$$\frac{60.5 \times 10^5}{70.0 + 0.5(2.54 + 1.59)} \times 1.1 \times 1.7 = 156.990 \text{ Kg. } \approx 157.0 \text{ TON}$$

$$1.25 A_{pv} F_{yv} = 1.25 \times 25.0 \times 1.9 \times 2.53 = 150.2 \text{ TON}$$

FUERZA CORTANTE TOTAL EN EL TABLERO DE ALMA = $150.2 \times 2 - 30.1 \times 1.1 = 267.3 \text{ T}$
 $> 160.6 \text{ TON} \therefore$ EL ALMA DEBE REFORZARSE.

EL REFUERZO PUEDE HACERSE POR MEDIO DE PLACAS ADOSADAS AL ALMA, O
 SUSTITUYÉNDOLA, EN UN TRAMO DE LONGITUD ADECUADA, POR OTRA PLACA MÁS
 GRUESA (ESTE SEGUNDO PROCEDIMIENTO NO SUELE SER CONVENIENTE
 CUANDO LA COLUMNA ES UN PERFIL LAMINADO). EN GENERAL CONVIENE CONSERVAR
 LA SIMETRÍA UTILIZANDO DOS PLACAS, A UNO Y OTRO LADO DEL ALMA, AUNQUE ESTA
 SOLUCIÓN PUEDE NO SER ADECUADA SI LAS PLACAS DE REFUERZO SON MUY DELGADAS.

EL COCIENTE DE LA SUMA DEL PERALTE MÁS EL ANCHO DEL TABLERO DEL ALMA
 EN LA JUNTA, DIVIDIDA ENTRE EL GUESO (SIN INCLUIR LAS PLACAS ADOSADAS
 AL ALMA) NO DEBE EXCEDER DE 90.

$$\frac{d_v + (d_c - 2t_w)}{t} = \frac{70.0 + 32.98}{2.22} = 46.4 < 90 \quad \text{CORRECTO}$$

LAS PLACAS ADOSADAS DEBEN CUMPLIR TAMBIÉN EL REQUISITO ANTERIOR, POR
 LO QUE SU GUESO NO DEBE SER MENOR QUE

$$(70.0 + 32.98) / t = 90 \therefore t_{\min} = 102.98 / 90 = 1.14 \text{ CM}$$

PUEDEN UTILIZARSE DOS PLACAS DE 1.14 CM ($7/16''$) DE GUESO.

RESISTENCIA AL CORTANTE CON DOS PLS. ADOSADAS DE 1.14 CM CADA UNA :

$$t = 2.22 + 1.14 \times 2 = 4.44 \text{ CM}, V = 0.55 \times 2530 \times 40.6 \times 4.44 \left(1 + \frac{3 \times 40.6 \times 3.81^2}{70 \times 40.6 \times 4.44} \right) 10^3 =$$

$$= 286.0 \text{ TON} > 267.3$$

EL REFUERZO PROPUESTO PARA EL ALMA ES CORRECTO.

LAS PLACAS ADOSADAS AL ALMA SE SUELDAN A LOS PATINES DE LA COLUMNA
 A TOPE, CON PENETRACIÓN COMPLETA, O CON SOLDADURAS DE FILETE CAPACES DE
 DESARROLLAR SU RESISTENCIA AL CORTANTE. AQUÍ SE UTILIZARÁN SOLDADURAS
 DE FILETE.

DISEÑO SÍSMICO DE EDIFICIOS

CRITERIOS DE DISEÑO SÍSMICO

EXPOSITOR:

DR. EDUARDO MIRANDA
Investigador del Centro Nacional de
Prevención de Desastres
Profesor, División de Estudios de
Posgrado de la Facultad de Ingeniería, UNAM
Ingeniero Consultor

Material de soporte:

1. **Notes on Seismic Design Criteria.**
2. **Resumen, conclusiones y recomendaciones del reporte de Investigación:**

Bertero, V.V., Anderson, J.C., Krawinkler, H. and Miranda, E.
DESIGN GUIDELINES FOR DUCTILITY AND DRIFT LIMITS
Report No. UCB/EERC-91/15
Earthquake Engineering Research Center
University of California at Berkeley

3. Miranda, E. , **SITE-DEPENDENT STRENGTH REDUCTION FACTORS**, *Journal of Structural Engineering*, Vol. 119, No. 12, December 1993, pp 3503-3519.
4. Miranda, E., **EVALUATION OF SITE-DEPENDENT INELASTIC SEISMIC DESIGN SPECTRA**, *Journal of Structural Engineering*, Vol. 119, No. 6 May 1993, pp 1319-1338.
5. Miranda E., **EVALUATION OF SEISMIC DESIGN CRITERIA**, *Earthquake Spectra*, Vol. 9, No. 2, 1993, pp 233-250.
6. Miranda, E., **PROBABILISTIC SITE-DEPENDENT NON-LINEAR SPECTRA**, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 22, 1031-1046, 1993. .

1. BASIC CONCEPTS

1.1 Hazard scenarios and design situations

- 1.1.1 The safety of a given structural system has to be verified for a set of hazard scenarios, each defined by the properties of the structure together with a set of actions and environmental conditions. To each hazard scenario shall be associated a design situation defined by a set of load combinations and a set of system requirements, and design and performance criteria.

The long-term reliability of a structural system is a function of the overall utilization and hazard scenarios, which are described by the characteristics of a number of disturbing phenomena, with random intensities, time variations and space distributions. For the sake of simplicity the overall reliability can be determined on the basis of a number of design situations defined in terms of the participating actions and their design intensities, in conjunction with an adequate model of the structure and the corresponding design and performance criteria. System requirements and safety levels determine what is expected of the system in terms of behavior and risk, while design and performance criteria provide operating tools and quantitative values the application of which permits to satisfy system requirements.

- 1.1.2 Design situations are classified as persistent, transient and accidental, and the corresponding target reliabilities should be consistent with the uncertainties involved, the consequences of failure and the cost of increasing safety or improving expected behavior.

Persistent situations are those having duration of the same order as the life of the structure. Transient situations are those having shorter duration and high probability of occur-

rence. Accidental situations are characterized by short durations and low probability of occurrence. According to these definitions, design situations including dead and ordinary live loads are persistent, those including wind are transient and those including earthquakes, exceptional live loads, blast and impact are accidental.

Design values of the loads participating in each design situation should be so stipulated as to lead to adequate risk levels during the intended lifetime of the system. When establishing those values, due consideration should be given to the low probability of the event of simultaneous occurrence of the most unfavorable values of the loads produced by two or more disturbing agents. This can be handled by adoption of load reducing factors to be applied to design values of the individual loads considered separately.

- 1.1.3 At locations where historical or instrumental records or geotectonic features indicate the possibility of occurrence of damaging earthquakes, the decisions about the establishment of seismic design regulations as well as about their scope and safety level should be based on formal or informal safety studies that consider economic implications and acceptable failure probabilities.

No region of the earth can be branded as absolutely inactive. In areas of substantial seismic activity the problem is usually recognized, and building codes and engineering practice advance accordingly. Areas of moderate seismicity are dangerous because of the scarcity of instrumental records and the tendency of the inhabitants to forget history and sub-estimate hazard. Therefore, decisions about design intensities should be based on the knowledge of regional tectonics as well as on direct statistical information.

Seismic design intensities should be established on the basis of cost-benefit studies under tolerable risk restrictions.

Cost-benefit studies are based on optimizing a utility function which is the algebraic sum of initial costs and present values of expected benefit and loss. Upper bounds to tolerable risk values must be adopted when failure consequences involve human lives; these bounds must be consistent with those implicitly accepted in modern societies under different conditions of voluntary and involuntary exposure.

Estimates of seismic risk should account for all sources of uncertainty, namely those associated with other loads acting simultaneously with earthquakes, with mechanical properties of the structure (stiffness, damping, mass, energy-dissipation capacity, ductility, etc) with seismicity, detailed ground motion history and dynamic response, and with the algorithm employed in evaluating system's response and capacity and in evaluating failure probabilities.

1.2 Structural system

- 1.2.1 Seismic design regulations shall state criteria for idealizing structural systems. These criteria shall take into account the type and specific features of each system and shall be based on the response variables that determine the behavior of that system on the control variables that may be used in the selected idealized system, and on the degree of correlation between control variables and response variables. Non-structural elements should be incorporated into the model or should be adequately isolated from the structure.

It is well known that the seismic behavior of a structural system is to a large extent determined by its capacity to dissipate energy through ductile deformation and that this

capacity may be limited by local brittle failure and dynamic instability problems. However, for practical reasons design criteria are often based on static or linear dynamic models, and the control variables are lateral forces and displacements instead of ductility demands. The usefulness of a simplified structural model lies on its ability to indirectly control the response variables that determine the behavior of the real system.

Experience of past earthquakes shows that non-structural elements may cause the failure of structural elements due to an improper idealization of the system's behavior.

It is often difficult to isolate non-structural elements from the structure or to model accurately their possible interaction with it; therefore, compromise solutions have to be permitted where simplified conservative models of the mentioned elements can be adopted.

- 1.2.2 Linear models can be used in conjunction with response spectra reduced to account for ductility, when dealing with regular elasto-plastic systems having gradual variations of the ratio of the strength available to that required at critical sections. Conventional methods of static analysis can be adopted when, in addition, stiffnesses and masses vary gradually throughout the structure. Cases not satisfying the above requirements deserve special treatments, which may consist, for instance, of allowing smaller load reductions through ductility, requiring local corrective factors for internal forces or special lateral force-coefficient functions, or requiring an explicit non-linear response analysis.

Both theoretical studies and observations about seismic behavior of real structures show that excessive ductility demands and inelastic deformations are likely to take place

at some locations of systems with pronounced variations in strength, with a tendency of plastic deformations to accumulate in one direction, or with non-linear force-deflection curves that depart significantly from the elasto-plastic relation or that deteriorate under load reversals. Such situations arise, for instance, in multi-story buildings with a flexible ground floor in irregular frames where the bottom ends of some columns rest on beams or cantilevers, transmitting to them the reactions due overturning moments, or in cross-braced frames where a significant portion of the story shear is taken by tensile bracing members.

The method to estimate the required lateral capacities on the basis of the spectra reduced through given ductility values as single-degree-of-freedom systems is applicable only to regular systems, where no important variations are observed in the ratio of the strength available to that required according to linear response analysis. If one intends to predict ductility demands of irregular systems, one must recourse to non-linear methods of response analysis. Under these circumstances, design codes must either require use of the latter methods or, to be on the safe side, to specify low ductility factors to reduce the seismic response forces obtained from linear analysis.

- 1.2.3 Structural models must include the stiffness of all elements that may influence their response, including the so-called non-structural elements.

Because of the difficulties in obtaining and handling accurate models of non-structural elements, conservative assumptions may have to be made with respect to the interaction between the non-structural elements and the structure. In some cases it may be convenient to cover the mentioned assumptions by

resistance should maintain, with an adequate reliability, their integrity during and after the occurrence of seismic actions, and should not adversely affect the behavior of the structure and other structural elements.

A typical example is a secondary beam assumed to be simply supported on intermediate points of the main girders perpendicular to it. Its contribution to earthquake resistance will usually be negligible, but its continuity in flexure and torsion with the main girders may give place to excessive stresses not accounted for by simple models.

- 1.3.5 Non-structural members and their fastenings to the structural system should provide adequate safety against local damage and collapse during and after earthquakes and should not adversely affect the behavior of structures, and structural systems. They should not create serious life hazards during and after earthquakes.

The design of the fastening of partitions to a structure must be consistent with the intended level of protection against damage, and with the assumptions made in the structural analysis. If a very low probability of damage is aimed for, the partition must be attached to a structure so as not to follow the deformations of the structure during a severe earthquake, unless it is shown that the system is stiff enough to prevent the deformation above the damage threshold. The attachment must be capable of preventing overturning. The supports of equipment, installations and ceiling systems should prevent their collapse with an adequate reliability. Accurate estimates of the seismic response of these systems will, in general, require their idealization as appendages tied to the main system and the application of a special method of dynamic analysis. Except for very important

equipment, the local response may be estimated by means of simplified models. The reliability to be specified must take into account the nature and possible magnitude of the consequence of local failures.

- 1.3.6 Serviceability requirements for structures and structural elements should state the limit states relative to those requirements, as well as reliability conditions to be satisfied for different seismic intensities.

The mentioned limit states include excessive residual deflections, cracking or loss of stiffness. These states are not only related to serviceability conditions, but also to safety requirements, as they imply cumulative damage and degradation of mechanical properties.

It may often be advantageous to accept significant local damage as a means of dissipating energy and preventing more dangerous failure modes, but repair work should be easy and reliable and should be undertaken immediately after damage takes place. It may even be advisable to place some structural elements destined to fail and be replaced.

- 1.3.7 Non-structural elements should be classified in two categories, namely those which should maintain their serviceability during and after earthquakes and those which are only required to maintain their serviceability after earthquakes.

Due to a short duration of earthquakes as compared to the life of structures, serviceability conditions do not include behavior during earthquakes, except for some types of equipment. The classification of a non-structural element in a given category depends on the use of the construction.

means of a double structural analysis, with and without non-structural elements.

- 1.2.4 Non-linear models shall also account for slenderness ($P - \Delta$) effects and specify the locations where non-linear material behavior may occur. They shall also specify adequate cyclic stress-strain curves or procedures to determine them by theory or experiments.

The interaction between the inelastic deformations produced by the response to several simultaneous ground motion components may be very important. Therefore, carrying out step-by-step non-linear response analyses may lead to a false idea of accuracy if one neglects to treat the significant components simultaneously.

- 1.2.5 Both linear and non-linear models must make use of criteria of structural analysis that account for all relevant sources of deformations and inertial forces in the structure and at its foundation.

The following are a few examples of effects not always recognized, but important in many cases: axial deformations of columns due to overturning moment, rotational inertia forces in chimney stacks and inverted pendulums, soil deformations and inertia forces associated with foundation-structure interaction, effects of distributed mass on the response of some long-span members, vertical or rotational accelerations of the ground.

1.3 System requirements

- 1.3.1 System requirements define the conditions that a system is expected to satisfy in accordance with its intended use. For structural systems, these requirements are grouped as follows:

- a) Safety.
- b) Serviceability.
- c) Durability.
- d) Appearance.

This document deals with the first two groups. Due to the wide margins of uncertainty involved, they have to be stated in probabilistic terms. In order to facilitate practical design applications, the probabilistic specifications of system requirements have to be replaced with a set of practical rules which state acceptable algorithms as well as nominal values of loads, strengths and stiffnesses. These rules are called design criteria.

- 1.3.2 Safety requirements should state bounds to the probability of failure of a system for given time intervals. The influence of cumulative damage and degradation of mechanical properties should be taken into account when verifying these requirements.

The reliability of a complex system depends on the reliabilities of the individual members and on the way they are interconnected. Therefore, no simple general relations can be established between those safety measures, and specifications related to member safety levels should take into account at least approximately, their possible relation with system reliability for each structural type.

- 1.3.3 Safety requirements for structural members assumed to contribute to earthquake resistance must refer to the earthquake intensity, that corresponds to a given return period, should be consistent with the intended safety of the structural system, and should cover a possible influence of cumulative damage and degradation of mechanical properties.

- 1.3.4 Structural elements assumed not to contribute to earthquake

1.4 Design criteria

1.4.1 Design criteria are a set of specified operations, algorithms and numerical values which in combination with performance criteria lead in practice to satisfaction of the system requirements.

1.4.2 Design criteria include the following:

- a) Models of the actions considered in each design situation.
- b) Definition of variables in terms of which the response shall be measured.
- c) Algorithms for determining response.
- d) Conditions for applicability of given response analysis algorithms.
- e) Criteria for obtaining characteristic and design values of member resistance and stiffness.
- f) Criteria for evaluating capacities of ductile deformation and energy dissipation of members.
- g) Criteria for determining damping values of the structure.
- h) Criteria for determining acceptable values of resistance and response.

Characteristic values of the variables used in design are those values in terms of which are expressed the design situations; they correspond to specified probabilities of reaching more unfavorable values. Design values are obtained from characteristic values by modifying the latter with load factors, capacity reduction factors or additive terms. These factors and additive terms are generally designated as safety elements.

1.4.3 Seismic actions can be specified by lateral force coefficients, response spectra or probabilistic models of ground motion (see sections 2.2.1-2.2.5). The level of seismic actions must be such that when one takes into account the seismicity of the site, the uncertainties in the ground motion models and structural

properties, the specified characteristic values of all those properties and the safety elements, one arrives at the reliability stipulated by the functional requirements.

Safety elements are defined in the commentary to 1.4.2. Seismic hazard may be described by the probability distribution function of the maximum intensity that may occur during any given time interval. The probability of failure or damage of a structure is a result of the contribution of earthquakes of different intensities. In general, the requirements with respect to safety and serviceability conditions may be achieved by specifying two intensities: one corresponding to long return periods, applicable for checking safety against collapse, and the other corresponding to moderate return periods, for which the occurrence of limit states with respect to serviceability and partial damage should be avoided. The design criteria for both conditions should lead to the required reliability against collapse during the system's lifetime and to a minimum value of the sum of initial costs and present value of expected losses. For ordinary systems practical considerations may lead to formulate design criteria for safety and serviceability on the basis of a single intensity value.

1.4.4 The methods adopted for predicting structural response must be accurate enough for the type of a structure analyzed and for the types of variables used to measure the response. All significant sources of deformations and inertia forces must be considered (see Section 1.2). Explicit rules must be included to evaluate, at least approximately, a possible influence of slenderness effects.

When linear analysis is applicable, internal forces and stresses must be evaluated by a method that takes into account equilibrium, deformability and compatibility

conditions, or by approximate methods known to provide sufficient accuracy in particular cases. A limited amount of stress redistribution may be permitted in the linear analysis.

- 1.4.5 When modal dynamic analysis is applicable the model of a structure should include as many degrees of freedom as necessary to obtain reasonable or reliable estimates of internal forces at critical sections. The criteria for mode superposition should account for probabilistic correlation between the responses of a group of modes with closely spaced natural frequencies. Uncertainty in natural frequencies should be taken into account when determining design values of spectral ordinates.

Even if torsional static eccentricities are small, their dynamic amplification can be very large, but the resulting responses can be bounded by a value determined by a simple rule that estimates dynamic eccentricity as the sum of an amplified static value and an accidental value. For single story systems it has been shown that reasonable estimates of dynamic response can be obtained by performing a modal dynamic analysis assuming only the translational degree of freedom parallel to the ground motion component and multiplying the static eccentricity by an amplification factor that does not depend on the eccentricity. It is to be expected that this conclusion can be extrapolated to uniform multistory systems, but it is probable that systems with large inter-story variations in plan or in distribution of masses or stiffnesses must be analyzed considering coupled translation and torsion vibration modes. Rotational inertia may be very important in inverted pendulums and chimney stacks and so may be vertical inertia forces due to horizontal ground motion in long span girders with distributed mass. The deformations of floor diaphragms in their plane have to be considered in

some structures when those diaphragms do not have enough stiffness to be treated as rigid bodies.

Uncertainty in natural periods can be recognized by requiring that their nominal values used in design be more unfavorable (shorter or longer) than those computed, or by modifying the response spectra.

- 1.4.6 If a step-by-step method of analysis is adopted for estimating the response of a system taking into account non-linear behavior, the interaction among the simultaneous responses to several ground motion components should be represented and should account for degrading behavior when significant. Design values of the response should be obtained from a large enough number of ground motion samples.
- 1.4.7 Nominal design values of strength, stiffness, ductile capacity and effective damping should recognize all sources of uncertainty in system properties, and they should correspond to clearly stated probability levels. Principles and algorithms valid for determining the mechanical properties of members, subassemblies and connections from characteristic values of material and geometric properties should be specified.

Significant uncertainties arise from deviation in material properties, construction imperfections and strength prediction algorithms. The probability of more unfavorable values than the characteristic values should be high enough as to permit the adoption of reasonably inexpensive quality control tests, but low enough as to provide some reliable control of the most unfavorable tail of the probability distributions. For ordinary cases that probability is in the order of 0.02 to 0.05.

- 1.4.8 Verification rules should be established for the following variables,

when applicable

- a) Internal forces and stresses in members and connections.
- b) Deflections.
- c) Relative deformations.
- d) Local deformations at connections.
- e) Local ductility demands.

Those rules should be formulated in terms of characteristic values of material and geometric properties and system response. Adequate safety elements should be introduced in order to attain reliability levels as stipulated by the system requirements.

1.5 Performance criteria

1.5.1 Performance criteria are statements about the required properties of structures and structural members so that they will satisfy the assumptions of structural analysis and design. These rules cover the following properties:

- a) Strength
- b) Stiffness
- c) Ductility.

1.5.2 Strength performance rules should include statements about minimum and maximum acceptable values, in order to ensure that the system as whole is not weaker than intended and that no unforeseen behavior problems will occur by the presence of members stronger than assumed. These rules should also include specifications about the acceptable relative values of the capacities of members and sub-assemblages in different failure modes. If these requirements cannot be satisfied, lower ductility values should be assumed for the purpose of determining design forces.

Rules related to overstrength and to relative values of

capacities in different failure modes are intended to ensure ductile behavior. Overstrength in a ductile member may lead to overstress of brittle elements and therefore to their failure. A flexural member must have a higher safety factor against diagonal tension failure than against tensile yielding by bending so that the latter failure mode is much more likely than the former. Overstrength in lateral shear of a large number of stories in a multistory building can give place to excessive ductility demands at stories possessing only the specified capacity. In the last example, overstrength may result from the presence of infilling wall panels not considered as structural elements.

1.5.3 Stiffness performance criteria should include statements about minimum and maximum acceptable values, in order to ensure that the system is not more flexible than intended, and that no unfavorable distribution of internal forces will result from positive or negative deviations of member stiffnesses with respect to those assumed.

1.5.4 Performance rules relative to ductility should state minimum values of that variable, as well as the number of alternating load cycles for which each member or subassemblage should be able to reach a specified deformation without significant reduction in strength or energy dissipation capacity.

1.6 Reliability and quality assurance

1.6.1 Reliability is the probability of satisfying a system requirement or a performance criterion within a reference interval of time.

When dealing with damage modes, the consequences of which can be represented by a continuous function of response, rather than expressing functional requirements in terms of a threshold value of the response, it is more

adequate to describe reliability with respect to those modes by the probability density function of the magnitude or the cost of damage, as this function, and more precisely its expected value, constitutes the basic concept for making decisions concerning reliability with respect to the mentioned modes.

- 1.6.2 For standardizing the definition of reliability a reference time interval of 50 years is chosen.
- 1.6.3 When formulating reliability models due consideration should be given to the following possible causes of unsatisfactory behavior:
- a) Gross error and negligence in design or construction.
 - b) Unfavorable random deviations in material properties or member geometries.
 - c) Inaccuracies of mathematical models and algorithms employed to represent loads and structural systems and members, as well as to predict response and behavior.
 - d) Uncertainties in the formulation of the probabilistic models themselves or in the estimation of their parameters.

Gross error and negligence are by far the most important causes of structural failure under conditions present in utilization scenarios. Failures produced by earthquakes occur as a rule in structures where no special seismic provisions were taken, where seismic hazard was underestimated, where design was based on oversimplified unrealistic models or where gross construction deficiencies were present. Ordinary models for reliability analysis ignore the possibility of gross errors and negligence and therefore underestimate failure probability.

- 1.6.4 Gross error and negligence should be avoided by a convenient quality assurance plan. Their possible consequences should be

minimized by means of redundancy and ductility.

Optimum quality assurance plans can be formulated on the basis of the expected value of risk reduction and the investment in the plan. Because the conditional probability of failure, given the occurrence of some gross errors is very high, it pays to control failure consequences by means of redundancy and ductility.

- 1.6.5 Reliability models should be based on theoretical concepts as well as on calibration with the behavior of actual structures.

The state of the art of structural reliability analysis and the limited extent of statistical information about loads and structures make it necessary to use information about the behavior of actual structures. Seismic behavior and reliability are substantially affected by energy dissipation in partitions and other "non-structural" elements, and only a combined theoretical - empirical approach can assess this effect and extrapolate it to other systems.

- 1.6.6 Acceptable reliability levels must be established for each type of structure on the basis of the economic value of reducing risk and on considerations about acceptable risk levels with respect to consequences that cannot be expressed in monetary terms, such as loss of human lives or destruction of very valuable documents or artworks.

The consequences of failure and the level of acceptable risk depend to a large extent on the use of buildings, on their contents and on the importance of their functions under normal conditions as well as during and after earthquakes. For instance, buildings can be classified as follows.

Group I. All buildings other than those belonging to Groups II and III.

Group II. Buildings having large number of occupants, including public assembly halls and theaters, churches, schools and hospitals. Also included are buildings used as record depositaries or for the storage of historic, artistic or literary treasures.

Group III. Buildings having essential facilities necessary for post-earthquake recovery, which are required to function during and immediately after an earthquake. Also included in this group are buildings housing particularly valuable art treasures or similar.

2. IDEALIZATION OF SEISMIC ACTIONS

2.1 Earthquake characteristics

2.1.1 In the selection of earthquake characteristics for design purposes, the following concepts have to be considered:

- a) Historical records.
- b) Local instrumental records.
- c) Regional geology and tectonics.
- d) Seismic activity at all sources that may contribute to hazard.
- e) Intensity attenuation with distance.
- f) Local conditions.

None of these sources of information can be neglected when making estimates of seismic hazard: historical records about qualitative measures of earthquake intensities may give less precise descriptions of ground motion than accelerograms, but those historical records provide usually a clearer picture of the long term statistical pattern. Knowledge of regional geology and tectonics is often more informative than several tens of years of relatively low activity. Probabilistic approaches for putting together information from different sources, as described above, are based on Bayes' Theorem about the probabilities of alternate hypotheses.

2.1.2 Local historical and instrumental records must be studied with the aim of obtaining information about intensity statistics, frequency content of ground motion and influence of local conditions.

Descriptions of damage suffered by different kinds of structures provide significant information about frequency content characteristics of ground motion.

2.1.3 Studies about regional geology and tectonics should be carried out by specialists who are familiar with the regions of interest and

should cover the following concepts as much as feasible:

- a) Regional tectonic structure and processes.
- b) Principal and secondary faults.
- c) Indications of activity or inactivity of fault.
- d) Estimates of maximum magnitudes, seismic moments and durations of earthquakes.
- e) Estimates of energy liberated per unit time.
- f) Possible mechanisms.
- g) Possible focal depths.

Descriptions of a regional tectonic structure should include an evaluation of the setting of a region close to the site within wider regions of similar characteristics, so that assessments of activity can be based on relevant information above and beyond statistical data of activity in the vicinity of a site, as the latter are often insufficient.

Estimates of maximum magnitudes or seismic moments can be based on the dimensions of the potential sources but it is difficult to set an upper bound to the portion of a fault that can move during a single event. Uncertainty about these estimates must be stated in probabilistic terms.

2.1.4 Estimates of potential future activity at seismic sources must include

- a) Magnitude-recurrence curves covering the interval of moderate to largest expected magnitudes.
- b) Measures of uncertainty about the above mentioned curves.
- c) Indications about the possible random and systematic fluctuations of activity with time.

The last item includes considerations about the likelihood of immediate or short-term activity. This likelihood may

result from purely statistical considerations, from the observation of long inactive intervals at potentially active areas, or from the observations of precursors of large earthquakes.

2.1.5 Intensity-attenuation expressions must provide enough information for characterizing ground motion.

The ultimate aim of establishing or adopting intensity-attenuation expressions is to permit the estimation of earthquake spectra or more general models of ground motion. Some expressions provide direct estimates of ordinates of response spectra for a given period and damping, while other aim only at predicting peak absolute values of ground acceleration, velocity and/or displacement, and recommend the use of expressions relating these parameters with spectral ordinates.

For some applications ground motion must be described in terms of stochastic process models (see Section 2.2). In those cases the parameters of those models (spectral density of acceleration, intensity envelope function) must be predicted directly from the properties of earthquakes at their source, or indirectly from response spectra.

2.1.6 Intensity-attenuation relations may be specifically determined for the region of interest or may be inferred from those valid for other regions of similar geophysical characteristics and seismic mechanisms. They should consider:

- a) Type of fault and earthquake mechanisms.
- b) Theoretical concepts about generation, propagation and attenuation of waves of different types.
- c) Empirical information about magnitude, intensity and site-to-source distance.
- d) Influence of distance on duration of ground motion.

- e) Random deviations of actual intensities with respect to computed values.

Available expressions are many and inconsistent. Each is based on its own set of data and assumptions about general form, and each defines site-to-source distance in different manner. Most of the empirical information corresponds to earthquakes at moderate distances, and therefore intensity attenuation curves in their most important range, i.e. for short distances, are very sensitive to assumptions about their form.

Most available expressions take intensity as the product of a function of magnitude and a function of distance. Although this assumption may be adequate for peak ground displacements or spectral ordinates in the range of long natural periods, it is far from true for peak ground accelerations or spectral ordinates at high frequencies.

- 2.1.7 The influence of local soil, topography and geologic structure on the characteristics of ground motion shall be evaluated and incorporated into the models of earthquake excitation. This evaluation shall be based on direct records obtained during actual earthquakes as well as on realistic theoretical models that take into account topographic and stratigraphic characteristics, mechanical properties of the ground and types of arriving seismic waves.

When one talks about microzoning, attention is usually focused on shear-beam models of stratified soil formations and on uni-dimensional, vertically traveling SV waves. Strong motion and seismological records have shown that those models can only be applied to a very narrow range of conditions, and that many other geologic or topographic features can have a more pronounced influence on ground motion than the presence

of sediments. More general analytical models have been developed in order to account for two- and three-dimensional response and various types of arriving waves. As a consequence of the complexities involved in theoretical models, those models should only play a role complementary to instrumental observations. Because path and mechanism have been shown to affect local variations of ground motion, a large number of events (even small intensity motions) will have to be recorded at a given site before reliable conclusions can be drawn concerning those variations.

2.2 Earthquake models for structural design

- 2.2.1 The model used to represent seismic actions on a given structure must be capable of representing the influence of its mechanical properties on its response to a degree of accuracy compatible with the importance of a structure and the accuracy and complexity of the methods of analysis. The following models are recommended for the response analysis of various types of structures:

- a) Lateral force coefficients, independent of the natural period or dependent on an approximate period, for the design of unimportant and inexpensive structures and for those of moderate importance with uniform distributions of masses, stiffnesses and safety factors.
- b) Response spectra for different damping values and ductility factors for the design of moderately important structures without very irregular distributions of masses or stiffnesses, and with uniform values of the ratio of available to required strength at critical sections.
- c) Stochastic process models of ground motion, or a set of

ground motion time-histories for the design of extremely important structures or for those with irregular distributions of the ratio of available to required strength or with failure mechanisms developing important non-linear deformations.

- d) Multi-component stochastic process models of ground motion at one or more foundation points or a set of multi-component ground motion time histories, also at one or more foundation points, for the design of structures with large dimensions in plan.
- e) Stochastic process models of arriving waves or a set of space-time histories of those waves, for the design of underground structures.

2.2.2 Lateral force coefficients

- 2.2.2.1 A lateral force coefficient function includes both the ratio of the shear at the base to the weight above it, and the form of variation of the ratio of local lateral force to local weight along the height of a structure.
- 2.2.2.2 The application of lateral force coefficient functions for seismic design should be restricted to the particular types of structures for which those functions were determined. For each particular type of structures the lateral shear forces predicted from the corresponding lateral force coefficient function should provide uniform safety with respect to the shear forces obtained from dynamic analysis for the response spectra determined in accordance with 2.2.3.

Lateral force coefficient functions cannot simultaneously provide uniform safety for lateral shear forces and for other forces resulting from structural response, such as overturning moment, nor do they serve to estimate local accelerations because the maxima of the various response

variables mentioned do not take place simultaneously. This is why elevation-dependent factors are introduced for reducing overturning moments obtained by integration of the diagram of design shear forces.

Wide differences have been shown to exist between lateral force coefficient functions corresponding to given reliability values for structures deforming like shear beams and for those responding like flexural beams. Those differences are sensitive to the shape of the response spectrum, and reflect the relative values of the contributions of fundamental and higher natural modes. They can be taken into account, for instance, by representing the lateral force coefficient function as the superposition of a linear and a second degree functions of the elevation, or by making it proportional to the iteratively determined deformed configuration of the structure when subjected to a system of lateral loads.

Lateral force coefficients may be stipulated as independent of natural periods, in that case design responses are too conservative for very short and very long natural periods. This justifies the practice of specifying rules for making crude estimates of the fundamental period of a structure and making the lateral force coefficient functions to depend on those estimates, in accordance with the specified response spectra.

- 2.2.2.3 If lateral force coefficient functions are made to depend on estimates T of the fundamental natural period, the variation of those coefficients with T should lead to design values of seismic actions on critical sections at least as safe as those that would be obtained from a detailed modal dynamic analysis accounting for the contributions of higher vibration modes.

In a range of high values of T the ordinates of a response spectrum decrease with T , and so does the base shear. However, because of the contribution of higher vibration modes, the decrease of a base shear is less pronounced than that of the spectral ordinates. The variation of lateral shear with height is also sensitive to the contribution of higher modes.

- 2.2.2.4 The base shear coefficient should depend on the ductility factor K applicable to each type of a structure. If the base shear coefficient is specified as a function of T , its variation with this parameter and with K can be treated following the rules proposed in 2.2.3 relative to the permissible reduction of the response spectra ordinates through ductility. If the base shear coefficient is to be specified as independent of T , it should be taken as the largest value of a_0 or C/K , where all these variables are defined in 2.2.3.3.

The last condition arises from the fact that ordinates of the acceleration response spectrum for a given ductility factor K can be obtained simply by dividing the ordinates of the elastic response spectrum by K if the natural period is not too short, but the reduction factor varies from K to 1 as the natural period approaches zero.

- 2.2.2.5 The lateral force coefficient functions shall be chosen so as to optimize the population of structures to which they are to be applied.

This optimization must be understood in the sense of leading to a maximum of the algebraic sum of present values of benefits minus initial costs minus present values of expected damage.

2.2. Response Spectra

- 2.2.3.1 Design response spectra shall be presented in the form of linear response spectra for different damping ratios and non-linear response spectra valid for given types of non-linear load-deformation curves and given ductility factors. These spectra shall be made to depend on local ground conditions.

In many practical situations design spectra can be specified by a set of linear response spectra, a set of rules to transform linear spectra into elasto-plastic spectra corresponding to given ductility factors, a set of conditions that structures must satisfy in order for the elasto-plastic spectra to apply, and a set of modifications to apply when considering other non-linear load-deformation curves.

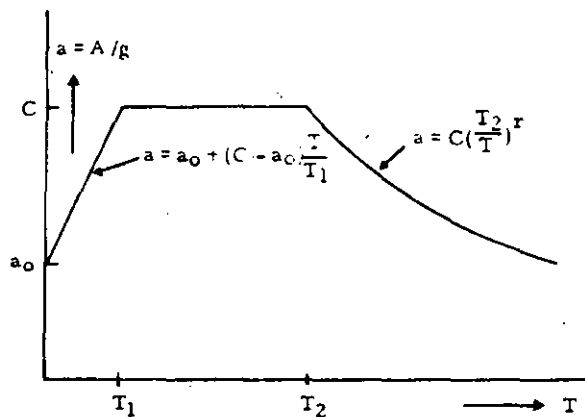
- 2.2.3.2 For each damping ratio and ductility factor, more than one design spectrum may have to be specified in order to cover at a given reliability level the responses to earthquakes originating at different seismic sources near the site. Alternatively, a single spectrum may be specified, provided it gives an envelope at a given reliability level to the response to earthquakes from different sources.

Standard methods of seismic risk analysis permit obtaining ordinates of response spectra for given natural periods and damping ratios corresponding to specified return periods or rates of exceedance per unit time.

- 2.2.3.3 Linear design spectra should be specified by means of simple functions defined by a small number of parameters. A widely applicable family of functions are given in Fig. 1. In that figure,

A = ordinate of the acceleration response spectrum;
 g = acceleration of gravity;
 a = A/g ;
 a_0 = value of " a " when " A " is taken equal to the peak ground acceleration;

Fig. 1
Design response
spectra



C = maximum spectral ordinate; it is a function of damping;

T_1, T_2 = low and high characteristic periods.

Then dealing with the design spectra on a firm ground, the value of T_1 is so small when uncertainties in spectral ordinates and natural periods are recognized, that it may be adequate to take $T_1 = 0$, which is tantamount to defining the acceleration spectrum by a horizontal branch for $T < T_2$ and a hyperbolic branch for $T > T_2$.

2.2.3.4 Unless uncertainty in a natural period of a structure is explicitly accounted for by adopting a most unfavorable value of that period, that uncertainty must be covered by proper modification of the response spectra that correspond to the target reliability level.

The modification consists of taking each ordinate of the design spectrum equal to the highest ordinate of the unmodified spectrum included within a finite range of period on each side of the computed value. The range depends on the degree of uncertainty about the natural period. In the absence of more reliable criteria, the mentioned range may be taken as $(0.75 T_c, 1.33 T_c)$, where T_c is the computed value of the

natural period.

2.2.3.5 Specified response spectra must aim at providing reliability levels consistent throughout the range of natural periods. This can be achieved by multiplying the ordinates of the response spectra that correspond to given return periods or rates of exceedance by factors that grow asymptotically with the natural period. If spectra are represented by functions as described in 2.2.3.3, this requirement can be fulfilled by adopting values of "r" in Fig. 1 smaller than those corresponding to the spectra obtained in compliance with 2.2.3.3.

This requirement arises among other concepts from the facts, first, long period structures have usually more degrees of freedom and more failure modes than those with short period. secondly, the long period structures are more sensitive to instability effects and therefore less reliable than the short period structures when they are both analyzed by conventional methods, and thirdly, the ratios of the additional costs of increasing safety to the expected cost of damage are smaller for the longer period structures.

2.2.4 Real and simulated ground motion records

2.2.4.1 If the response of a structural system has to be predicted by means of step-by-step integration methods, the action must be represented by time histories of ground motion.

In general the best way to represent time histories of ground motion is through accelerograms.

2.2.4.2 Time histories may be specified by a set of sample records of real or simulated earthquakes. In both cases, the number of samples in each set and the characteristics of each sample must be chosen so as to produce distributions of structural response.

consistent with the design spectra that correspond to the specified reliability level. This condition must be satisfied for all the range of natural periods of interest.

The criteria for judging the required number of samples cannot be separated from the manner in which the design value of each response variable will be derived from the set of values obtained from the step-by-step response analysis. If design values are obtained by averaging computed values, the required number of samples will be determined under the condition that with a sufficiently high probability the average response must be equal to or greater than the response obtained from the specified response spectrum.

2.2.4.3 Instead of simulated ground motion records a stochastic process model may be stipulated. This model may be represented in general as the product of a random stationary process with given spectral density and a deterministic function of time.

More sophisticated models which take into account time variation of the frequency content of the ground motion during an earthquake may be required when trying to predict the response of structures with degrading stiffness.

2.2.4.4 Adequate base-line correction should be performed on real and simulated earthquake records in order to permit reliable estimates of structural response for all the range of natural periods of interest.

2.2.5 Multi-component ground motion

2.2.5.1 The response analysis of ordinary structures must take into account the simultaneous motion of the ground in more than one direction.

2.2.5.2 The response analysis of structures with large dimensions in

plan must take into account the difference in ground motion at various supports.

2.2.5.3 Multi-component models of ground motion may be specified by means of individual spectra, real or simulated time history records or stochastic process models for every component with corresponding cross-correlation functions. The orthogonal components of ground motion at a given site can be taken as stochastically independent.

The last recommendation is an approximation to the results of some available statistical studies. No similar studies have been carried out with records of ground motion in the same direction at different sites.

Simple theoretical models have been proposed on the basis of wave propagation concepts.

3. RISK AND RELIABILITY

3.1 Maximum seismic response

3.1.1 For the purpose of reliability analysis the characteristics of the ground motion at a site during an earthquake must be described by a set of parameters related to its intensity and frequency content. The intensity is such a scalar variable that the expected structural response grows asymptotically with it. The frequency content is a function that describes a contribution of the waves with different frequencies relative to the energy of the motion. The parameters used to define intensity and frequency content must be able to express probability distribution of maximum structural response. The parameters to be adopted may be different for different types of structures.

For most application the intensity and frequency content can be defined by duration and peak absolute values of ground acceleration, velocity and displacement, because these parameters determine the ordinates of expected response spectra and the probabilistic distribution of maximum response. An alternative description is provided by the ordinates of response spectrum for given periods and damping values, and a set of shape parameters.

When ground motion is represented by a stochastic process, intensity and frequency content are determined by the parameters that describe the instantaneous spectral density of ground displacement, velocity or acceleration and the evolution with time of that spectral density.

3.1.2 In order to obtain reliability measures of specified seismic design criteria, it is necessary to obtain probability descriptions of maximum response for a given earthquake and for all earthquakes

occurring during a specified reference time interval.

3.1.3 The probability distribution of the maximum response of a structure during an earthquake of given intensity and frequency content can be obtained by conventional methods of random vibration analysis.

Intensity and frequency content can be specified by means of the expected value of the response spectrum ordinates or by the form and parameters of stochastic process models.

3.1.4 The probability distribution of the maximum response of a structure during a given reference interval can be obtained from standard methods of probability theory, taking into account the following concepts:

- a) Probabilistic model of the occurrence of an earthquake of given intensity and frequency content.
- b) Probability distribution of the maximum response during an earthquake of given intensity and frequency content.

3.1.5 Probabilistic models of the occurrence of earthquakes of given intensity and frequency content characteristics can be obtained directly from statistical records or derived theoretically from probabilistic models of seismicity at near-by sources. Theoretical analysis should account for the following concepts:

- a) Type and parameters of the probabilistic models of seismicity.
- b) Probability distributions of intensity and frequency content characteristics for given parameters of earthquakes at their source and distances from source to site.

For many applications it may be assumed that intensity and frequency content of any two earthquakes are stochastically independent. In this case the probabilistic model of the

occurrence of earthquakes of given intensities can be described by the probabilistic model of a time series process expressing the occurrence of earthquakes of random characteristics and the joint distribution of those characteristics given each occurrence.

The probability distributions mentioned in paragraph b) are contained in usual intensity-attenuation expressions and the distributions of the ratios of the observed to the computed intensities.

3.1.6 Curves relating earthquake intensities with their annual exceedance rates are called intensity-recurrence curves. They constitute the simplest probabilistic descriptions of the random process of occurrence of earthquakes with given characteristics. These curves can be used to obtain curves relating given values of structural response with their annual exceedance rates, i.e., response-recurrence curves.

3.2 Seismicity

3.2.1. Seismicity is the process of earthquake occurrence of different characteristics at a given seismic source. For the purpose of evaluating seismic risk and seismic reliability the mentioned process must be described by a probabilistic model.

3.2.2 Models of seismicity at a given source must include probabilistic descriptions of the time and coordinates of earthquake occurrences as well as of the parameters about their source characteristics, as stipulated in 2.1.3 and 2.1.4.

3.2.3 For practical applications the characteristics of each source can be expressed by magnitudes. Occurrence time can be represented by renewal-type stochastic processes; probabilistic correlation among the coordinates of different shocks can be ignored, and the

magnitudes of two different earthquakes can be taken as independent and equally distributed random variables.

These models do not account for some observed effects, such as clustering in space and time of sequences of aftershocks, as the influence of this clustering on the risk for time intervals of the order of several tens of years is not very significant.

3.2.4 Curves relating earthquake magnitudes with their annual exceedance rates at given sources are called magnitude-recurrence curves. They constitute the simplest probabilistic models of seismicity and can be used to obtain intensity-recurrence curves.

3.2.5 In the formulation of seismicity models the following information should be taken into account, in accordance with 2.1.3:

- a) Regional and local tectonics and geology, including studies about indications of recent activity or inactivity of faults.
- b) Seismological information, including coordinates, mechanisms and source parameters of earthquakes in the region.
- c) Mechanical models about the process of energy accumulation and liberation at a seismic source.
- d) Estimates of maximum possible magnitudes, in comparison with values observed in other regions with similar tectonic and geologic features.
- e) Seismological information in other regions with similar tectonic and geologic features.

The significance of all this information about the type and parameters of the stochastic model adopted to represent seismicity shall be assessed by means of adequate probabilistic concepts, and the uncertainty associated with the estimated model and parameters shall be evaluated and expressed in quantitative terms.

It is well known that statistical records about time, coordinates and source parameters of earthquakes are often insufficient for deriving seismicity models and estimating their parameters. Information from different sources such as concepts a) - c) in this requirement can be assimilated through the criteria and methods of Bayesian statistics. The result of applying these criteria to a given seismic source is a probability distribution associated with a set of alternate hypothetical models of the seismicity of that source.

3.3. Reliability

3.3.1 Decisions about design intensities, safety elements, system requirements and performance criteria should be established on the basis of acceptable reliability level and cost-benefit analysis. The acceptable reliability level is determined by the probability of satisfactory behavior with respect to modes implying collapse and the cost-benefit analyses are based on optimizing a utility function involving the algebraic sum of initial investment and present value of expected benefits and economic consequences of failure and damage.

3.3.2 The reliability of a structural system for earthquake actions in the probability of satisfactory behavior during a reference time interval. In practical cases it can be measured by its complement, the probability of failure during a reference time interval or by a annual failure rate.

3.3.3 In systems with multiple failure modes and potential damage levels the reliability is measured by the failure probability and rate for the different modes and by the expected cost of damage per unit time.

3.3.4 For a given structure with known properties the probability of failure in a reference time interval can be obtained by standard

methods of probability theory taking into account the following concepts:

- a) Probability distribution of maximum response for an earthquake with given intensity and frequency content.
- b) Probability of occurrence of earthquakes with different intensities and frequency content characteristics at a site.
- c) Value of the capacity of a structure expressed in the same type of variables as the response.

3.3.5 For a given structure with known properties the failure rate and the expected cost of damage per unit time can be obtained by standard methods of probability theory taking into account the following concepts:

- a) Probability distribution of maximum response for an earthquake with a given intensity and frequency content.
- b) Expected cost of damage for a given intensity and frequency content.
- c) Intensity-recurrence curves at the site.
- d) Value of the capacity of the structure expressed in the same type of variables as the response.

3.3.6 Uncertainty in structural properties must be incorporated in the estimation of failure probabilities and rates, and of expected cost of damage. This can be accomplished by computing an expected value of the quantities obtained in accordance with 3.3.4 and 3.3.5 with respect to the probabilistic distribution of structural properties.

4. CODE STRUCTURE AND FORMAT

4.1 Elements of a seismic design code

4.1.1 In order to guarantee the correct interpretation and the efficient application of the provisions, a seismic design code must include in its text or in a complementary document clear statements about its objective, principles, range of applicability and limitations.

Neither the objectives nor the limitations of seismic design rules are usually explicit in design codes, and hence they are not always present in the mind of those who apply design prescriptions to practical problems. The accuracy of conventional criteria for predicting structural response is strongly dependent on the type of system considered. For instance, base shear coefficients and design response spectra are taken as measures of response parameters, as the latter are by tradition expressed in terms of accelerations and equivalent lateral forces on structural systems. These variables, however, are no more than indirect measures of system performance during earthquakes. They serve to control the values of more significant variables, such as lateral deflections of actual non-linear systems, overall and local ductilities, and safety margins with respect to instability failure. This explains why in seismic design, more than in any other field of engineering, it is easy to carry out a strict -- but blind -- application of the most advanced regulations and yet to produce a structure bound to perform poorly.

4.1.2 A seismic design code must include the following among its objectives:

a) To provide adequate safety levels with respect to collapse in the face of exceptionally intense earthquakes.

- b) To provide adequate safety levels with respect to damage to adjacent constructions.
- c) To protect structures against excessive material damage under the action of moderate intensity earthquakes.
- d) To insure simplicity of repair, reconstruction or strengthening work in case damage takes place.
- e) To provide protection against the accumulation of damage during series of earthquakes.
- f) To preserve safety and comfort of occupants and of public in general, by ensuring that structural response during moderate intensity earthquakes will not exceed prescribed tolerance levels, and that panic will not occur during earthquakes of moderate and high intensity, particularly in buildings where frequent gathering of people is expected.

Achievement of the foregoing objective requires much more than dimensioning structural members for given internal forces. It implies explicit consideration of those objectives and of the problems related to non-linear structural response and to the behavior of materials, members and connections when subjected to several cycles of high load reversals. It implies as well identifying serviceability conditions and satisfying adequate acceptance criteria with respect to them.

4.1.3 Detailed provisions should include general criteria and specific rules. The general criteria should stimulate creative engineering solutions within stipulated levels of safety and economy, while the specific rules are intended for routine practice.

4.1.4 General criteria should cover system requirements as well as design and performance criteria.

4.1.5 Specific rules should cover design and performance criteria.

4.1.6 The concepts required for efficient and unambiguous application of general criteria and specific rules can be grouped as follows:

- a) Seismic zoning and micro-zoning.
- b) Classification of structures.
- c) Design actions.
- d) Structural analysis.
- e) Acceptance criteria.
- f) Non-structural elements.
- g) Repair and strengthening of existing structures.

4.2 Seismic zoning and micro-zoning

4.2.1 The establishment of seismic zones and of the corresponding design actions should be done in agreement with a criterion of optimizing under the restrictions of maximum tolerable risk levels a global utility function integrated by the utility functions of all structures to be built in each seismic zone in compliance with the design code considered.

Intensity-recurrence curves and dominant frequency content characteristics of earthquakes may vary systematically within each seismic zone. If constant design actions are to be specified for given local conditions within a seismic zone, those actions should lead at all locations to acceptable values of risk. Furthermore, some structure would be safer and other less safe than optimum, but the sum of all the utility functions should be optimized under the restrictions of maximum tolerable risk levels. The IAEE publication on "Basic Concepts of Seismic Codes" Volume I describes the concepts regarding "Seismic Zoning" and may be referred to for further information.

4.2.2 Because the characteristics of earthquakes are strongly influenced by ground conditions, design actions for a given seismic zone

should refer to standard ground conditions.

Standard ground conditions involve both mechanical properties of materials and topographic configuration. For the sake of uniformity of criteria among different regions and countries it is convenient to take, as standard conditions, firm ground and flat topography.

4.2.3 As an alternative to the adoption of a discrete set of seismic zones with constant design actions on standard ground conditions at each zone, those actions can be specified as continuous functions of geographical coordinates.

4.2.4 Micro-zoning provisions should include the following:

- a) Maps of micro-zones including the corresponding seismic design excitations, where formulation of these maps is warranted by adequate knowledge about local ground conditions and their possible influence on the characteristics of surface ground motion.
- b) Criteria for obtaining seismic design actions on non-standard ground conditions from those on standard conditions where provisions as described in the foregoing paragraph are not available.

4.3 Classification of structure

4.3.1 For the purpose of specifying applicable design actions, methods of structural analysis and acceptance criteria, structures should be classified in accordance with the following:

- a) Type of intended occupancy.
- b) Type of variables that define response and control behavior.

The type of intended occupancy is closely related to the expected magnitude of the consequences (both monetary and of

other kinds) and therefore to the tolerable risk level.

The type of variables that define response and control behavior determines structural analysis methods and acceptance criteria. For instance, the behavior of building frames and industrial bents is determined by local non-linear deformations (ductility demands) and slenderness effects, and that of retaining walls and earth embankments by cumulative deformations and sliding of large soil masses. In the former case the response can be estimated by means of static or linear dynamic analysis, provided the structure does not show excessive irregularities; in the case of retaining walls and embankments, explicit consideration of non-linear behavior and of the tendency of inelastic deformation to accumulate in the downhill direction is nearly indispensable when dealing with very important systems.

In buried structures response and behavior are determined by the local deformation that results from the interaction of soil and structure upon the arrival of seismic waves. Structural analysis methods and verification criteria suitable for these structures differ widely from those valid for the cases discussed above.

- 4.3.2 For each type of structures classified in accordance with 4.3.1 b), a subclassification may be necessary in order to account for a possible influence of structural irregularities on the occurrence of special response effects and on the capability of different methods of response analysis for making reliable prediction of those effects.

According to the foregoing paragraph, the classification of a structure for the purpose of specifying design actions

depends not only on its type of response, but also on the uncertainty attached to its prediction. The latter depends on the method of analysis, and therefore the classification is based not only on intrinsic properties of the system, but also on the criteria used to predict response and control behavior. For instance, the displacements of a reinforced concrete frame where all the stories with the exception of the ground floor have been overdesigned for seismic shear can be predicted with the same reliability as those of a similar frame designed for uniform safety factors along its height, if detailed time-histories of response are obtained by suitable numerical integration methods and if the stress-strain curves of materials and members are represented with sufficient accuracy. There is no need to use different classifications for these two cases, provided response is predicted by the mentioned methods and acceptance criteria are expressed in terms of local ductility demands. However, if response is predicted by means of static or linear dynamic analysis and acceptance criteria are expressed in terms of lateral shears or internal forces, the frame with the uniform safety factor may be designed for lower lateral forces or response spectra than that with the overdesigned upper stories. In practice, this is accomplished by assigning those structures to different groups, each characterized by its corresponding ductility reduction factor.

- 4.3.3 The response and the verification criteria for structures the behavior of which is determined by local ductility demands and slenderness effects can be expressed in terms of lateral force coefficients or linear response spectra reduced to account for their nominal ductility factors, K . They can be classified in terms of permissible values of K , and this classification shall

take into account the following concepts:

- a) Type of materials.
- b) Type of joints and connections.
- c) Relative values of the safety factors with respect to ductile and brittle failure modes including local buckling as well as with respect to failure of members and connections.
- d) Irregular distributions of mass, stiffness and strength.

The relative values of the safety factor with respect to ductile and brittle local failure modes determine the ductility of the system as a whole. Some types of members are prone to have lower safety factors with respect to brittle modes than with respect to ductile modes, unless special precautions or performance rules are adopted in order to accomplish the opposite. This may occur, for instance, in a member subjected to bending and shear, when the depth of its cross section is greater than about one fourth of its length.

4.4 Design actions

4.4.1 Seismic design actions shall be represented by models chosen in accordance with 2.2.1. The type of model adopted and the intensity of the action shall be made to depend on the classification of each structure, in accordance with 4.3.1 a) and 4.3.2. They shall account for the energy-dissipation capacity of each type of structure, the uncertainty arising from methods used to predict response and the relation between response and behavior, and they shall lead to the intended reliability level.

4.4.2 In addition to single-component ground motion model and design intensity, the specification of design actions must include the following:

- a) Loading situations to be analyzed.
- b) Definition of the characteristics of the significant ground motion components that must be considered simultaneously, and criteria for superposing their contributions for each design situation.
- c) Probability levels or nominal design values of live loads to be considered in each design situation. This specification must include both upper and lower bounds of unfavorable values.

Loading situations may include one or more design intensities, and they must aim at attaining the intended reliability levels for different failure and serviceability limit states.

When design actions are represented by time histories or stochastic process models, the criterion for superposing their contributions is simple: the response must be obtained for the simultaneous action of all the ground motion components. When design actions are represented by lateral force coefficients or response spectra corresponding to a set of orthogonal directions, the fact that the maxima of a response variable associated with the various components are not reached simultaneously can approximately be taken into account by establishing a number of load situations: for each situation the maximum response associated with one of the components is taken with its full magnitude, while reduced values of the corresponding maxima are adopted for the others.

Lower most unfavorable values of live loads sometimes give place to the critical loading situation with respect to overturning failure modes.

4.5 Structural analysis

- 4.5.1 The methods specified for predicting the seismic response of different types of structures shall be consistent with the importance of each structural type, in accordance with 1.2.
- 4.5.2 Acceptable principles and methods for stress analysis of structures and foundations shall be stipulated. The specifications shall state the types of deformations to be taken into account as well as the need to satisfy the conditions of equilibrium, continuity and compatibility. They shall also include provisions as to the constitutive laws of materials and members and to the permissible limits of stress redistribution.

Although obvious, some of the foregoing conditions are not always satisfied in practice: a continuous stress path from all lateral forces to the foundation is not ensured for instance in some structures where the roof system is not specifically designed to transmit its lateral forces to the vertical frames. Similarly, deformations of horizontal diaphragms are neglected for the purpose of distributing lateral shears among vertical frames, thus leading in some cases to gross underestimate of local internal forces.

These conditions are so important that detailed specifications covering the most frequent practical problem are highly desirable.

- 4.5.3 Approximate criteria must be stipulated in detail for the prediction of some special effects which are usually encountered, but whose prediction by refined methods is not practical. The following are some of those effects:
- a) Local accelerations for design of appendages and other elements, as well as their anchorage.

- b) Criteria for reduction of overturning moment.
- c) Dynamic torsion.
- d) Slenderness effects.
- e) Deformability of horizontal diaphragms.

4.6 Acceptance criteria

- 4.6.1 To each type of structure shall correspond a set of verification criteria expressed in terms of the variables adopted to describe response, herein designated as control variables.
- 4.6.2 The ranges of acceptable values of control variables shall be determined so as to ensure that the probability of failure of each structure within a reference time interval, as defined in 3.3.4, and the expected cost of damage per unit time, as defined in 3.3.5, shall be smaller than the corresponding specified limits.
- 4.6.3 Verification criteria for the design of the structure the behavior of which is determined by local ductility demands and instability effects can be expressed in terms of the following concepts:
- a) Load factors for the superposition of vertical loads and seismic response.
 - b) Criteria to determine allowable values of internal forces at critical sections.
 - c) Criteria to determine allowable actions on joints and connections.
 - d) Criteria to determine the influence of slenderness effects on stresses and internal forces.
 - e) Lateral deformations due to the design earthquake.
 - f) Criteria to determine allowable values of the capacity of foundations under the combination of vertical and lateral forces.

When the strength at a story for the resultant shear, torsion or overturning moment is provided by a small number of resisting members, it may be convenient to decrease the allowable values of stress and internal force, in order to reach the same reliability levels as when a large number of resisting members exist. Alternatively, design action intensities may be raised and allowable values of internal force left unmodified.

Acceptable lateral deformations must be made to depend on the manner in which non-structural elements are attached to the structure.

When static or linear dynamic analyses are applied, approximate values of lateral deformations must be obtained multiplying those resulting from linear response analysis by the assumed ductility factor.

The values so obtained must be corrected in order to account for the slenderness effect.

4.7 Non-structural elements

4.7.1 Elements not considered in the analysis as part of the structural system shall be attached to the structure so as not to produce undesirable interaction forces.

4.7.2 Non-structural elements and their attachment to the structure should be designed so as to limit damage on those elements as well as to limit danger to occupants and public in general.

Glass breakage may be a significant hazard for pedestrians. Therefore, special precautions should be taken to avoid it.

4.7.3 Non-structural elements may be checked for seismic forces due to out-of-plane motion.

4.8 Repair and strengthening of existing structures

The specifications for repair and strengthening of existing structures should be determined on the basis of quantitative studies that consider tolerable failure probabilities and economic constraints. Those specifications should be consistent with the results of ad-hoc cost-benefit studies.

REPORT NO.
UCB/EERC-91/15
JULY 1991

EARTHQUAKE ENGINEERING RESEARCH CENTER

DESIGN GUIDELINES FOR DUCTILITY AND DRIFT LIMITS:

REVIEW OF STATE-OF-THE-PRACTICE AND
STATE-OF-THE-ART IN DUCTILITY AND DRIFT-BASED
EARTHQUAKE-RESISTANT DESIGN OF BUILDINGS

by

VITELMO V. BERTERO

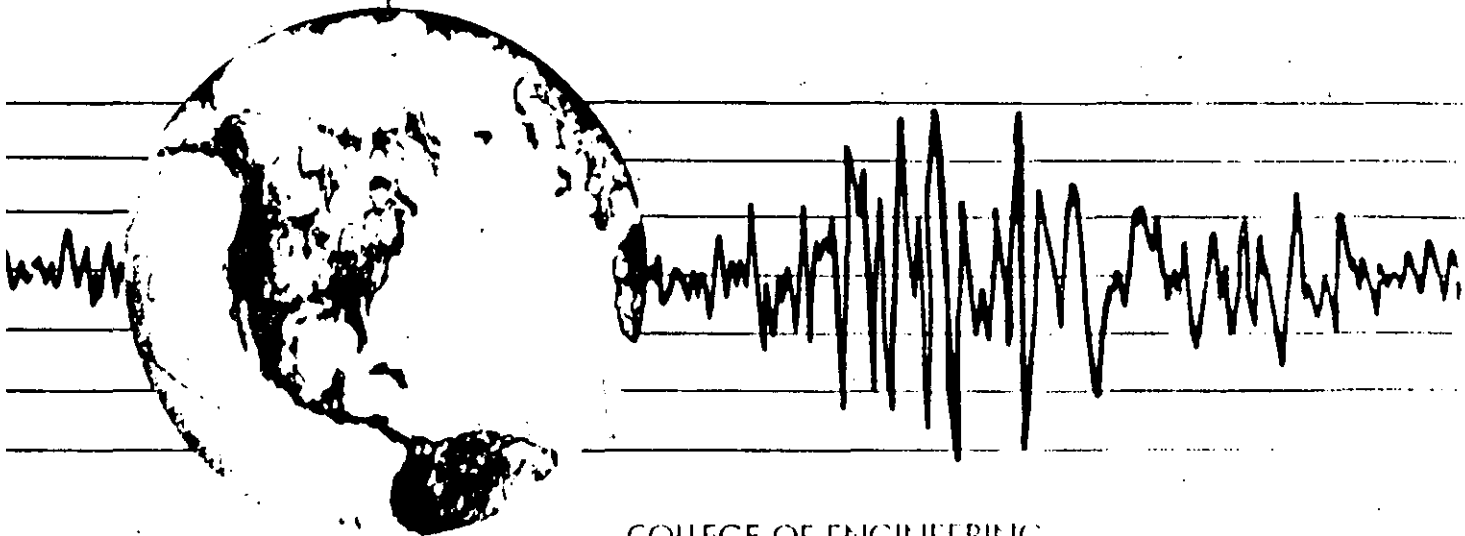
JAMES C. ANDERSON

HELMUT KRAWINKLER

EDUARDO MIRANDA

THE CUREe AND THE KAJIMA RESEARCH TEAMS

A Report to Sponsor: CUREe-Kajima



COLLEGE OF ENGINEERING
UNIVERSITY OF CALIFORNIA AT BERKELEY

CHAPTER SEVEN

SUMMARY, CONCLUSIONS AND RECOMMENDATIONS

7.1 SUMMARY

In this research project the state-of-the-practice and of-the-art in the use of the concepts of deformation, ductility, ductility ratio, drift, and interstory drift indices for attaining efficient Earthquake-Resistant Design (EQRD) of structures are reviewed.

After a discussion of the advantages of using an energy approach for the EQRD of structures and a clarification of the differences between deformation, ductility and ductility ratio, the needs for providing structures with the largest ductility economically feasible and for controlling the interstory drift index are discussed in detail. The need for establishing more reliable design criteria for EQRD of structures is also discussed.

The state-of-the-practice and -of-the-art of EQRD of buildings are reviewed, beginning with a review of the problems in design and construction of EQ-resistant structures, followed by a review of present building seismic codes, with emphasis on how the concepts of **Displacement Ductility Ratio, μ_δ** , and **Interstory Drift Index, IDI**, are used, and how they could be used, to improve the state-of-the-practice according to present knowledge. The review covers the building seismic codes of the U.S., Japan, Mexico D.F., New Zealand, and Europe (ECCS and CEB).

Based on a review of the problems encountered in the design and construction of EQ-resistant buildings, research, development and educational needs to improve present knowledge and particularly state-of-the-practice are formulated.

7.2 CONCLUSIONS

From the studies conducted and the results presented in this report, the following main observations can be made regarding the use of ductility and drift limits in EQRD.

Although the advantages of using plastic deformations of the structural material to dissipate part of the seismic Energy Input (E_p) to the structure and the need for limiting the lateral interstory drift have been recognized in the literature, their implementation, particularly their reliable quantification, has not been accomplished fully in present seismic design codes.

While it is possible to use the concept of ductility in a vague manner in discussing the philosophy of ductility-based design, when such philosophy has to be applied in the EQRD of structures the philosophy has to be quantified, and it is therefore necessary to use unambiguous parameters.

Although displacement ductility factors, μ_δ , provide good indications of structural damage, they usually do not adequately reflect the damage to nonstructural components. To produce safe and economical structures, seismic design methods must incorporate drift (damage) control, in addition to lateral displacement ductility, as a design constraint.

Conventionally computed story drifts may not adequately reflect the potential structural and nonstructural damage to multistory buildings. A better index is the tangential story drift index, R_T .

Although the general philosophy of EQRD is well established and is in complete concordance with the concept of comprehensive design, current code design methodologies fall short of realizing the objectives of the general philosophy. While the statement of the general philosophy indicates the need to consider three different limit states (criteria for levels of earthquake, i.e., service, damage control or operational, and safety or survival), in practice, design is typically only carried out for one criterion (usually safety); on the assumption that the other two will be satisfied automatically.

The growing concern over the costs of earthquake damages (direct, functional, and indirect) points out the need that more attention be given to control of serviceability and functionality, i.e., control of damage.

Achievement of reliable and efficient EQRD requires satisfaction not only of the criteria for strength and toughness, but also the criteria for deformation and repairability. Strength, toughness, deformation control and repairability are interrelated and hard to define.

The following three main problematical areas have been identified in the earthquake-resistant design of structures: (1) Establishment of reliable **critical earthquake input (design earthquakes)**; (2) determination of the **demands** on the entire soil-foundation-superstructure and nonstructural components system; and (3) prediction of the **real capacities (supplies)** to the building at the moment that an earthquake strikes.

While a sound preliminary design and reliable analysis of this design are necessary, they do not ensure an efficient earthquake-resistant structure. The seismic response of a structure depends not only on how it has been designed, but also on how it has been constructed and maintained (monitored and preserved) up to the moment that the earthquake occurs. There is a need to improve the construction and maintenance practices of structures.

There are several sources of uncertainty in code-specified procedures for the estimation of demands, which can be grouped into two categories: (1) specified seismic forces; and (2) methods used to estimate response to these seismic forces.

Strength Demands. For regular buildings up to a certain height (240 ft. in the U.S.), most of the codes in the world recommend the use of equivalent (static) lateral seismic forces, which are expressed as a base shear $V = (C_{sp}/R)W$, where C_{sp} is the seismic coefficient equivalent to a SLEDRS (Smoothed Linear Elastic Design Response Spectra) for acceleration, S_g/g , and R is the reduction factor. Although in most codes the value of

R is given without any explicit reference to global displacement ductility ratio, μ_g , these values depend implicitly on μ_g .

- **Structural response** is usually estimated using linear elastic analyses of the effects induced by the equivalent static forces or by these forces multiplied by load factors, depending on whether the design will be performed using allowable (service or working) stress, or the strength (load and resistance factor) design method.
- There are few countries in which codes recommend the use of limit analysis and limit design methods (plastic design methods).
- **Stiffness and Drift Demands.** Most seismic codes address design for lateral stiffness and for drift at service level. Only a few codes explicitly require that the contributions of torsion should be considered in estimating the maximum lateral drift, and very few give any guidelines regarding how to deal with the effect of multicomponents of seismic excitations. Few codes give explicit requirements or recommendations regarding how to estimate P- Δ effects. There is a need for more rational code procedures for estimating the demands regarding the stability effects at ultimate limit states.
- **Strength Supplies.** Most of the Reinforced Concrete (RC) EQRD codes require that the supplied strength be estimated using the strength method, in which the required strength of critical sections are evaluated as a function of just the minimum specified strength of the materials, and then reduced by a strength (resistance) factor. There are a few codes in which the design and detailing of the critical regions of the structure are based on the probable supplied strength capacity to the members and to their connections and, therefore, to the entire structure. The state-of-the-practice as reflected by most present EQRD codes for RC buildings does not appear to include the use of the concept of energy dissipation capacity in a rational and reliable way through the use of the μ_g .

- **Stiffness, Deformation and Stability Capacities.** Most of the RC codes give only empirical expressions to estimate the so-called "effective linear elastic stiffness"; they do not specify how to evaluate the change in stiffness of the whole soil-foundation-superstructure and nonstructural components system induced by increasing damage. There is a need to develop code procedures that will lead to estimation of the global deformation capacity of the structure not only under monotonically increasing deformation, but also under generalized (repeated reversal) deformation. This should be done based on the supplied local energy dissipation capacity of the structural members (rotational ductility ratio and degradation with repeated cycles, i.e., local hysteretic behavior).
- Present practice emphasizes the use of strength as the primary criterion for preliminary EQRD. While preliminary design based on shear strength could be justified where serviceability controls, it cannot be accepted in cases where the design is controlled by the ultimate (safety) limit state where plastic deformation is accepted. At safety limit state (mechanism formation and mechanism movement), base shear is insensitive to variation of deformation and, therefore, to damage. Although there have been some proposals to base preliminary design on only lateral stiffness, i.e., on only controlling the interstory drift, a practical method of this type of design has yet to be developed. A more rational approach is one which not only recognizes the importance of strength and stiffness (control of deformation), but also recognizes that while these two factors are strongly interrelated in the case of elastic response, they are less strongly interrelated in the case of inelastic response. To control inelastic deformation, however, it is necessary to provide the structure with a minimum yielding strength. Therefore, to achieve an efficient preliminary EQRD there is a need to consider two requirements simultaneously: the strength, based on the rational use of μ_{δ} (hysteretic energy); and the deformation, based on the limitation of IDI.
- The future of EQRD is an energy approach in which the concept of μ_{δ} is used in the derivation of IDRS through statistical and probabilistic analyses of the IRS

corresponding to all available recorded or expected critical ground motions at the building site, and design is conducted using limit design methodology with proper consideration of the possibility of shakedown phenomena.

For the immediate or very near future the following compromise solution is recommended. Use design forces obtained from SLEDRS reduced by reliable reduction factor R . The values of R must take into account the reductions due to hysteretic behavior (μ_δ), changes in damping and in the fundamental period of vibration of the whole building system, and the real overstrength. The R should be period and site condition dependent.

Ideally, the use of either of the above methods should be complemented with time history nonlinear dynamic analyses of the response of the preliminarily designed building system to the predicted **Maximum Credible Earthquake (MCEQ)**, ground motions that can occur at the site. If this is not possible, the least that should be conducted is a static nonlinear analysis of the building under monotonically increasing lateral loads.

To control damage, it is necessary to control deformations. **Control of Interstory Drift Index, IDI, at Serviceability Level:** Present seismic codes specify acceptable limits of IDI that vary from 0.0006 to 0.006. Although the estimation of IDI at the service level is usually based on linear elastic analyses, there are many uncertainties regarding the effective stiffness of the structural members, the deformation of the foundation, and the contribution of the nonstructural components. Analysis of the deformations should be based on a realistic 3-D model which considers properly the effect of torsion under multicomponents of ground motions.

Control of IDI at the Safety Limit State. According to present seismic codes, the acceptable maximum IDI to control damage varies with the type of structure and its function, usually varying from 0.01 to 0.03. The IDI spectra demands can be estimated based on the IDRS for strength for the adopted μ_δ . The problem in using these IDI spectra is in making a reliable estimate of the effective period, T . This is so because of

the difficulties in estimating the effective lateral stiffness. The seismic design codes are not specific about how to estimate the stiffness of members. In the case of RC structures, this is a difficult task. Although some rules have been formulated for estimating the lateral stiffness of buildings, the real lateral stiffness varies with the level of deformation.

Most of the practical methods that have been recommended for design considering IDI have been based on the assumption that the nonlinear displacement response is equal to the linear response spectral values provided that the system has certain minimum yielding strength. Recent studies have shown that the nonlinear displacements are very sensitive to the dynamic characteristics of the ground motions, and in some cases the displacement can be significantly higher than those computed from a linear elastic response. Empirical formulas have been suggested to estimate the deflection amplification factor C_d defined as the ratio of absolute maximum interstory displacement to the corresponding value from a linear time history analysis.

Seismic components and their input direction can significantly affect the response of a torsionally sensitive structural system. Ground components applied at the structural reference axes may remarkably underestimate the response because the structural maximum response is dependent on the seismic input direction and its magnitude.

Code Comparison. In judging the results obtained from the comparison of different codes, it is necessary to keep in mind that it is not enough just to analyze the code requirements of the seismic forces and minimum stiffness or maximum acceptable IDI to be used in the design. The designed structure and the seismic behavior of the actual structure are not solely the result of specified seismic forces and IDI, but are governed by the overall design philosophy and the complex combination of the forces and IDI with many other factors such as: The satisfaction of code material requirements; the construction technology; and the maintenance or preservation of the entire soil-foundation-superstructure and nonstructural components system. Furthermore, the seismic forces in the code of one country reflect the seismicity as well as the seismic risk of that country, and these factors

vary considerably not only from one country to another, but even from one region to another within a country.

Except for UBC, all the codes reviewed herein consider that portions of the live loads are seismically reactive and are included in the computation of the seismic forces.

For strength (ultimate or capacity) design there are significant differences in the values specified by the different codes for the load factors as well as the ways the loads are combined.

The codes reviewed herein are strength-based rather than ductility and damage control-based, and with the exception of the Japanese BSL, advocate a single level design.

Although the UBC and New Zealand NZS code recognize in their material specification the possibility for overstrength, the only code that explicitly recognizes and accounts for **overall structural overstrength** due to inelastic redistribution of forces is the ECCS.

Although most of the seismic codes that have been reviewed permit damage that will not jeopardize human life, **none explicitly defines what constitutes acceptable damage**. Most of the codes recognize that the level of acceptable damage has to be different for different types of facilities depending on its occupancy type or function. Quantitatively, this is accomplished by increasing the seismic forces through an importance or risk-to-life factor. However, the values adopted for this factor seem to be very low, and it appears to be incompatible with the fact that essential facilities and those housing very hazardous materials should remain practically elastic. The values for the occupancy factor, specified by the different codes reviewed herein, varied from 1 to 2.

Code Specified SLEDRS. For buildings with a fundamental period of $T \geq 2$ secs. and located on firm soil, the U.S. and Japan have similar required SLEDRS which are somewhat smaller (up to 20% for $T = 3.0$ sec) than the NZS. For buildings with $T > 2.0$

sec and up to $T = 4$ sec located on very soft soil (soft clay, UBC type S_4 or Zone III of Mexico City), the UBC specifies the most severe SLEDRS, and the CEB has the least demanding SLEDRS.

Use of μ_s to Reduce SLEDRS to SIDRS. All codes except the Mexico Code use a constant reduction factor, i.e., independent of the T of the structure. **Site with Firm Soil:** The largest reductions are those in the UBC. The Japanese BSL uses the smallest reduction (3.3). The BSL reduction is based on the energy dissipated only by cracking and local yielding since it does not allow the yielding of the structure as a whole system (mechanism movement). For tall buildings with $T > 1.5$ sec and up to $T = 3.0$ sec, the SIDRS specified by the Japanese BSL is more than 33% higher than any one of the other SIDRS. **Site with Soft Soils (Type S_3):** The largest reduction is that recommended by UBC which is 8.6, and the smallest is that specified by the Japanese BSL (3.3). For tall buildings with a $T > 1.7$ sec and up to $T = 3.0$ sec, the yielding strength required by BSL exceeds by more than 30%, 82% and 121% those specified by the Mexican D.F., CEB and NZS codes respectively. The yielding strength required by UBC for tall buildings having $T > 2.0$ sec is the lowest one of all the codes considered herein.

Use of IDI Limitations in EQRD. Although all of the seismic codes reviewed herein have regulations limiting the maximum IDI for limit states, none of these codes have recommendations regarding how the limitations should be directly introduced into the preliminary EQRD of a building structure. The IDI limits specified by codes are checked by analysis of the already finished preliminary design of the structure.

Minimum Lateral Stiffness and Acceptable Limits on IDI at Serviceability Levels. **Short T ($T < 0.3$ secs.):** The NZS requires the largest lateral stiffness and therefore, should result in better damage control under service EQs. This is specifically true in cases when nonstructural elements can be damaged: $IDI \leq 0.0006$ which is 1/2, 1/4 and 1/6 of those specified by CEB, BSL and UBC respectively. **Long T ($T > 1.6$ secs.):** In the case of buildings located on firm soils, the results regarding the maximum acceptable IDI limits

are similar to those for short T. For buildings located on soft soil, the Mexican D.F. code requirements become as severe as the NZS.

Maximum Acceptable IDI at Ultimate Limit States. The Mexico D.F. code explicitly specifies that the maximum IDI shall not exceed the values of 0.006 and 0.012, depending on whether or not the nonstructural components can be damaged. The UBC implicitly specifies that the IDI shall not exceed the values of 1.5% in the case of buildings less than 65 feet in height and 1.125% for buildings greater in height. Although the Japanese BSL does not specify any limit for the IDI at the Safety Level, in practice the Japanese designers limit the IDI to 0.01. These limits are a consensus judgment from experience based on observations and analyses conducted during previous EQs. Compliance with these limits will ensure not only human safety, but also damage control, provided that these limits are connected with a minimum required yielding strength. The minimum UBC required yielding strength seems to be too low. Thus, design of tall buildings attempting to provide only this minimum strength will undergo, in the case of severe EQ ground motions, significantly larger IDI than the maximum acceptable by the code.

Efficient EQRD. Achieving an efficient EQRD requires an iterative process. It is necessary to start with an efficient preliminary EQRD. To carry out this preliminary design, it is necessary first to establish reliable design equations.

There is an urgent need to develop a reliable preliminary EQRD procedure based on two-level design EQs, in which the following two limit states are considered: Functional serviceability under frequent ground motions, and survivability and control of damage under a rare but possible severe EQ ground motion.

To enable development of reliable procedures for establishing a two-level EQRD, it is necessary to conduct statistical and probabilistic analyses of available data regarding what can be considered service and safety EQ ground motions, and then to develop reliable

SLEDRS and SIDRS that consider the LERS and IDRS, respectively, of all available recorded or predicted motions at these two levels of EQ ground shakings.

Because reliable measured data on EQ ground motions at different sites (soil profile and topography) was scarce until 1987, design spectra are currently formulated using inadequate statistical information.

SIDRS for Strength, C_y . For any given site, the ideal solution is to derive the SIDRS directly from statistical and probabilistic analyses of the IRS corresponding to all recorded motions at the selected site or at similar sites located in tectonically similar regions and even of records derived through the use of theoretical considerations.

The shape of the IRS (i.e., the variation of C_y with T) varies significantly depending on the predominant frequency (or period T_g) of the recorded ground motion, which in turn depends on the site soil profile and topography from which the record was obtained.

There is significant reduction of the LERS (i.e., for $\mu = 1$) produced by yielding ($\mu > 1$) for structures with a T coinciding with or very close to the predominant period (T_g) of the ground motion. The longer the T_g , the larger seems to be the deamplification.

The degree of reduction of the LERS due to $\mu > 1$ decreases as T deviates from T_g and tends to zero as T tends to zero.

Because of the uncertainties in estimating the values of T_g and T , caution should be taken in applying in practice the observed reduction of the LERS due to $\mu > 1$ when $T/T_g = 1$.

For sites on firm or medium stiff soils (types S_1 and S_2), there are already several recorded ground motions whose IRS exceeds the SIDRS adopted by the codes reviewed herein. This is true even in cases of $\mu = 6$ which is not only very difficult to achieve (supply), but also very difficult to justify its possible use because of the damage that will be involved.

For soft soil sites (soil profile S_3 or S_4), particularly with soft clays whose depth exceeds 40 ft, from the IRS corresponding to recorded ground motions which can resist and transfer ground acceleration of 0.30 g to the structure foundation, it appears that the SIDRS corresponding to the C_y adopted by all codes will be exceeded even when a $\mu = 6$ could be supplied and used. The only exception is the SIDRS specified by the Japanese BSL for low and medium-rise buildings of perhaps up to 20 stories.

Code Procedures to Determine SIDRS for C_y . The SIDRS for C_y specified by codes are obtained by deamplifying LERDS through the use of a reduction or behavior factor. Although this factor depends on μ , it is difficult to judge the rationale for the values recommended in the codes.

The values recommended by the UBC (i.e., R_w) appear too high, particularly for structures with a $T < T_g$ if the designer attempts to design the structure with the strength required by the code: The value for the reduction factor should be tied to other requirements besides the value of μ . The values of the reduction factor should be affected by the real strength capacity, i.e., the overstrength above the yielding strength specified by the code.

For structures designed according to UBC, the required overstrength depends on the μ , T , soil conditions and design methodology.

In the case of structures located on rock or firm alluvium, the required normalized overstrength has the largest values for T in the range of 0.1 to 0.5 sec and varies from 0.47 for $\mu = 2$ to 0.27 for $\mu = 6$. The corresponding required Reduction for Overstrength, R_{ov} , varies from 3.6 to 2.1.

In the case of very soft soils, the longer the value of the predominant period of the ground motions, T_g , the larger is the range of the period of the structures, T , for which significant overstrength is required. The normalized overstrength for a T of 0.9 sec can vary from

1.23 for $\mu = 2$ to 0.58 for $\mu = 6$ and the corresponding R_{ovs} varying from 3.84 to 1.81. The R_{ov} for a T of 2.0 sec can vary from 6.77 for $\mu = 2$ to 1.78 for $\mu = 6$.

- U.S. low-rise buildings usually have large seismic overstrength with respect to that required by U.S. codes. The taller the building, the smaller the overstrength is. Thus, it appears that the medium-rise buildings (particularly those located on sites with very soft soils) are the ones that have to be suspected of becoming a serious threat to life and incurring large economic loss in case of a major EQ, or both.

7.3 RECOMMENDATIONS

7.3.1 Recommendations for Improving Code SIDRS for Strength, C_y

- Develop a more reliable SLEDRS.
- Develop more reliable methods for estimating the values of the reduction factor. This requires more precise definition of this factor. Although the values of the reduction factor are affected by several parameters, the main two are the energy dissipated through hysteretic behavior (damping ratio ξ and particularly μ) and the real overstrength.
- The ideal solution is to attain reliable SIDRS directly from the recorded or analytically derived ground motions or both. This will eliminate the need for specifying R_μ . Therefore, for the proper use of these SIDRS, what remains is to calibrate the real strength (overstrength) of structures that are designed according to present code.
- There is a need to consider in the inelastic design of structures the effects of the duration of strong motions which include the accumulative ductility and number of yielding reversals. This can be accomplished through the use of an energy approach estimating the critical required Hysteretic Energy, E_{H1} .

- There is a need to find reliable factors that will permit the use of the computed SIDRS for SDOF systems to design MDOF systems.
- As it is very difficult to design MDOF structures that will develop uniform story μ_g throughout its height, there is a need to investigate a possible concentration of required μ_g at one or more stories and to establish the yielding overstrength required to limit the maximum μ_g to the target ductility used in the design based on SDOF system.

7.3.2 Recommendations for Improving SIDRS for Lateral Displacement and IDI. Nonlinear displacements are very sensitive to the dynamic characteristics of the ground motions and of the structure, and they can be significantly different from those obtained based on linear behavior.

- For ground motions with long T_g , the nonlinear displacement can be significantly (nearly 50%) smaller than the linear displacement for structures with $T \approx T_g$. On the other hand, for values $T < 2/3T_g$, the nonlinear displacements are significantly higher. The smaller the T/T_g ratio, the larger the difference is, and it tends to be proportional to the value of μ .
- Based on derived SIDRS for strength of SDOF systems, formulate SIDRS for displacement of SDOF systems for different ξ and μ .
- Based on the derived SIDRS for the displacement of SDOF systems, obtain lower and upper bounds for the IDI of MDOF systems.
- As it is difficult to achieve a constant IDI throughout the entire height of a MDOF structure, there is an urgent need to investigate (analytically and experimentally) values of an amplification factor by which the SIDRS' lower bound of SDOFS systems should be multiplied to obtain a reliable SIDRS for MDOF systems.

By Eduardo Miranda¹

ABSTRACT: Strength-reduction factors that are used to reduce linear elastic design spectra to account for the hysteretic energy dissipation of the structure are evaluated. The paper presents a summary of results of a statistical analysis of strength-reduction factors computed for single-degree-of-freedom systems undergoing different levels of inelastic deformation when subjected to a relatively large number of recorded earthquake ground motions. Special emphasis is given to the influence of soil conditions. Results indicate that for a given displacement ductility demand, the use of period-independent reduction factors is inadequate. Soil conditions can have an important effect on strength-reduction factors, particularly in the case of soft-soil sites. It is recommended that strength-reduction factors to be used in design be specified as a function of the period and inelastic capacity of the structure, and of at least two types of soil conditions—one for rock and relatively firm sites and another for soft-soil sites. Following these recommendations, simplified expressions to compute strength-reduction factors are proposed.

INTRODUCTION

Due to economic reasons, present design philosophy allows buildings and other types of structures to undergo inelastic deformations in the event of strong earthquake ground motions. As a result of this design philosophy, the design lateral strength prescribed in seismic codes is lower, and in some cases much lower, than the lateral strength required to maintain the structure in the elastic range.

Generally, the design lateral strength is prescribed by means of smoothed inelastic design response spectra (SIDRS). Although recent studies have concluded that a more rational design may be attained through SIDRS that are derived directly from statistical and probabilistic analyses of inelastic response spectra (Bertero et al. 1991; Miranda 1993), SIDRS currently used in design practice are the result of smoothed linear elastic response spectra (SLERS), which are then reduced to take into account the inelastic behavior in the structure.

Reductions in forces produced by the hysteretic energy dissipation¹ capacity of the structure (i.e., reduction in forces due to nonlinear hysteretic behavior) are typically accounted for through the use of strength-reduction factors (sometimes also referred to as inelastic acceleration ratios) or through their reciprocals (typically referred to as deamplification factors). Thus, the assessment of reliable SIDRS derived from SLERS requires a good estimation of the strength-reduction factors.

Strength-reduction factors have been the topic of several investigations. One of the earliest and better known studies on strength-reduction factors is that of Newmark and Hall (1973) in which recommendations were made of reduction factors to be used in the short-, medium-, and long-period spectral regions. Riddell and Newmark (1979) proposed an improved set of reduction factors that was based on a statistical analysis of the response of

¹Res. Engr., Dept. of Civ. Engr., Swiss Fed. Inst. of Tech., CH-1015, Lausanne, Switzerland.

Note. Discussion open until May 1, 1994. To extend the closing date one month, a written request must be filed with the ASCE Manager of Journals. The manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on December 18, 1992. This paper is part of the *Journal of Structural Engineering*, Vol. 119, No. 12, December, 1993. ©ASCE, ISSN 0733-9445/93/0012-3503/\$1.00 + \$.15 per page. Paper No. 5305.

- Xu, K., and Li, T. (1992). "Dynamic characteristics of multiple substructures with close spaced frequencies." *Earthq. Eng. and Str. Dyn.*, 21, 1059-1070.
- Yamaguchi, H., and Harpornchar, N. (1993). "Fundamental characteristics of multiple tuned mass dampers for suppressing harmonically forced oscillations." *Earthq. Eng. and Str. Dyn.*, 22, 51-62.
- Yoneda, M., Fujino, Y., Kanda, H., Yamamoto, A., Miyamoto, Y., Ando, O., Maeda, K., and Katayama, T. (1989). "A practical study of tuned liquid damper with application to the Sakitama Bridge." *J. Wind Engrg.*, 41, 105-106 (in Japanese).

single-degree-of-freedom (SDOF) systems to 10 recorded earthquake ground motions. More recently, Riddell et al. (1989) presented approximate mean strength-reduction factor spectra computed as the ratio of mean elastic spectra to mean inelastic spectra. Nassar and Krawinkler (1991) studied mean reduction factors of bilinear and stiffness degrading systems when subjected to 15 ground motions recorded on firm sites in the western United States. They proposed approximate expressions to compute strength reduction factors as a function of ductility and period of vibration. With few exceptions, previous studies on reduction factors have not considered the influence of local site conditions. The reader is referred to Miranda (1991) for a detailed description of previous studies on inelastic response spectra and on strength-reduction factors.

The influence of soil conditions on reduction factors was first studied by Elghadamsi and Mohraz (1987), who considered ground motions recorded on rock sites and on alluvium sites. This study concluded that deamplification factors are not significantly influenced by soil conditions, and that for a given ductility and frequency one may deamplify the elastic response more for a structure on rock than for a structure on alluvium. Using a stochastic procedure, Peng et al. (1988) computed deamplification factors for rock and alluvium sites. Analogously to the earlier study, this investigation concluded that the effects of local soil conditions on inelastic spectra stem primarily from their effects on elastic response spectra; thus, soil conditions do not significantly influence strength-reduction factors. However, recent studies based on ground motion recorded during the 1989 Loma Prieta earthquake (Miranda and Bertero 1991; Krawinkler and Rahnama 1992) suggest that local site conditions may have a significant effect on strength-reduction factors, particularly in the case of soft soils.

The aim of this study is to improve the estimation of strength reductions in structures that behave inelastically during severe earthquake ground motions. The objectives of this paper are: (1) To study the main factors influencing strength-reduction factors; and (2) to provide approximate expressions that allow a rapid estimation of strength-reduction factors.

STRENGTH REDUCTION FACTORS

The equation of motion of a nonlinear SDOF system subjected to earthquake ground motions is given by

$$m\ddot{u}(t) + c\dot{u}(t) + F(t) = -m\ddot{u}_g(t) \quad (1)$$

where m , c , and $F(t)$ = mass, damping coefficient, and restoring force of the system, respectively; $u(t)$ = relative displacement; $u_g(t)$ = ground displacement; and overdot represents its derivative with respect to time. The initial period of the system is given by

$$T = 2\pi \left(\frac{m}{k} \right)^{1/2} = 2\pi \left(\frac{mu_y}{F_y} \right)^{1/2} \quad (2)$$

where k = initial stiffness of the system; F_y = system's yield strength; and u_y = yield displacement, respectively.

The level of inelastic deformation experienced by the system under a given ground motion is typically given by the displacement ductility ratio, which is defined as the ratio of maximum absolute relative displacement to its yield displacement

$$\mu = \frac{\max|u(t)|}{u_y} \quad (3)$$

An adequate design is produced when the structure is dimensioned and detailed in such a way that the local (story and member) ductility demands are smaller than their corresponding capacities. Thus, during the preliminary design of a structure there is a need to estimate the lateral strength (lateral load capacity) of the structure that is required in order to limit the global (structure) displacement ductility demand to a certain predetermined value, which results in the adequate control of local ductility demands.

The strength-reduction factor (i.e., reduction in strength demand due to nonlinear hysteretic behavior) R_μ is defined as the ratio of the elastic strength demand to the inelastic strength demand

$$R_\mu = \frac{F_y(\mu = 1)}{F_y(\mu = \mu_i)} \quad (4)$$

where $F_y(\mu = 1)$ = lateral yielding strength required to maintain the system elastic; and $F_y(\mu = \mu_i)$ = lateral yielding strength required to maintain the displacement ductility demand μ less or equal to a predetermined target ductility ratio μ_i . Eq. (4) can be rewritten as

$$R_\mu = \frac{C_y(\mu = 1)}{C_y(\mu = \mu_i)} \quad (5)$$

where $C_y(\mu = 1)$ = seismic coefficient (yielding strength divided by the weight of the structure) required to avoid yielding; and $C_y(\mu = \mu_i)$ = minimum seismic coefficient required to control the displacement ductility demand to μ_i . As shown in Fig. 1, $C_y(\mu = 1)$ and $C_y(\mu = \mu_i)$ correspond to ordinates of a linear elastic response spectrum and a constant displacement ductility nonlinear response spectrum, respectively.

For design purposes, R_μ corresponds to the maximum reduction in strength that can be used in order to limit the displacement ductility demand to the

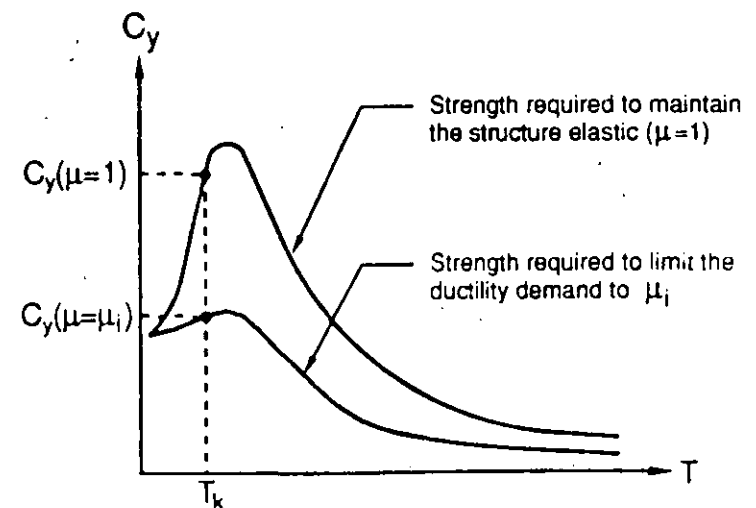


FIG. 1. Constant Displacement Ductility Nonlinear Response Spectra

predetermined ductility μ , in a structure that will have a lateral strength equal to the design strength. An additional strength reduction can be considered in the design of a structure to account for the fact that structures usually have a lateral strength higher than the design strength. For a more detailed discussion on strength reductions due to overstrength the reader is referred to Osteraas et al. (1990), Miranda (1991), and Bertero et al. (1991).

Computation of F_d ($\mu = \mu_d$) or C_d ($\mu = \mu_d$) involves iteration (for each period and each target ductility) on the lateral strength F_d (or the seismic coefficient C_d) using (1) until the computed ductility demand under a given ground motion is, within a certain tolerance, the same as the target ductility.

Iteration on the lateral strength using (1) in some cases does not yield a unique result, that is, there can be more than one lateral strength that produces the same displacement ductility demand. In such cases, only the largest lateral strength is of interest for design purposes. This lateral strength capacity corresponds to the maximum strength reduction factor R_d and the minimum strength required by the structure to limit the ductility demand to the target ductility.

STATISTICAL STUDY OF FORCE REDUCTION FACTORS

Earthquake Ground Motions

There is a general consensus that one of the largest sources of uncertainty in the estimation of the response of inelastic structures during earthquakes is the prediction of the intensity and characteristics of future earthquake ground motions at a given site. In this study, an effort was made to consider a relatively large number of recorded ground motion to study the effects of the variability of the characteristics of recorded ground motions on strength-reduction factors.

To study the influence of local site conditions on strength reduction factors, a group of 124 ground motions recorded on a wide range of soil conditions during various earthquakes was considered. The ground motions used in this investigation were recorded during the earthquakes listed in Table 1. Most of the selected records represent so-called free-field conditions. Complete listing of the records can be found in Miranda (1993).

Based on the local site conditions at the recording station, ground motions

TABLE 1. Earthquakes Considered in This Investigation

Earthquake (1)	Date (2)	Magnitude (3)
Imperial Valley, Calif.	May 17, 1940	6.3(M_L)
Kern County, Calif.	July 21, 1952	7.7(M_S)
San Francisco, Calif.	March 22, 1957	5.3(M_L)
Parkfield, Calif.	June 27, 1966	5.6(M_L)
San Fernando, Calif.	February 9, 1971	6.5(M_L)
Romana	March 4, 1977	7.1(M_S)
Miyagi-Ken-Oki, Japan	June 12, 1978	7.4(M_S)
Imperial Valley, Calif.	October 15, 1979	6.6(M_L)
Central Chile, Chile	March 3, 1985	7.8(M_S)
Michoacan, Mexico	September 19, 1985	8.1(M_S)
San Salvador, El Salvador	October 10, 1986	5.4(M_L)
Whittier, Narrows, Calif.	October 1, 1987	6.1(M_L)
Loma Prieta, Calif.	October 17, 1989	7.1(M_S)

were classified into three groups using a simple criterion similar to that used in present building codes. These three groups are: ground motions recorded on rock (38 records); ground motions recorded on alluvium (62 records); and ground motions recorded on very soft soil deposits characterized by low shear wave velocities (24 records). Records included in the latter category could be considered as representative of the soil type S_2 according to the soil classification of the *Uniform Building Code (Uniform, 1988)*.

Method of Analysis

For each earthquake record inelastic strength demands were computed for a family of 50 SDOF systems undergoing different levels of inelastic deformation. For a given period of vibration and a given target displacement ductility ratio, the inelastic strength demand F_d ($\mu = \mu_d$) was computed by iteration on the system's lateral yielding strength until the displacement ductility demand computed with (1) and (3) was within 1% of the target ductility. The following target ductilities were selected: one (linear elastic behavior), two, three, four, five, and six. The number of iterations required to compute the maximum lateral strength that results in a ductility demand within 1% of the target ductility varies greatly depending on the period of vibration, the target ductility and the ground motion. In general, the number of iterations increases with increasing target ductility and decreasing period.

The SDOF systems considered in this study were characterized by bilinear hysteretic behavior with a postelastic stiffness equal to 3% of the elastic stiffness and a constant damping coefficient corresponding to a damping ratio ξ of 5% based on elastic properties and given by

$$c = 2m\xi\omega_n = 2\xi\sqrt{km} \quad \dots \dots \dots (6)$$

where ω_n = undamped elastic angular frequency on the system. On each iteration, response-time histories were computed by numerical step-by-step integration of (1) using the linear acceleration method with a variable time step to minimize energy violations when changes in stiffness occur in the system.

After computing elastic and inelastic strength demands, strength-reduction factors were computed using (4). An R_d spectrum can be constructed by plotting the strength-reduction factors of a family of SDOF systems undergoing a certain level of inelastic deformation under a given ground motion. An example of this kind of spectrum corresponding to a ground motion recorded near the epicenter of the 1989 Loma Prieta, California, earthquake is shown in Fig. 2.

Mean Strength Reduction Factors

Using the procedure just described, a total of 31,000 strength-reduction factors were computed (corresponding to 50 SDOF systems undergoing five different levels of inelastic deformation when subjected to 124 earthquake ground motions). Results were organized and analyzed statistically according to the period of vibration of the system, the target ductility and the soil condition where the ground motion was recorded.

For ground motions recorded on rock or alluvium sites, the strength-reduction factors were computed for a fixed set of periods between 0.05 s and 3.0 s. Mean strength-reduction factors computed for systems subjected to ground motions recorded on rock are shown in Fig. 3. As shown in this figure, the strength-reduction factors are characterized by the following features: first, the reduction factor increases with increasing target ductility,

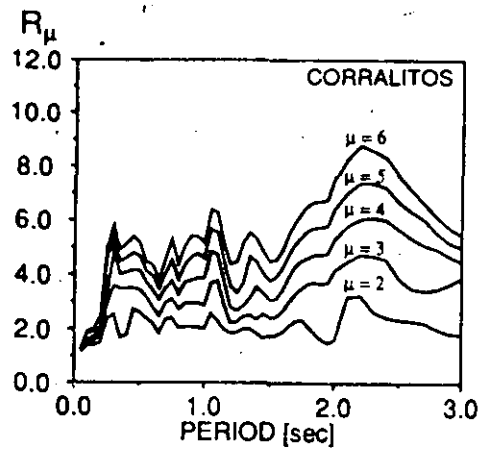


FIG. 2. Strength-Reduction Factors Computed for NS Component of Corralitos Record

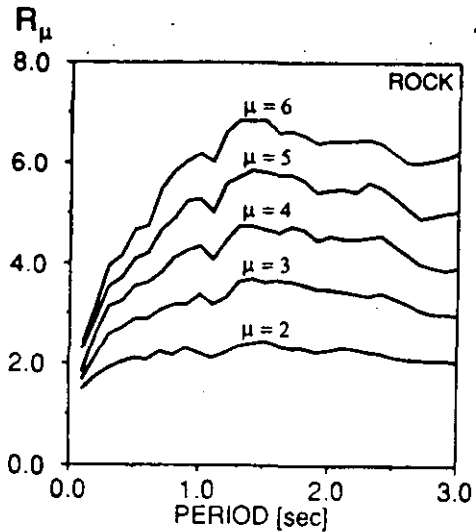


FIG. 3. Mean Strength-Reduction Factors for Systems Subjected to Ground Motions Recorded on Rock

with the rate of increase being period dependent; and second, for a given target ductility, the reduction factors exhibit an important variation with changes in period, particularly in the short-period region. In general, mean reduction factors in the long-period range are approximately constant and equal to the target ductility.

Mean strength-reduction factors computed for systems subjected to ground motions recorded on alluvium are shown in Fig. 4. As illustrated by this figure, strength-reduction factors for structures located on alluvium sites

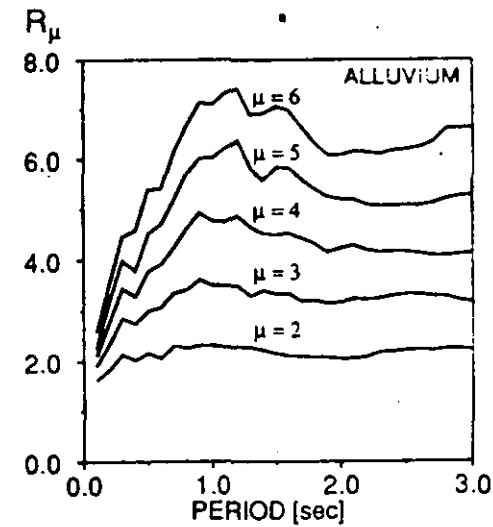


FIG. 4. Mean Strength-Reduction Factors for Systems Subjected to Ground Motions Recorded on Alluvium

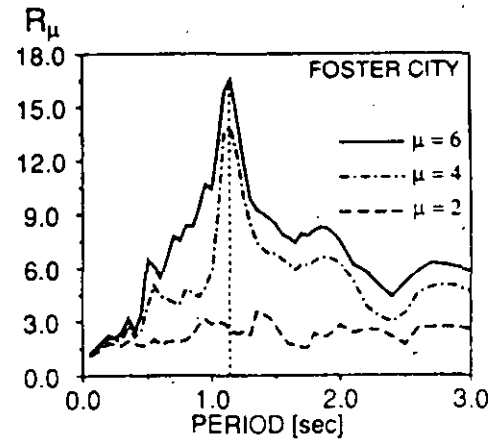


FIG. 5. Strength-Reduction Factors Computed for NS Component of Foster City Record

follow the same general trend of strength-reduction factors for structures on rock sites.

An example of a R_μ spectrum corresponding to a ground motion recorded during the 1989 Loma Prieta earthquake on a soft-soil site in the San Francisco Bay area is shown in Fig. 5. As shown in this figure, strength-reduction factors are very large around a period of 1.14 s. Typically, for very soft soil sites the period at which this peak is observed in the R_μ spectrum coincides with the predominant period of the ground motion (Miranda and Bertero 1991; Miranda 1991; Krawinkler and Rahnama 1992). Thus, the assessment

of inelastic strength demands of structures located on soft-soil sites requires the estimation of the predominant period of the ground motion.

The predominant period of the ground motion T_p is defined by Miranda (1991) as the period at which the maximum input energy of a 5% damped linear elastic system is maximum throughout the whole period range. For a SDOF system, the maximum input energy is given by

$$E_I = \max \left[\int (m\ddot{u}_i) du_k \right] \dots \dots \dots (7)$$

where \ddot{u}_i = total acceleration (ground plus relative acceleration) of the system. An example of the computation of the predominant period of the ground motion using this definition is shown in Fig. 6(a). The ground motion is the same record that was used to compute the R_μ spectrum shown in Fig. 5. It can be seen that the period at which the maximum strength-reduction factor is produced coincides with the period of maximum input energy.

If the linear elastic response spectrum of the ground motion is available, the predominant period of a ground motion recorded on a soft-soil site can also be estimated as the period at which the maximum relative velocity is produced (Miranda 1993). The maximum relative velocity is proportional to the "relative" kinetic energy. Thus, since absolute and relative kinetic energies are very close in the vicinity of the predominant period of the excitation (Uang and Bertero 1990), both procedures to estimate T_p will approximately yield the same result. The use of the second procedure to estimate T_p is exemplified in Fig. 6(b) for the Foster City ground motion. As demonstrated by this figure, both procedures produce approximately the same period.

Since the shape of a R_μ spectrum is strongly dependent on the value of T_p , obtaining the mean of R_μ versus T spectra of ground motion with significantly different predominant periods may result in a poor description of strength-reduction factors due to inelastic behavior for structures on soft-soil sites. Therefore, for ground motions in this soil category, strength-reductions factors were not computed for a fixed set of periods, but for a fixed set of T/T_p ratios.

Mean R_μ versus T/T_p spectra are shown in Fig. 7. As shown in this figure,

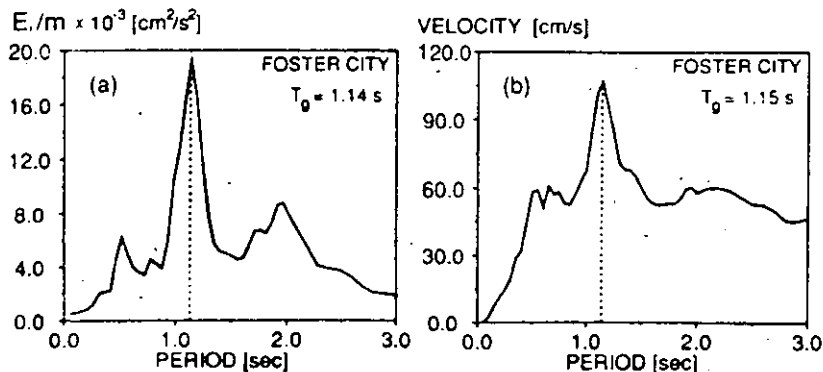


FIG. 6. Estimation of Predominant Period of Ground Motion: (a) Using Maximum Input Energy; and (b) Using Maximum Relative Velocity

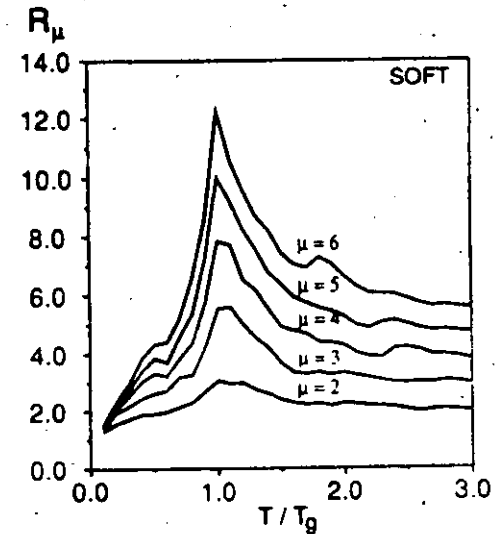


FIG. 7. Mean Strength-Reduction Factors for Systems Subjected to Ground Motions Recorded on Soft Soil

strength-reduction factors for ground motions recorded on soft-soil sites exhibit strong variations with changes in the T/T_p ratio. It can be seen that strength-reduction factors for structures built on soft-soil deposits are characterized by being much larger than the target ductility for periods near the predominant period of the ground motion (i.e., for $T \approx T_p$). For systems with periods shorter than two thirds of the predominant period of the ground motion, the strength-reduction factor due to inelastic behavior is smaller than the target ductility, whereas for systems with periods longer than one-and-a-half times the predominant period, the strength-reduction factor is approximately equal to the target ductility.

Variability of Strength Reduction Factors

The response of a nonlinear system subjected to earthquake ground motions is more sensitive to the characteristics of individual acceleration pulses and their sequence within a recorded acceleration time history than it is the response of a linear system. Therefore, for a given target ductility, the strength-reduction factor can exhibit great variations from one ground motion to another, even if both ground motions are similar (i.e., they have approximately the same intensity, duration, and frequency content). For the design of a structure this means that the lateral strength capacity required to avoid displacement ductility demands larger than a given limit can have important variations from one ground motion to another.

As mentioned before, strength-reduction factors increase with increasing ductility demands. For a given system with period of vibration T and a given target displacement ductility ratio, the strength-reduction factor will typically vary within a certain range when subjected to a family of ground motions. Thus, it is important to study not only the influence of the displacement ductility ratio on mean strength-reduction factors but also on the dispersion of these reduction factors. One way of evaluating the dispersion

of strength-reduction factors is by computing the coefficient of variation (COV), which is defined as the ratio of the standard deviation to the mean.

Coefficients of variation of strength-reduction factors for systems subjected to ground motions recorded on rock and on alluvium are shown in Fig. 8. The coefficient of variation is shown for three displacement ductility ratios. As illustrated by this figure, with the exception of systems with very short periods ($T < 0.2$ s), coefficients of variation of strength-reduction factors exhibit only small variations with changes in the period of vibration. Regardless of the soil condition at the recording station, the dispersion in strength-reduction factors increases with increasing displacement ductility ratio.

Some of the factors that influence the intensity, frequency content, and duration of the ground motion at a given site are: the earthquake magnitude, the distance to the source, and the local site conditions. Thus, it is of great importance to study the influence of these factors on mean strength-reduction factors.

The influence of soil conditions on strength-reductions factors can be seen in Fig. 9 where mean R_{μ} spectra are plotted for systems undergoing displacement ductility demands of three and five when subjected to ground motions recorded on rock, on alluvium, and on soft-soil sites. For soft-soil sites, the mean R_{μ} spectra are plotted assuming a predominant period of the ground motion of 1.5 s. As shown in this figure, strength-reduction factors corresponding to ground motions recorded on alluvium are larger than those corresponding to ground motions recorded on rock for periods smaller than 1.2 s. Thus, in this period range one can design a structure on alluvium with a slightly smaller lateral strength capacity than that required to avoid the same level of inelastic deformation on a similar structure on a rock site. For systems with periods between 1.3 s and 2.4 s, the strength-reduction factors corresponding to ground motions recorded on rock are larger than those corresponding to ground motions recorded on alluvium.

Although difference exists between strength-reduction factors for rock sites and those of alluvium sites, these differences are relatively moderate when compared to the differences that exist between strength-reduction factors for soft-soil sites and strength-reduction factors for either rock or alluvium sites. As shown in the same figure, for systems on soft-soil sites

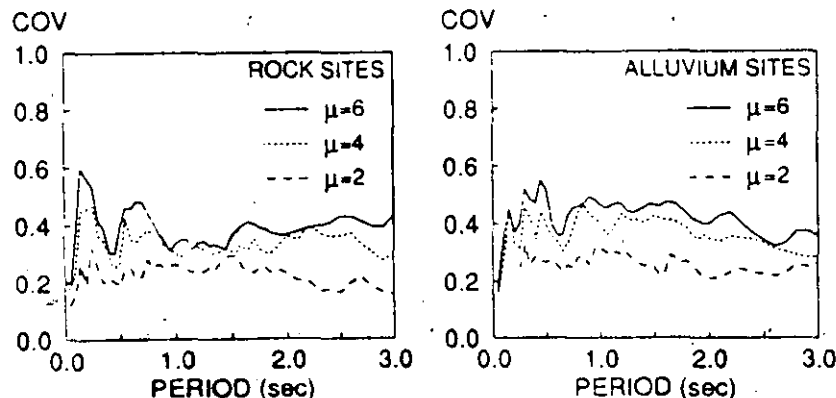


FIG. 8. Influence of Level of Inelastic Deformation on Dispersion of Strength-Reduction Factors

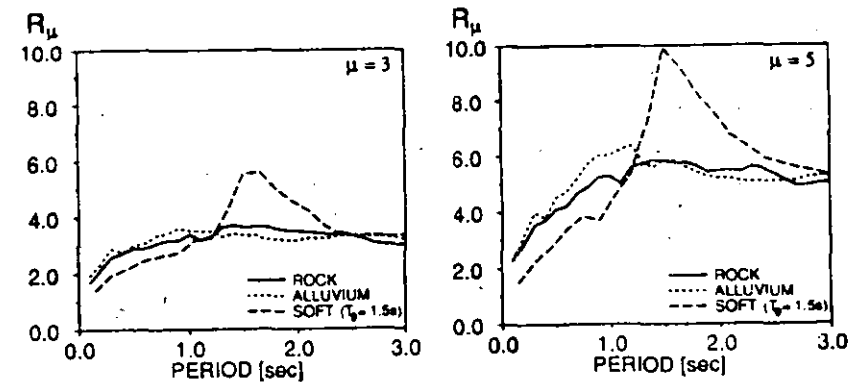


FIG. 9. Influence of Local Site Conditions on Strength-Reduction Factors

with periods between 1.3 s ($T \approx 0.85T_g$) and 2.3 s ($T \approx 1.5T_g$), the strength-reduction factor is much larger than those corresponding to systems with the same periods but located on either rock or alluvium sites.

In the short-period range, strength-reduction factors corresponding to systems on soft-soil sites are considerably smaller than those corresponding to systems on rock sites or to those corresponding to systems on alluvium sites. This observation has very important design implications. Mainly, that the use of strength-reduction factors derived from studies of systems subjected to ground motions recorded on rock and alluvium sites can lead to unconservative designs if used in the design of short-period structures located on soft-soil sites. For example, if displacement ductility demands larger than three want to be avoided on a structure with a period of 0.6 s, the use of mean strength-reduction factors derived with the use of ground motions recorded on rock or alluvium sites would result in a lateral strength capacity that is approximately one third of the lateral strength capacity that it is required to maintain the structure elastic (i.e., $R_{\mu} = 3$). However, if this strength-reduction factor is employed in the design of a structure located on soft soil, the mean displacement ductility demand would be approximately five, that is, 65% higher than the target ductility.

The influence of local site conditions on the dispersion of strength-reduction factors is shown in Fig. 10, where coefficients of variation of strength-reduction factors are plotted for systems undergoing displacement ductility ratios of three and five when subjected to ground motion recorded on rock, on alluvium, and on soft-soil sites. Periods of vibration for soft-soil sites correspond to an assumed predominant period of 1.2 s. It can be seen that, for a given displacement ductility ratio, the dispersion on the reduction factor is approximately the same for all three conditions. Thus, even though different soil conditions lead to different strength-reduction factors, their variability remains practically the same.

Earthquake magnitude and epicentral distance have been shown to influence elastic strength demands on SDOF systems (Silva and Green 1989). In the present investigation, the influence of earthquake magnitude on strength-reduction factors was studied by computing, for each soil condition, the mean R_{μ} spectra for ground motions recorded on earthquakes with three levels of magnitude. The influence of earthquake magnitude on mean reduction factors for systems undergoing displacement ductilities of $\mu=3$ and $\mu=5$

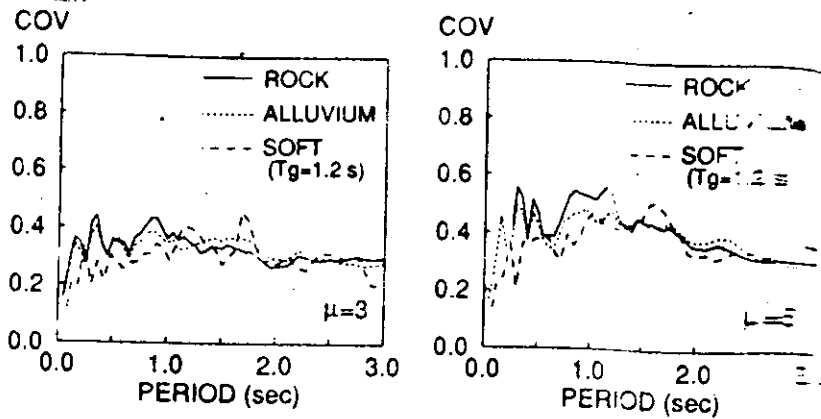


FIG. 10. Influence of Local Site Conditions on Dispersion of Strength-Reduction Factors

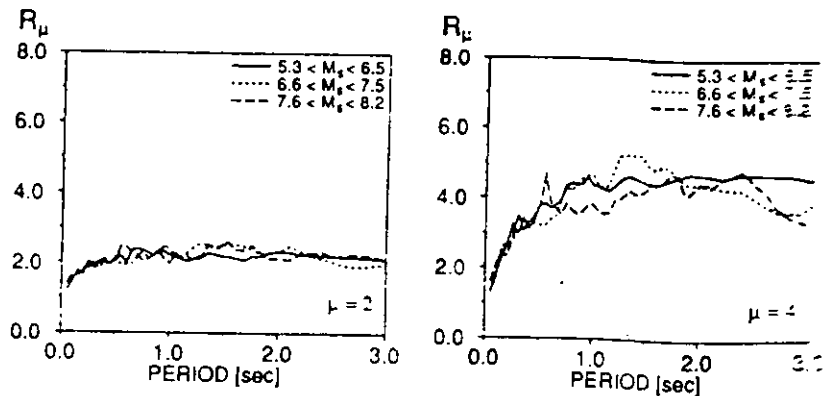


FIG. 11. Influence of Earthquake Magnitude of Strength-Reduction Factors for Systems Subjected to Ground Motions Recorded on Rock

four when subjected to ground motions recorded on rock during earthquakes with magnitude ranging from 5.3 to 8.1 are shown in Fig. 11. It can be seen that regardless of the level of ductility, the influence of magnitude on strength-reduction factors is negligible. Thus, the small effects of magnitude or inelastic strength demands stems primarily from its effects on elastic strength demand.

The influence of epicentral distance D on strength-reduction factors was studied by computing mean R_{μ} spectra for ground motions recorded within three groups of epicentral distances, approximately representing short, intermediate, and long epicentral distances. Mean R_{μ} spectra for systems undergoing displacement ductilities of two and four when subjected to ground motions recorded on rock at different epicentral distances are shown in Fig. 12. It can be seen that mean strength-reduction factors are practically the same for all three groups of epicentral distances. Thus, epicentral distances have a negligible effect on strength-reduction factors. A similar conclusion was reached by Krawinkler and Nassar (1990), who studied the effect of

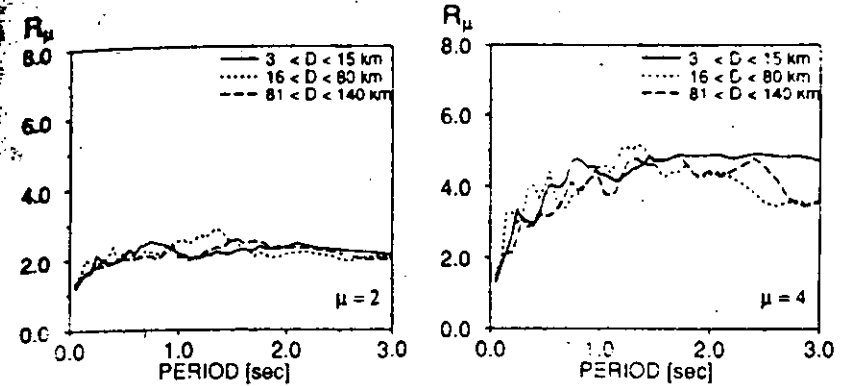


FIG. 12. Influence of Epicentral Distance on Strength-Reduction Factors for Systems Subjected to Ground Motions Recorded on Rock

epicentral distance on strength-reduction factors using 33 ground motions recorded during the 1987 Whittier-Narrows earthquake. In addition to the effect of epicentral distance, Krawinkler and Nassar studied the influence of stiffness degradation on strength-reduction factors. They concluded that stiffness degradation has a negligible effect on strength-reduction factors.

REGRESSION ANALYSES

For practical purposes, a simplified expression is desired to relate the strength-reduction factor due to hysteretic behavior R_{μ} to the displacement ductility ratio μ . Thus, for the design of a structure, the lateral strength capacity required to avoid displacement ductility demands larger than their corresponding capacities can be easily assessed for a given site-dependent SLERS. Similarly, if the lateral strength capacity is known, a simplified expression relating R_{μ} with μ permits a rapid estimation of the displacement ductility demand corresponding to a given site-dependent SLERS.

Some of the factors that influence R_{μ} are: displacement ductility ratio, period of vibration, local soil conditions, magnitude, epicentral distance, hysteretic behavior, and damping. Here only the first three factors, which are the ones that typically have a significant influence on R_{μ} , were considered while conducting regression analyses in order to obtain simplified expressions to compute strength-reduction factors. Therefore, the approximate force reduction factor \hat{R}_{μ} is given by

$$\hat{R}_{\mu} = f(\mu, T, SC) \quad (8)$$

where SC represents the soil conditions. Regardless of the soil condition, (8) has to satisfy the following conditions:

$$\lim_{T \rightarrow 0} \hat{R}_{\mu} = \lim_{T \rightarrow 0} f(\mu, T, SC) = 1 \quad (9)$$

$$\lim_{T \rightarrow \infty} \hat{R}_{\mu} = \lim_{T \rightarrow \infty} f(\mu, T, SC) = \mu \quad (10)$$

$$\hat{R}_{\mu} = f(\mu, T, SC) = 1, \quad \mu \leq 1 \quad (11)$$

The form of the function described in (8) was chosen to be the following:

$$R_{\mu} = \frac{\mu - 1}{\Phi} + 1 \geq 1 \quad (12)$$

where Φ = function of μ , T , and the soil conditions at the site. Several forms of functions for Φ were considered, and regression analyses were conducted for each soil condition separately in order to fit the function Φ to the data obtained from nonlinear time-history analyses. For rock and alluvium sites the functions Φ that fit best mean strength-reduction factors are given by

$$\Phi = 1 - \frac{1}{10T - \mu T} - \frac{1}{2T} \exp \left[-\frac{3}{2} \left(\ln T - \frac{3}{5} \right)^2 \right] \quad (\text{for rock sites}) \quad (13)$$

$$\Phi = 1 + \frac{1}{12T - \mu T} - \frac{2}{5T} \exp \left[-2 \left(\ln T - \frac{1}{5} \right)^2 \right] \quad (\text{for alluvium sites}) \quad (14)$$

A comparison between mean strength-reduction factors computed for systems subjected to ground motions recorded on rock sites and recorded on alluvium sites with those computed using (12)–(14) is shown in Fig. 13. It can be seen that the use of these simple equations leads to very good approximations of mean reduction factors due to inelastic behavior.

As shown in Fig. 7, mean strength-reduction factors for soft-soil conditions are characterized by important variations with changes in the T/T_g ratio. The assessment of this ratio depends on a good estimation of the fundamental period of vibration of the structure and of the predominant period of the ground motion, both of which are subjected to an important degree of uncertainty. Furthermore, the initial T/T_g ratio could also change during the earthquake as a result of nonstationarities on either the response of the soft-soil deposit or on the response of the structure. Thus, if the computed mean strength-reduction factors (Fig. 7) are directly used in design, even a small error in the estimation of the T/T_g ratio could lead to

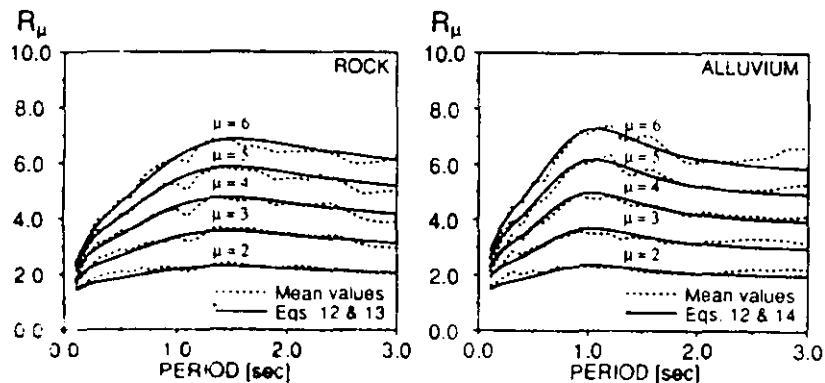


FIG. 13. Comparison of Mean Strength-Reduction Factors of Rock and Alluvium Sites with those Computed Using Eqs. (12)–(14)

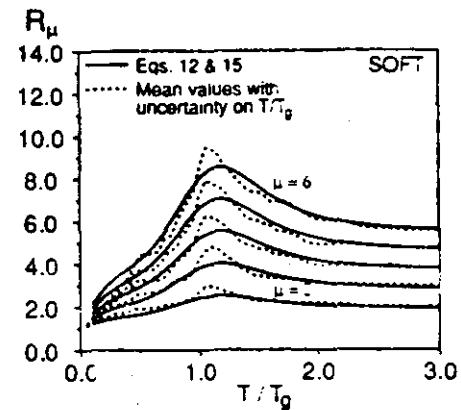


FIG. 14. Mean Strength-Reduction Factors of Soft Soil Sites Considering 10% Error in Estimation of T/T_g Ratio Compared to those Computed Using Eqs. (12) and (15)

significant errors in the estimation of R_{μ} , particularly for systems with fundamental periods of vibration close to the predominant period of the ground motion (i.e., $T/T_g = 1$).

Due to the important variations in R_{μ} with changes in the T/T_g ratio, combined with uncertainties in the estimation of the T/T_g ratio, it was decided to modify the computed strength-reduction factor spectra of ground motions recorded on soft-soil sites by considering a $\pm 10\%$ error in the estimation of the T/T_g ratio. For a given displacement ductility ratio and given T/T_g ratio, the modified strength-reduction factor was computed as the minimum strength-reduction factor in the spectral range limited by $0.9T/T_g$ and $1.1T/T_g$. Regression analyses were conducted to obtain a function Φ that, combined with (12), best fits the mean of modified strength-reduction factor spectra. This function Φ is given by

$$\Phi = 1 + \frac{T_g}{3T} - \frac{3T_g}{4T} \exp \left[-3 \left(\ln \frac{T}{T_g} - \frac{1}{4} \right)^2 \right] \quad (\text{for soft soil sites}) \quad (15)$$

Strength-reduction factors computed using (12) and (15) and the mean of modified strength-reduction factors of systems subjected to ground motions recorded on soft-soil sites are compared in Fig. 14. As illustrated in this figure, the combined use of (12) and (15) provides, in general, good estimates of strength-reduction factors for structures located on soft-soil sites.

CONCLUSIONS

The primary purpose of this investigation was to assess the reduction in lateral strength demands produced by allowing nonlinear hysteretic behavior to take place in structures in the event of severe earthquake ground motions. For this purpose, a statistical study of strength-reduction factors was conducted. The statistical study comprised strength-reduction factors computed for SDOF systems undergoing different levels of inelastic deformation subjected to a relatively large number of earthquake ground motions.

corded on different local soil conditions. The following conclusions can be drawn from the results of this study.

The strength reduction factor, which controls displacement ductility demands, is primarily affected by the period of vibration of the system, the maximum tolerable inelastic displacement demand, and the soil conditions at the site.

For a given displacement ductility ratio, regardless of the soil conditions, strength-reduction factors exhibit important variations with changes in period, particularly in the short-period range where the use of a period-independent strength-reduction factor is clearly inadequate.

Periods at which strength-reduction factors become approximately equal to the displacement ductility ratio depend not only on the soil condition at the site but also on the level of inelastic deformation.

For systems on soft-soil sites, the assessment of the strength-reduction factor requires the estimation of the predominant period of the ground motion.

Strength-reduction factors of systems on alluvium sites are moderately different to those of systems on rock sites, whereas strength-reduction factors of systems on soft-soil sites are significantly different to those of systems on rock sites and to those of systems on alluvium.

Strength-reduction factors of systems on soft-soil sites with periods of vibration near the predominant period of the ground motion are typically much larger than the displacement ductility ratio.

For systems on soft-soil sites with periods smaller than two thirds of the predominant period, the strength-reduction factor is significantly smaller than that corresponding to systems with the same period on either rock or alluvium sites. Thus, the use of strength-reduction factors derived from studies of systems subjected to ground motions recorded on rock and alluvium sites can lead to unconservative designs if used in the design of short-period structures located on soft-soil sites.

The proposed expressions to compute site-dependent strength-reduction factors are relatively simple and provide a good estimation of mean strength-reduction factors derived from the statistical study presented herein.

ACKNOWLEDGMENTS

Part of the study presented in this paper was conducted while the writer was a graduate student at the University of California at Berkeley working under the supervision of Vitelmo V. Bertero, whose guidance is greatly appreciated.

APPENDIX I. REFERENCES

- Bertero, V. V., Anderson, J. C., Krawinkler, H., and Miranda, E. (1991). "Design guidelines for ductility and drift limits." *Report no. EERC/UCB-91/15*, Earthquake Engrg. Res. Ctr., Univ. of California at Berkeley, Berkeley, Calif.
- Elghadamsi, F. E., and Mohraz, B. (1987). "Inelastic earthquake spectra." *Earthquake Engrg. and Struct. Dynamics*, 15(2), 91-104.
- Krawinkler, H., and Nassar, A. (1990). "Strength and ductility demands for SDOF and MDOF systems subjected to Whittier Narrows earthquake ground motions." *CSMIP-1990*, California Dept. of Conservation, Sacramento, Calif.
- Krawinkler, H., and Rahnama, M. (1992). "Effects of soft soils on design spectra." *Proc., 10th World Conf. on Earthquake Engrg.*, Int. Assoc. for Earthquake Engrg., Madrid, Spain, 10, 5841-5846.
- Miranda, E., and Bertero, V. V. (1991). "Evaluation of structural response factors

- using ground motions recorded during the Loma Prieta earthquake." *CSMIP-1991*, California Dept. of Conservation, Sacramento, Calif.
- Miranda, E. (1991). "Seismic evaluation and upgrading of existing buildings." PhD thesis, University of California at Berkeley, Berkeley, Calif.
- Miranda, E. (1993). "Evaluation of site-dependent inelastic seismic design spectra." *J. Struct. Engrg.*, ASCE, 119(5), 1319-1338.
- Nassar, A., and Krawinkler, H. (1991). "Seismic demands for SDOF and MDOF systems." *Report no. 95*, The John A. Blume Earthquake Engrg. Ctr., Stanford Univ., Stanford, Calif.
- Newmark, N. M., and Hall, W. J. (1973). "Procedures and criteria for earthquake resistant design." *Build. Res. Series No. 46*, Nat. Bureau of Standards, U. S. Dept. of Commerce, Washington, D.C., 209-236.
- Osteraas, J. D., and Krawinkler, H. (1990). "Strength and ductility considerations in seismic design." *Report no. 90*, The John A. Blume Earthquake Engrg. Ctr., Stanford Univ., Stanford, Calif.
- Peng, M.-H., Elghadamsi, F. E., and Mohraz, B. (1988). "A stochastic procedure for nonlinear response spectra." *Proc., 9th World Conf. on Earthquake Engrg.*, Int. Assoc. for Earthquake Engrg., Tsukuba, Japan, V, 1069-1074.
- Riddell, R., and Newmark, N. M. (1979). "Statistical analysis of the response of nonlinear systems subjected to earthquakes." *Structural Research Series No. 468*, Dept. of Civ. Engrg., Univ. of Illinois, Urbana, Ill.
- Riddell, R., Hidaigo, P., and Cruz, E. (1989). "Response modification factors for earthquake resistant design of short period structures." *Earthquake Spectra*, 5(3), 571-590.
- Silva, W. J., and Green, R. K. (1989). "Magnitude and distance scaling of response spectral shapes for rock sites with applications to North American tectonic environment." *Earthquake Spectra*, 5(3), 591-603.
- Uniform building code*. (1988). Int. Conf. of Build. Officials, Whittier, Calif.

APPENDIX II. NOTATION

The following symbols are used in this paper:

- C_s = seismic coefficient;
 c = damping coefficient;
 D = epicentral distance;
 E_i = maximum input energy;
 F = restoring force;
 F_y = yield resistance;
 k = initial stiffness;
 m = mass;
 R_s = strength-reduction factor;
 \bar{R}_s = approximate strength-reduction factor;
 T = period of vibration;
 T_c = predominant period of ground motion;
 u = relative displacement;
 \ddot{u}_g = ground acceleration;
 u_y = yield displacement;
 μ = displacement ductility ratio;
 ξ = damping ratio;
 Φ = function necessary to compute approximate strength-reduction factors; and
 ω_u = undamped elastic angular frequency.

EVALUATION OF SITE-DEPENDENT INELASTIC SEISMIC DESIGN SPECTRA

By Eduardo Miranda¹

ABSTRACT: The effect of site conditions on the response of single-degree-of-freedom inelastic systems is investigated. The study is based on 124 earthquake ground motions recorded on rock, alluvium, and soft soil sites. Special emphasis is given to the effects of the level of inelastic deformation on strength and displacement demands. For each soil group, inelastic strength demand spectra corresponding to mean and mean-plus-one standard deviation ordinates are presented. The use of elastic analysis to estimate inelastic displacements is evaluated through mean values of the ratio of maximum inelastic to maximum elastic displacements. Spectra are presented for different levels of inelastic deformation and for different soil conditions. Results indicate that inelastic demands are strongly dependent on site conditions, period of vibration, and level of inelastic deformation. Results are compared with design forces specified by current seismic codes. It is shown that design force and displacement demands that are based on inelastic response spectra together with estimates of the overstrength of a structure can lead to a more rational and transparent approach than that of current U.S. design codes.

INTRODUCTION

Since the concept of the response spectrum was introduced into earthquake engineering by Benioff (1934) and Biot (1941), this technique has been widely used to estimate force and deformation demands of structures imposed by earthquake ground motions. Today, response spectra form the basis of seismic design forces in most seismic codes (*Earthquake resistant* 1988).

Linear elastic response spectra (LERS) provide a reliable tool to estimate the level of forces and deformations developed in structures responding elastically during earthquakes (Der Kiureghian 1980). There have been many statistical studies that, by considering a certain number of recorded or artificially generated ground motions, have investigated the characteristics of LERS including the influence of earthquake magnitude, epicentral distance, frequency content, damping ratio, and local site conditions.

As a result of currently used seismic design philosophy for building structures that accept structural damage in the event of severe earthquake ground motions, design lateral forces are lower, and in some cases much lower, than those required to maintain the structure in the elastic range. Thus, buildings designed according to this philosophy are likely to experience significant inelastic excursions whose corresponding forces and deformations cannot be predicted with the use of linear elastic models. The number of statistical studies of response spectra that have considered inelastic structural behavior is much smaller than those on LERS and, in general, have only

¹Res. Engr., Dept. of Civ. Engrg., Swiss Fed. Inst. of Tech., CH-1015, Lausanne, Switzerland; formerly, Res. Engr., Dept. of Civ. Engrg., Univ. of California at Berkeley.

Note. Discussion open until October 1, 1993. To extend the closing date one month, a written request must be filed with the ASCE Manager of Journals. The manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on May 6, 1992. This paper is part of the *Journal of Structural Engineering*, Vol. 119, No. 5, May, 1993. ©ASCE, ISSN 0733-9445/93/0005-1319/\$1.00 + \$.15 per page. Paper No. 3957.

consider. A small number of earthquake ground motions and have not taken into account the effect of soil conditions.

Recent studies on the response of instrumented structures during recent earthquakes, as well as on experimental research on the response of scaled-down models of buildings, have concluded that there is a need for improved smoothed inelastic design response spectra (SIDRS) (Bertero 1986; Bertero et al. 1991). The objectives of this paper are first to present a summary of previous statistical studies on LERS and on inelastic response spectra (IRS), and second to present the results of an investigation whose aim was at improving the estimation of seismic demands on inelastic systems. This investigation consisted of a comprehensive statistical study of inelastic strength and deformation demands on single-degree-of-freedom (SDOF) systems when subjected to more than 120 ground motions recorded in various earthquakes. Special emphasis is given to the effects of soil conditions on inelastic demands of structures.

REVIEW OF PREVIOUS STUDIES

Several studies have been conducted over the years with the purpose of improving the knowledge of design response spectra. In general, these studies have been improved in time as a result of a rapid increase in the number of recorded earthquake ground motions. Here, a brief summary of most relevant statistical studies on response spectra is presented.

Studies of LERS

The first attempt to study the characteristics of an ensemble of LERS of recorded ground motions was made by Housner (1959), who computed the average LERS of eight ground motions recorded during four earthquakes. Newmark and Hall (1969) proposed a design response spectrum to be used in design of nuclear power facilities. The method consisted of constructing a trapezoidal spectrum based on acceleration-, velocity-, and displacement-controlled regions defined as the product of the corresponding maximum ground-motion parameters and amplification factors. The shape and level of intensity of the proposed spectrum was primarily based on the LERS of ground motions recorded during the 1940 El Centro earthquake.

Because of increased interest in seismic design criteria for nuclear power facilities, several statistical studies on LERS were carried out. Blume et al. (1972) studied LERS of 33 horizontal ground motions. The vertical component of motion was first considered by Mohraz et al. (1972), who studied the response of linear elastic SDOF systems subjected to 14 vertical motions and 28 horizontal motions. By combining the two previous studies Newmark et al. (1974) proposed the response spectrum of the U.S. Atomic Energy Commission (AEC). An improved version of the AEC spectrum was proposed by Hall et al. (1976), who considered LERS of vertical and horizontal ground motions recorded at 55 stations during different earthquakes. Although some differences were noticed between LERS of ground motions recorded on rock and those of motions recorded on alluvium, it was considered that no valid statistical inferences could be drawn from the data, and all LERS were averaged into one spectrum, regardless of site conditions.

The first statistical study to explicitly consider the effect of soil conditions in LERS was conducted by Hayashi et al. (1971). In their study, they averaged the LERS of 61 accelerograms recorded in 38 Japanese earthquakes. Many motions used in the study have maximum ground accelera-

tions of less than 0.05 g. They concluded that linear spectral shapes are site dependent.

After the 1971 San Fernando earthquake, Seed et al. (1975) presented the results of a comprehensive study on the influence of local site conditions on LERS. The investigation was based on 104 horizontal ground motions recorded on different soil conditions classified into four groups. Approximately 40% of the ground motions in the study were recorded during the San Fernando earthquake. They concluded that there are clear differences in linear spectral shapes for different soil and geological conditions, and recommended the consideration of these effects in selecting earthquake-resistant design criteria. Similar results and conclusions were presented by Mohraz (1976), who studied horizontal ground motions as well as the vertical component of 54 earthquake records whose majority (60%) was again recorded during the San Fernando earthquake.

In addition to the study of the effects of local soil conditions, Katayama et al. (1978) studied the effects of magnitude and epicentral distances on LERS by considering 277 horizontal ground motions recorded in 67 Japanese earthquakes. The results of this study formed the basis of the 1977 Japanese earthquake design criteria. The same effects on LERS were recently studied by Trifunac and Lee (1989) for ground motions recorded in the western United States.

A comprehensive study on probabilistic site-dependent LERS was carried out by Kiremidjian and Shah (1980), who, by considering the probability of occurrence of peak ground accelerations and dynamic amplification factors, presented LERS for three types of soil conditions for different confidence levels (probability of nonexceedence). The study was based on 209 ground motions recorded in the western United States. They noted that one disadvantage of their data (a disadvantage that also applies to some studies mentioned previously) is that 50% of the records are from the 1971 San Fernando earthquake. This introduces a bias to geologic conditions encountered in the San Fernando-Los Angeles area, as well as to spectral characteristics imposed by the duration and source mechanism of this event.

Studies on IRS

Response spectra of inelastic systems were first studied by Veletsos (1969) who presented IRS to pulse-type excitations and two recorded ground motions. Murakami and Penzien (1975) computed probabilistic nonlinear response spectra for SDOF systems with four types of hysteretic behavior. This study was based on constant strength nonlinear spectra of 100 artificially generated earthquakes classified into five groups, depending on intensity and duration.

Using 20 artificial ground motions whose LERS was compatible with the Newmark-Hall elastic design spectrum, Lai and Biggs (1978) proposed rules to construct SIDRS. The effects of damping and hysteretic behavior on IRS were studied by Riddell and Newmark (1979), who computed constant ductility IRS of 10 recorded earthquake ground motions. In their study, an improved set of reduction factors to account for inelastic behavior was proposed.

The influence of soil conditions on reduction factors was first studied by Elghadamsi and Mohraz (1983), who computed constant yield displacement IRS of SDOF systems with an elastic-perfectly plastic hysteretic behavior. Their study is based on the same set of records previously used by Mohraz (1976), which does not include very soft soil sites, and contains a dispro-

portionate number of records from the San Fernando earthquake. This study proposed the construction of constant ductility IRS by interpolating from constant yield displacement IRS.

More recently, Riddell, et al. (1989) presented average IRS of four sets of earthquake records. Most of the ground motions included in this study were recorded in South America. Emphasis is given to reduction factors to construct SIDRS from LERS; however, no information is given on the dispersion of the recommended reduction factors. Krawinkler and Nassar (1990) studied average IRS of bilinear and stiffness degrading SDOF systems subjected to 33 horizontal ground motions recorded during the 1987 Whittier Narrows earthquake. They concluded that reduction factors are independent of epicentral distance and are only slightly modified by the type of hysteretic model. None of the two latter studies explicitly considered the influence of local soil conditions on IRS.

EARTHQUAKE RECORDS CONSIDERED

In the last six years, an extensive number of earthquake ground motions have been recorded in different parts of the world. These ground motions have more than doubled the number of records previously collected. For example, the 1987 Whittier-Narrows earthquake alone produced more records than the total number of records obtained in the western United States between 1933 and 1984 (Trifunac 1988). For this study, 124 records were selected, with emphasis on those recorded in California and on those recorded during the last six years. Contrary to many previous studies, in this investigation, an effort was made to select "free-field" records.

To study the effects of site conditions it is necessary to classify the recording stations into groups with similar geological conditions. Although detailed site description such as the variation of shear wave velocities with changes in depth, exist for some recording stations, this information is not available for many other stations. For many stations even the approximate depth of soil deposits is unavailable. For this reason it was decided to base the site classification on a simple criterion (based on information available for all stations) and as close as possible to the one adopted by current codes of practice. Thus, the recording stations were divided into three categories: those located on rock, those located on alluvium deposits, and those located on very soft soils. Records included in the latter category could be considered representative of the soil type S_4 according to the soil classification of the *Uniform Building Code* (1988). Complete listings of the ground motions selected in this study are presented in Tables 1-3.

METHOD OF ANALYSIS

The response of a damped SDOF oscillator when subjected to earthquake ground motions is given by

$$m\ddot{u}(t) + c\dot{u}(t) + R(t) = -m\ddot{u}_g(t) \quad (1)$$

where m , c , and $R(t)$ = the mass, damping coefficient, and restoring force of the system, respectively; $u(t)$ = the relative displacement; $u_g(t)$ = the ground displacement; and the overdot represents its derivative with respect to time.

In Appendix I it is shown that (1) can be normalized as follows:

TABLE 1. Selected Ground Motions Recorded at Rock Sites

Station name (1)	Geology (2)	Earthquake date (3)	Magnitude (4)	Epicentral distance (km) (5)	Component (6)	PGA (g) (7)
San Francisco—Golden Gate Park	siliceous sandstone	San Francisco, March 22, 1957	5.3(M_L)	11	N10E, S80E	0.08, 0.11
Parkfield—Cholame Shandon No. 2	rock	Parkfield, June 27, 1966	5.6(M_L)	7	N65E, —	0.48, —
Castaic—Old Ridge Road	sandstone	San Fernando, February 9, 1971	6.5(M_L)	29	N21E, N69W	0.32, 0.27
Llolleo	sandstone and volcanic rock	Central Chile, March 3, 1985	7.8(M_S)	45	N10E, S80E	0.67, 0.43
Valparaiso	volcanic rock	Central Chile, March 3, 1985	7.8(M_S)	84	N70E, S20E	0.18, 0.16
La Union	metavolcanic rock	Michoacán, Sept. 19, 1985	8.1(M_S)	84	N00E, N90E	0.17, 0.15
La Villita	gabbro rock	Michoacán, Sept. 19, 1985	8.1(M_S)	44	N00E, N90E	0.13, 0.12
Zihuatanejo	tunalite rock	Michoacán, Sept. 19, 1985	8.1(M_S)	135	N90W, S00E	0.10, 0.16
National Geographic Institute	balsamo formation	San Salvador, October 10, 1986	5.4(M_S)	5.7	270, 180	0.53, 0.39
Institute of Urban Construction	fluviatile pumice rock	San Salvador, October 10, 1986	5.4(M_S)	5.3	90, 180	0.38, 0.67
Geotechnical Research Center	fluviatile pumice rock	San Salvador, October 10, 1986	5.4(M_S)	4.3	180, 90	0.42, 0.68
Mt. Wilson—Caltech Seismic Station	quartz diorite	Whittier-Narrows, October 1, 1987	6.1(M_L)	19	90, 360	0.19, 0.13
Corralitos—Eureka Canyon Road	landslide deposits	Loma Prieta, October 17, 1989	7.1(M_S)	7	90, 360	0.47, 0.62
Santa Cruz—University of California at Santa Cruz	limestone	Loma Prieta, October 17, 1989	7.1(M_S)	16	90, 360	0.41, 0.43
San Francisco—Cliff House	Franciscan sandstone	Loma Prieta, October 17, 1989	7.1(M_S)	99	90, 0	0.11, 0.07
San Francisco—Pacific Heights	Franciscan sandstone	Loma Prieta, October 17, 1989	7.1(M_S)	97	360, 270	0.05, 0.06
San Francisco—Presidio	serpentine	Loma Prieta, October 17, 1989	7.1(M_S)	98	90, 0	0.20, 0.10
San Francisco—Rincon Hill	Franciscan sandstone	Loma Prieta, October 17, 1989	7.1(M_S)	95	90, 360	0.09, 0.08
Yerba Buena Island	Franciscan sandstone	Loma Prieta, October 17, 1989	7.1(M_S)	95	90, 360	0.06, 0.03

$$\ddot{u}(t) + 2\omega\xi\dot{u}(t) + \omega^2 \frac{R(t)}{R_0} = -\frac{\omega^2}{\eta} \frac{\ddot{u}_g(t)}{\max|\ddot{u}_g|} \quad (2)$$

where μ = the displacement ductility ratio, defined as the maximum ab-

TABLE 2. Selected Ground Motions Recorded at Alluvium Sites

Station name (1)	Geology (2)	Earthquake date (3)	Magnitude (4)	Epicentral distance (km) (5)	Component (6)	PGA (g) (7)
El Centro—Irrigation District	alluvium	Imperial Valley, May 18, 1940	6.3(M _L)	8	S90W, S00E	0.21, 0.34
Taft—Lincoln School Tunnel	alluvium	Kern County, July 21, 1952	7.7(M _S)	56	N21E, S69E	0.15, 0.17
Figueroa—445 Figueroa St	alluvium	San Fernando, February 9, 1971	6.5(M _L)	41	N52E, S38W	0.15, 0.12
Hollywood—Free Field	alluvium	San Fernando, February 9, 1971	6.5(M _L)	35	N90E, S00W	0.21, 0.17
Ave. of the Stars—1901 Ave. of the Stars	silt and sand layers	San Fernando, February 9, 1971	6.5(M _L)	38	N46W, S44W	0.14, 0.15
Sendai City—Kokutetsu Bldg.	alluvium	Miyagi-Ken-Oki, June 12, 1978	7.4(M _g)	110	N90W, N00E	0.44, 0.24
Meloland—Interstate 8 Overpass	alluvium	Imperial Valley, October 15, 1979	6.6(M _L)	21	360, 270	0.31, 0.30
Bonds Corner—Highways 98 and 115	alluvium	Imperial Valley, October 15, 1979	6.6(M _L)	3	S40E, S50W	0.58, 0.77
James Road—El Centro Array #1	alluvium	Imperial Valley, October 15, 1979	6.6(M _L)	22	S40E, S50W	0.52, 0.37
Imperial V. College—El Centro Array #7	alluvium	Imperial Valley, October 15, 1979	6.6(M _L)	21	S40E, S50W	0.33, 0.45
El Almiral	compacted fill	Central Chile, March 3, 1985	7.8(M _S)	84	N50E, S40E	0.29, 0.16
Vina del Mar	alluvial sand	Central Chile, March 3, 1985	7.8(M _S)	88	N70W, S20W	0.23, 0.36
Zacatula	alluvium	Michoacán, Sept. 19, 1985	8.1(M _S)	49	S00E, N90W	0.26, 0.18
Alhambra—Freemont School	alluvium	Whittier-Narrows, October 1, 1987	6.1(M _L)	7	270, 180	0.40, 0.30
Altadena—Eaton Canyon Park	alluvium	Whittier-Narrows, October 1, 1987	6.1(M _L)	13	90, 360	0.16, 0.31
Burbank—California Federal Savings Building	alluvium	Whittier-Narrows, October 1, 1987	6.1(M _L)	26	130, 40	0.22, 0.17
Downey—County Maintenance Building	deep alluvium	Whittier-Narrows, October 1, 1987	6.1(M _L)	17	270, 180	0.16, 0.20
Inglewood—Union Oil Yard	terrace deposits	Whittier-Narrows, October 1, 1987	6.1(M _L)	25	90, 360	0.23, 0.27
Los Angeles—110th St Station	terrace deposits	Whittier-Narrows, October 1, 1987	6.1(M _L)	22	360, 270	0.40, 0.29
Los Angeles—Baldwin House	alluvium over shale	Whittier-Narrows, October 1, 1987	6.1(M _L)	27	90, 360	0.17, 0.15

TABLE 2. (Continued)

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
Los Angeles—Hollywood Storage FF	alluvium	Whittier-Narrows, October 1, 1987	6.1(M _L)	25	90, 360	0.12, 0.21
Los Angeles—Obregon Park	alluvium	Whittier-Narrows, October 1, 1987	6.1(M _L)	10	360, 270	0.44, 0.45
Long Beach—Rancho Los Cerritos	alluvium	Whittier-Narrows, October 1, 1987	6.1(M _L)	27	90, 360	0.25, 0.15
San Marino—Southwestern Academy	alluvium	Whittier-Narrows, October 1, 1987	6.1(M _L)	8	360, 270	0.20, 0.15
Tarzana—Cedar Hill Nursery	alluvium	Whittier-Narrows, October 1, 1987	6.1(M _L)	44	90, 360	0.63, 0.46
Whittier—7215 Bright Tower	alluvium	Whittier-Narrows, October 1, 1987	6.1(M _L)	10	90, 360	0.63, 0.43
Alba—900 S. Fremont	alluvium	Whittier-Narrows, October 1, 1987	6.1(M _L)	8	90, 360	0.29, 0.25
Capitola—Fire Station	alluvium	Loma Prieta, October 17, 1989	7.1(M _S)	9	90, 360	0.39, 0.46
Hollister—South and Pine	alluvium	Loma Prieta, October 17, 1989	7.1(M _S)	48	90, 360	0.17, 0.36
Oakland—Two story office building	alluvium	Loma Prieta, October 17, 1989	7.1(M _S)	92	290, 200	0.24, 0.19
Stanford—Parking Garage	alluvium	Loma Prieta, October 17, 1989	7.1(M _S)	51	360, 90	0.26, 0.22

solute value of the relative displacement divided by the yield displacement; R_y = the system's yield resistance; and ω , ξ , and η = the natural circular frequency, the damping ratio, and the nondimensional strength of the system, respectively. The latter three quantities are defined as

$$\omega = \left(\frac{k}{m} \right)^{1/2} \dots \dots \dots (3)$$

$$\xi = \frac{c}{2m\omega} \dots \dots \dots (4)$$

$$\eta = \frac{R_y}{m \max|\ddot{\mu}_k|} \dots \dots \dots (5)$$

where k = the initial stiffness of the system.
 A constant displacement ductility IRS is a plot of the yield strength of an SDOF system (with period T) required to limit the displacement to specified displacement ductility ratios, μ_k . This type of spectra is also referred to as strength demand spectra (Krawinkler and Nassar 1990). In this study, constant displacement ductility IRS were computed by iteration on the system's nondimensional strength η until the ductility computed with (2) was, within a certain tolerance, the same as the specified ductility (i.e.,

TABLE 3. Selected Ground Motions Recorded at Soft Sites

Station name (1)	Geology (2)	Earthquake date (3)	Magnitude (4)	Epicentral distance (km) (5)	Component (6)	PGA (g) (7)
Bucharest — Building Research Institute	soft	Romania, March 4, 1977	7.1(M_s)	174	EW, SN	0.17, 0.20
SCT—Secretaria de Comunicaciones Transportes	soft clay	Michoacan, Sept. 19, 1985	8.1(M_s)	385	N90W, S00E	0.17, 0.10
Central de Abastos—Frigorifico	soft clay	Michoacan, Sept. 19, 1985	8.1(M_s)	389	99.53, 77.52	0.10, 0.08
Central de Abastos—Oficina	soft clay	Michoacan, Sept. 19, 1985	8.1(M_s)	389	76.56, 67.95	0.08, 0.07
Colonia Roma	soft clay	Acapulco, April 25, 1989	6.9(M_s)	320	N90W, S00E	0.06, 0.05
Emeryville — Free Field South	bay mud	Loma Prieta, October 17, 1989	7.1(M_s)	97	350, 260	0.21, 0.26
Emeryville — Free Field North	bay mud	Loma Prieta, October 17, 1989	7.1(M_s)	97	350, 260	0.20, 0.22
Oakland—Outer Harbor Wharf	bay mud	Loma Prieta, October 17, 1989	7.1(M_s)	95	305, 125	0.27, 0.29
Treasure Island—Naval Base	fill	Loma Prieta, October 17, 1989	7.1(M_s)	98	90, 360	0.16, 0.10
San Francisco — International Airport	bay mud	Loma Prieta, October 17, 1989	7.1(M_s)	79	90, 360	0.53, 0.23
San Francisco — 18-story commercial building	fill over bay mud	Loma Prieta, October 17, 1989	7.1(M_s)	95	980, 350	0.13, 0.16
Foster City — Redwood Shores	bay mud	Loma Prieta, October 17, 1989	7.1(M_s)	63	90, 0	0.28, 0.26

target ductility). The tolerance was chosen such that η was considered satisfactory if the computed ductility was within 1% of the target ductility.

The following values of target ductilities were selected for this investigation: 1 (elastic behavior), 2, 3, 4, 5, and 6. For each earthquake record and each target ductility the IRS were computed for a set of 50 periods. Due to the large number of records, ductilities, and periods of vibration combined with the computational effort involved in calculating constant displacement ductility IRS through iteration, this study was limited to SDOF systems that have a bilinear hysteretic behavior with a postelastic stiffness equal to 3% of the elastic stiffness and with a damping ratio of 5%.

It has been observed that the shape of both elastic and inelastic spectra varies greatly with changes of the predominant period of the ground motion (Miranda and Bertero 1991). For design purposes, what is important is to characterize the seismic demands on structures built on soft soils with fundamental periods that are shorter, longer, or near the predominant period. Thus, for ground motions recorded on very soft soil, the IRS were not computed for a fixed set of periods T but for a fixed set of $50/T T_g$ ratios, where T_g is the predominant period of the ground motion, which in this

investigation is approximated by the period corresponding to the linear and 5% damped SDOF system that experiences the maximum velocity. An example on the estimation of T_g for a soft soil site in the San Francisco Bay area is as shown in Fig. 1.

Strength demand spectra were normalized by peak ground acceleration $\max |\ddot{u}_{g_i}|$ (PGA) and by effective peak ground acceleration (EPA) as defined in the seismic provisions recommended by the Applied Technology Council (Tentative 1978)

$$EPA = \frac{\bar{S}_a}{2.5} \dots \dots \dots (6)$$

where \bar{S}_a = the average spectral acceleration of 5% damped SDOF systems with periods between 0.1 and 0.5 s.

It has been suggested that constant displacement ductility IRS can be computed by interpolation from constant strength IRS or constant yield displacement IRS (Elghadamsi et al. 1987; Mahin et al. 1983). While such procedure is conceptually correct and can produce significant computational savings, it has been shown (Miranda 1991) that it can lead to significant errors in the required lateral strength of a given system in order to avoid a certain ductility demand. The magnitude of the error will depend, among other factors, on: the interpolation method (linear or nonlinear), the spacing between interpolation points, the period of the structure, the target ductility, and the ground motion. In particular, an interpolation procedure to compute constant ductility IRS may produce significant errors when ductility demands do not increase monotonically as the yield strength of the structure decreases. In this case there is more than one strength corresponding to a given target ductility. An example of this phenomenon is illustrated in Fig. 2. It shows that there are three different normalized strengths η that produce a displacement ductility equal to 3. For seismic design only the root with the largest strength is of interest. This strength corresponds to the minimum

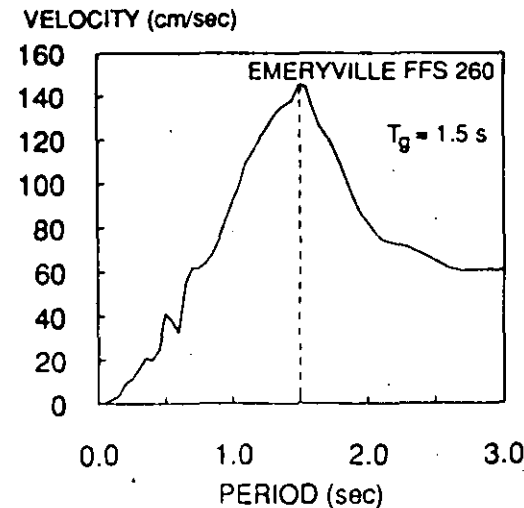


FIG. 1. Estimation of Predominant Period of Ground Motion Recorded in San Francisco Bay Area

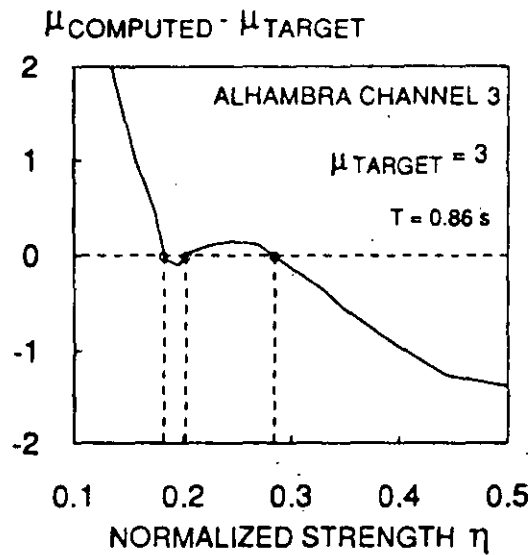


FIG. 2. Example of Multiple Yielding Strengths that Produce Same Ductility Demand

strength required by the structure (i.e., strength that needs to be supplied) in order to limit the ductility demand to the target ductility.

PRESENTATION OF RESULTS

Inelastic Strength Demands

For each soil category and each period (for each T/T_g ratio in the case of soft soils) normalized strength demands were averaged. The resulting mean strength demand spectra are shown in Fig. 3. The spectra are plotted for displacement ductility ratios of 1–6 (from top to bottom). It can be seen that the largest dynamic amplification factor (DAF) occurs for soft soil sites for periods that are close to the predominant period of the site. For the records considered in this study, the average DAF is more than 22% larger than that observed for rock and alluvium sites. This observation agrees well with DAF computed from ground motions recorded in the 1985 Mexican earthquake and the 1989 Loma Prieta earthquake where ground motions from firm sites and soft soil sites were obtained from relatively close stations (Bertero 1986; Bertero et al. 1991). However, some previous studies on LERS (Seed et al. 1974; Kiremidjian et al. 1980) presented larger DAFs for rock and alluvium sites than that of soft soil sites. There are two possible explanations for this difference: (1) Soft soils included in this study are softer than those included in previous investigations; and (2) in previous investigations average spectra were presented as a function of T and not as a function of T/T_g , as is done in this study.

Independent of the normalizing parameter or the type of soil for ductility demands larger than 5, strength demands decrease monotonically with increasing period. It can also be observed that regardless of soil conditions and of the level of ductility, normalized strength demands are larger when the normalizing parameter is EPA than they are when PGA is used. This

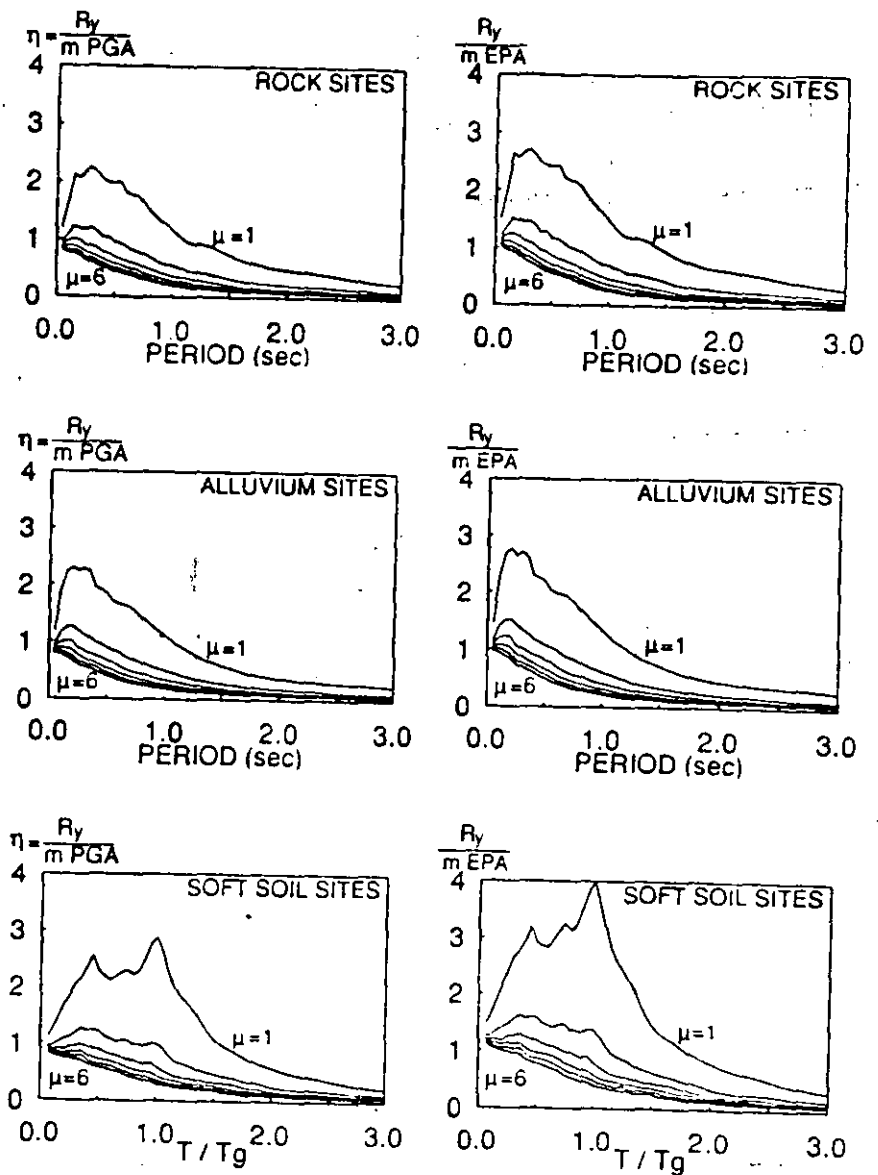


FIG. 3. Mean Normalized Strength Demand Spectra (μ from 1 to 6. Top to Bottom Line)

is a result of PGA being usually larger than EPA for a given ground motion. In the case of soft soil sites, the EPA, whose definition was based on ground motions recorded on firm sites, is considerably smaller than the PGA. It is recommended that the constant appearing in the denominator of (6) be modified according to the soil conditions at the recording station.

As shown in Fig. 3, the shape of elastic spectra differ significantly from

that of inelastic spectra. The larger the ductility demand, the larger this difference is. Site conditions significantly affect both elastic and inelastic strength demands. However, the effects are different for elastic systems from those on inelastic systems. This can be seen more clearly in Fig. 4, which compares the effects of site conditions on elastic strength demand and on inelastic strength demand. It clearly shows that factors that relate linear to inelastic spectra (i.e., force reduction factors) are site dependent.

While mean strength demand spectra provide information on the most probable demands on a structure, it is important to consider the dispersion of these demands. One way of measuring the dispersion is by computing the coefficient of variation (COV), which is defined as the ratio of the standard deviation to the mean. Fig. 5 presents COVs of strength demands normalized using PGA for ground motions recorded on rock. It shows that COVs are nearly the same for different levels of ductility, which means that

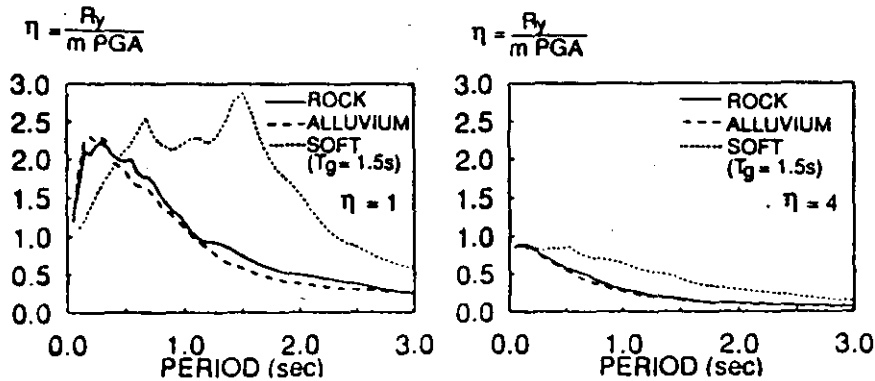


FIG. 4. Effects of Site conditions on Elastic Response Spectra and on Inelastic Response Spectra

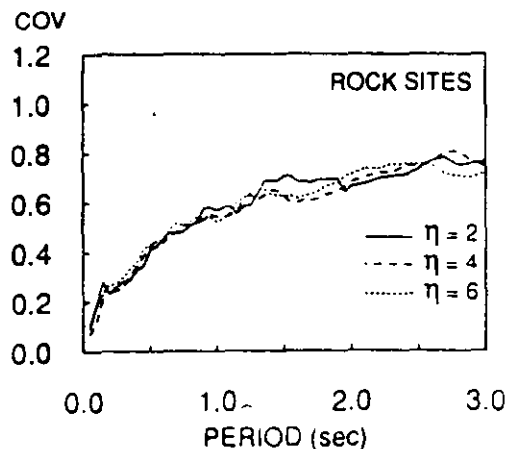


FIG. 5. COV of Strength Demands Normalized by PGA for Ground Motions Recorded on Rock Sites

the dispersion on inelastic strength demand does not increase with increasing ductility demands.

As noted in previous investigations (Nau and Hall 1982), the use of acceleration parameters to normalize the spectra produces an increase in dispersion in the long-period range. Relatively large COVs are produced in the long-period region; however, strength demands are usually very small in this region, and in general, the design of buildings in this region is more likely to be governed by lateral stiffness (i.e., story drift). As illustrated in Fig. 6, except for periods between 0.1 and 0.5 s, COVs are larger for spectra normalized using EPA than for spectra normalized using PGA.

There are many structures that because of their importance or the consequences of their failure are designed for forces higher than those corresponding to mean values. Strength demand spectra (normalized using PGA) corresponding to mean-plus-one standard deviation are shown in Fig. 7 for ground motions recorded on rock sites and recorded on soft soil sites. Analogous spectra for alluvium sites as well as those normalized using EPA can be found in Miranda (1991).

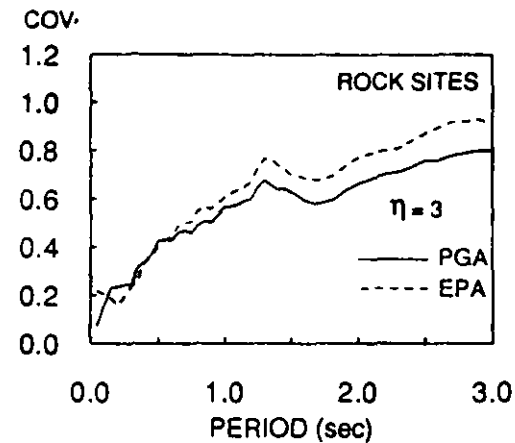


FIG. 6. Effect of Normalizing Parameter on COV of Normalized Inelastic Strength Demands

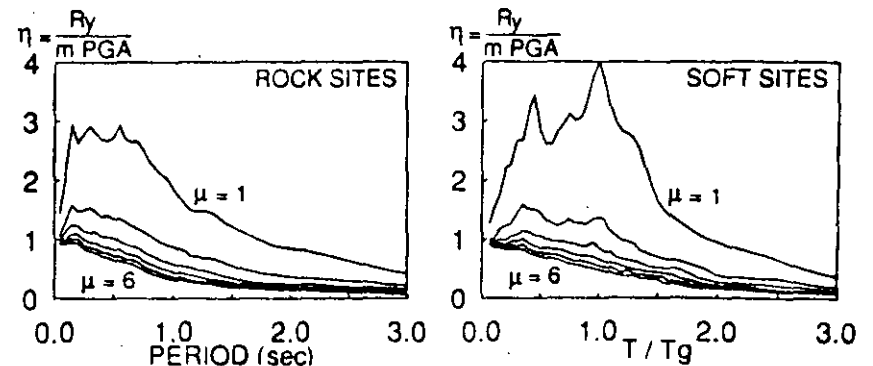


FIG. 7. Mean-Plus-One Standard Deviation Normalized Strength Demand Spectra

To study the effect of earthquake magnitude on IRS, records on each soil category were subdivided in groups according to the surface wave magnitude, M_s , of the earthquake in which they were recorded. Variations of normalized inelastic strength demands with changes in M_s for ground motions recorded on rock and for displacement ductilities of 2 and 4 are shown in Fig. 8. While normalized strength demands from records from a 7.1 magnitude earthquake are in general higher than those from earthquakes with magnitudes between 5.3 and 5.6, the same trend is not observed for magnitudes between 7.8 and 8.1. It should be noted that the number of records in each group is relatively small and that all records in the intermediate magnitude group are from the same earthquake (the Loma Prieta earthquake). Similarly earthquakes with magnitudes between 7.8 and 8.1 are related to subduction mechanisms. Further research is needed to establish the effect of magnitude on inelastic strength demands.

Inelastic Displacement Demands

A proper seismic design is attained when the strength and deformation capacity of the structure are larger than the corresponding demands. It is common practice to assume that inelastic displacements, $\Delta_{inelastic}$, are the same as elastic displacements, $\Delta_{elastic}$, and thus to use elastic analyses to estimate the inelastic displacements that the structure may undergo during severe earthquake ground motions.

To know to what extent inelastic displacements can be predicted using linear elastic analyses, the ratio of maximum inelastic to maximum elastic displacement was computed for a total of 31,000 different SDOF systems (product of 124 ground motions, 50 periods, and five levels of displacement ductility). Again, the results were classified and analyzed statistically according to the site conditions on each recording station.

Fig. 9 shows the mean displacement ratios, $\Delta_{inelastic}/\Delta_{elastic}$, for ground motions recorded on alluvium sites and soft soil sites. As observed in previous studies, in the short-period range inelastic displacement demands can be considerably larger than elastic demands. Previous studies have recommended fixed periods (independent of site conditions and μ) to specify spectral regions in which elastic analyses can be used to estimate inelastic displacement demands (Newmark et al. 1969; Riddell et al. 1979). However, it can be seen in Fig. 9 that these limiting periods are clearly dependent on

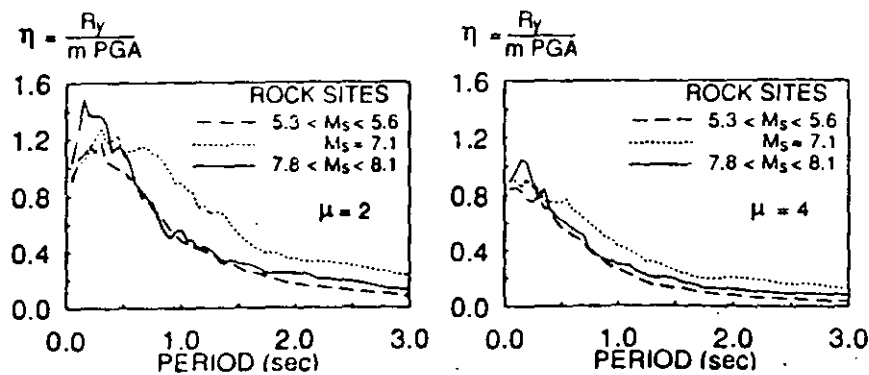


FIG. 8. Effect of Earthquake Magnitude on Inelastic Strength Demand Spectra

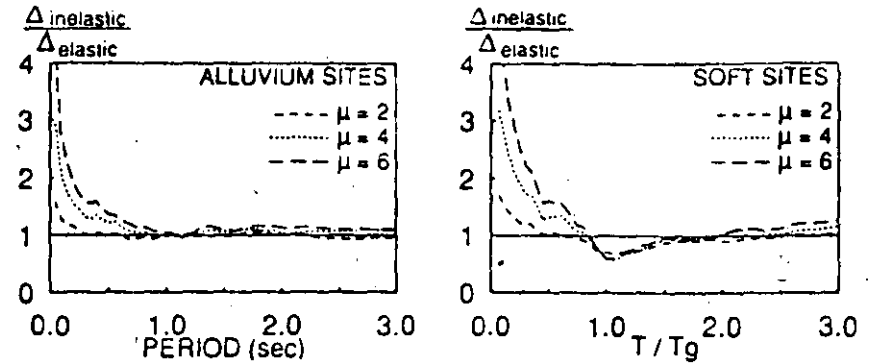


FIG. 9. Mean Displacement Ratios for Alluvium and Soft Soil Sites

ductility and on the local site conditions. For an alluvium site, for example, for a ductility of 2 the inelastic displacements are approximately the same as elastic displacements for periods greater than 0.4 s, while for a ductility of 6 such an assumption is only valid for periods greater than about 1.1 s. For structures built on soft soil and with periods near the site-predominant period, the maximum inelastic displacement can be up to 45% smaller than the maximum elastic displacement. On the other hand, for values $T < 2/3 T_g$, the inelastic displacements are significantly higher. The smaller the T/T_g ratio, the larger the difference is, and it tends to be proportional to the value of μ . For structures with periods longer than 1.5 times the predominant period of the site, the inelastic displacements are on average equal to the elastic displacements.

PRACTICAL IMPLICATIONS OF RESULTS

Inelastic Design Spectra

Current seismic loading for building structures in the United States and many other countries is based on the reduction of smoothed linear elastic design spectra (SLEDS) through empirical and period-independent reduction factors. As previously discussed, the difference between the shape of LERS and IRS increases with increase in ductility. Thus, the error in using period-independent reduction factors to estimate IRS from LERS also increases as ductility increases.

Elastic and inelastic design spectra recommended by the National Earthquake Hazard Reduction Program ("Recommended" 1988) for special moment-resisting space frames (SMRSF) compared with strength demands based on this study are shown in Fig. 10. Strength demands in this figure are computed using mean normalized strength demands assuming an \dot{E}_A of 0.5 g for rock sites and of 0.4 g for the soft soil sites. The predominant period for the soft site is assumed to be 1.5 s. It shows that for rock sites, elastic strength demands are higher than the code elastic strength for periods between 0.1 and 2.2 s. For soft soil sites it can be seen that, despite the introduction of soil type S_w , elastic demands are significantly higher than code elastic strengths for periods between 0.3 to 2.3 s. Comparing inelastic strength demands with code-reduced strength it can be seen that for periods smaller than 2.5 s the code-required strengths are smaller and in some cases

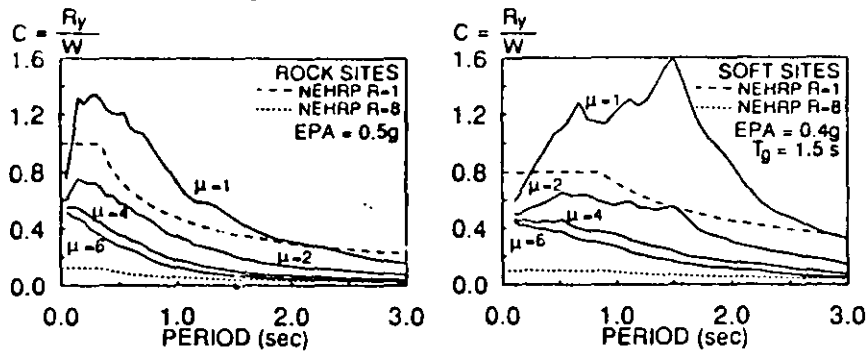


FIG. 10. Comparison of Mean Strength Demands with Those Required by 1988 NEHRP for SMRSF

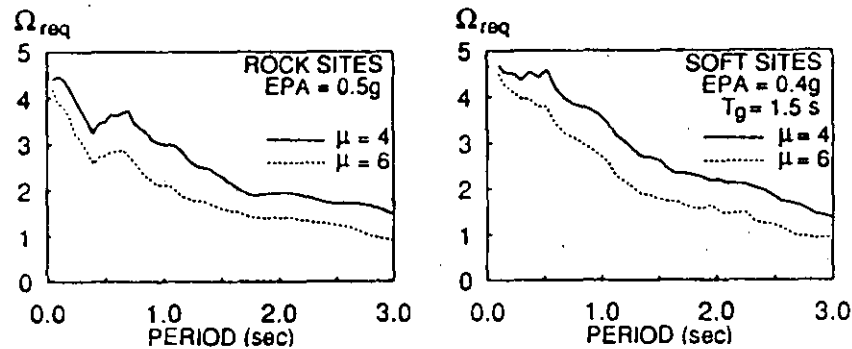


FIG. 11. Overstrengths Required in SMRSF Designed According to 1988 NEHRP in Order Not to Exceed Displacement Ductility Ratios of 4 and 6

four times smaller than strength required to avoid displacement ductility ratios of 6. This suggests that if SMRSF structures have only the minimum strength required by the NEHRP code they could collapse in the event of a large-magnitude earthquake.

Fortunately, as shown in various studies (Osteraas et al. 1990; Miranda 1991; Bertero et al. 1991), buildings designed according to current codes typically have a strength significantly higher than the one considered in design. This additional strength is usually referred to as overstrength. Fig. 11 shows the minimum overstrength required, Ω_{req} , by SMRSF designed according to NEHRP in order to avoid displacement ductility demands larger than 4 and larger than 6. It shows that, in general, required overstrengths increase with decreasing periods. In some cases SMRSF structures need to have a strength more than four times larger than the minimum required by the code in order to have an acceptable performance. While short period structures are likely to have a higher overstrength than medium- and long-period structures, it is difficult to guarantee that all code-designed structures possess such large overstrengths.

The required overstrengths computed in Fig. 11 are based on mean strength demands. Much higher required overstrengths result if strength demands associated with smaller probability of occurrence (for example, mean-plus-one standard deviation strength demands) are considered, or higher EPAs are considered (which is likely to be the case for rock sites near the epicenter in large-magnitude earthquakes).

It should be noted that the results presented here are for SDOF. Required overstrengths for multi-degree-of-freedom (MDOF) systems are likely to be higher, particularly in the long-period range, and for buildings where inelastic deformations concentrate in only a few stories.

If the overstrength in the structure is less than the required overstrength, the structure is likely to suffer significant damage and possible collapse during severe earthquake ground motions. There is a need to study and calibrate the overstrength of new and existing buildings for a wide range of periods and structural systems.

Estimation of Lateral Drifts

There is a general consensus that both nonstructural and structural damage sustained during earthquake ground motions is primarily produced by lateral drifts. Therefore, a good estimation of lateral inelastic displacements is of great importance for the adequate design of structures in seismic regions. In current U.S. seismic codes, inelastic displacements are computed as the product of elastic displacements produced by the reduced seismic forces times an amplification factor. The NEHRP uses the displacement amplification factor C_d , and the UBC uses a factor of $3R_n/8$ where R_n is the force reduction factor (referred to in this code as system performance factor). For both provisions the amplification factors are period independent and empirical in nature. As shown in Fig. 9, the ratio of inelastic to elastic displacements is not only strongly period and ductility dependent, but also significantly influenced by site conditions. Thus, with deficiencies in the estimation of inelastic strength demands and on amplification factors, significant underestimation of inelastic deformations is expected to occur by using current code procedures, particularly for short-period structures.

CONCLUSIONS

Results from a comprehensive statistical study of both strength and deformation demands of SDOF inelastic systems when subjected to 124 ground motions recorded on different soil conditions has been presented. Based on these results, a number of general conclusions are made.

1. The shape of inelastic response spectra differs significantly from the shape of elastic response spectra. This difference depends on the level of inelastic deformation, the local site conditions, the period of vibration. Thus, direct scaling by using a period-independent factor of elastic spectra to obtain inelastic strength demands is neither rational nor conservative.
2. Dispersion of inelastic strength demands normalized by either PGA or EPA increases with increasing period. Except for periods below 0.5 s the use of EPA results in a larger dispersion than when PGA is used. For both normalizing parameters the dispersion on strength demands is approximately independent of the level of inelastic deformation.
3. Periods that limit the use of elastic analyses to estimate inelastic displacement demands were observed to depend on local site conditions.

on the of inelastic deformation. For structures on rock or alluvium sites and periods of vibration greater than 1.0 s, the elastic displacement demands provide, on the average, a good approximation to the inelastic displacement demands.

4. Evaluation of both strength and deformation demands of structures on soft soil requires the estimation of the predominant period of the site. For structures on soft soil sites and with fundamental periods near the predominant site period, the inelastic displacement demands can be significantly smaller than the elastic displacements. On the other hand, for structures with periods smaller than two-thirds of the predominant site period, the inelastic displacements are significantly higher.

5. The estimation of design forces and displacements based on inelastic strength demand spectra together with estimates of the overstrength of a structure can lead to a more rational and transparent approach than the currently used empirical code design approach.

ACKNOWLEDGMENTS

The work presented in this paper was conducted while the writer was a graduate student at the University of California at Berkeley working under the supervision of Vitelmo Bertero, whose guidance is appreciated. This research was partially sponsored by the National Science Foundation under grant No. BCS-9003739. Views expressed are those of the writer and do not necessarily reflect those of the sponsor.

APPENDIX I. NORMALIZED EQUATION OF MOTION

It is convenient to normalize (1) by dividing it by the product of the mass and the yield displacement of the SDOF system. Such normalization leads to

$$\frac{\ddot{u}(t)}{u_y} + \frac{c}{m} \frac{\dot{u}(t)}{u_y} + \frac{1}{m} \frac{R(t)}{u_y} = -\frac{\ddot{u}_g(t)}{u_y} \quad (7)$$

Substitution of (3) and (4) into (7) gives

$$\frac{\ddot{u}(t)}{u_y} + 2\omega\xi \frac{\dot{u}(t)}{u_y} + \frac{1}{m} \frac{R(t)}{u_y} = -\frac{\ddot{u}_g(t)}{u_y} \quad (8)$$

The last two terms in (8) can be reworked as follows:

$$\frac{1}{m} \frac{R(t)}{u_y} = \frac{k}{m} \frac{R(t)}{ku_y} = \omega^2 \frac{R(t)}{R_y} \quad (9)$$

$$\frac{\ddot{u}_g(t)}{u_y} = \omega^2 \frac{m\ddot{u}_g(t)}{R_y} = \frac{\omega^2}{\eta} \frac{\ddot{u}_g(t)}{\max|\ddot{u}_g|} \quad (10)$$

The ductility demand at time t is given by

$$\mu(t) = \frac{u(t)}{u_y} \quad (11)$$

Substitution of (9) and (11) into (8) leads to

$$\ddot{\mu}(t) + 2\omega\xi\dot{\mu}(t) + \omega^2 \frac{R(t)}{R_y} = -\frac{\omega^2}{\eta} \frac{\ddot{u}_g(t)}{\max|\ddot{u}_g|} \quad (12)$$

APPENDIX II. REFERENCES

Benioff, H. (1934). "The physical evaluation of seismic destructiveness." *Bull. Seismological Society Am.*, 24(2), 398-403.

Bertero, V. V. (1986). "Lessons learned from recent earthquakes and research implications for earthquake-resistant design of building structures in U.S." *Report No. EERC/UCB-86/03*, Earthquake Engrg. Res. Ctr., Univ. of California, Berkeley, Calif.

Bertero, V. V., Anderson, J. C., Krawinkler, H., and Miranda, E. (1991). "Design guidelines for ductility and drift limits." *Report No. EERC/UCB-91/15*, Earthquake Engrg. Res. Ctr., Univ. of California, Berkeley, Calif.

Biot, M. A. (1941). "A mechanical analyzer for the prediction of earthquake stresses." *Bull. Seismological Society Am.*, 31(2), 151-171.

Blume, J. A., Sharpe, R. L., and Dalal, J. S. (1973). "Recommendations for shape of earthquake response spectra." *Report AEC WASH-1254*, John A. Blume and Assoc., Engrs., San Francisco, Calif.

Der Kiureghian, A. (1980). "Probabilistic modal combination for earthquake loading." *Proc. 7th World Conf. on Earthquake Engrg.*, Turkish Society on Earthquake Engrg., Istanbul, Turkey, 729-736.

Earthquake resistant regulations—A world list. (1988). Int. Association of Earthquake Engrg., Tsukuba, Japan.

Elghadamsi, F. E., and Mohraz, B. (1987). "Inelastic earthquake spectra." *Earthquake Engrg. and Struct. Dynamics*, 15(1), 91-104.

Hall, W. J., Mohraz, B., and Newmark, N. M. (1976). "Statistical studies of vertical and horizontal earthquake spectra." *Report USAEC AT(49-5)-2667*, Nathan M. Newmark Consulting Engrg. Services, Urbana, Ill.

Hayashi, S., Tsuchida, H., and Kurata, E. (1971). "Average response spectra for various subsoil conditions." *Proc. Third Joint Meeting, U.S.-Japan Panel on Wind and Seismic Effects*, U.S.-Japan Cooperative Program in Natural Resources, Tokyo, Japan, May 10-12.

Housner, G. W. (1959). "Behavior of structures during earthquakes." *J. Engrg. Mech. Div., ASCE*, 85(4), 109-129.

Katayama, T., Iwasaki, T., and Saeki, M. (1978). "Statistical analysis of earthquake acceleration response spectra." *Trans. Japan Soc. of Civ. Engrg.*, 10, 311-313.

Kiremidjian, A. S., and Shah, H. C. (1980). "Probabilistic site-dependent response spectra." *J. Struct. Div., ASCE*, 106(1), 69-86.

Krawinkler, H., and Nassar, A. (1990). "Strength and ductility demands for SDOF and MDOF systems subjected to Whittier Narrows earthquake ground motions." *CSMIP-1990*, California Dept. of Conservation, Sacramento, Calif.

Lai, S. P., and Biggs, J. M. (1980). "Inelastic response spectra for aseismic building design." *J. Struct. Div., ASCE*, 106(6), 1295-1310.

Mahin, S. A., and Lin, J. (1983). "Construction of inelastic response spectra single-degree-of-freedom systems." *Report No. UCB/EERC-83/17*, Earthquake Engrg. Res. Ctr., Univ. of California, Berkeley, Calif.

Miranda, E. (1991). "Seismic evaluation and upgrading of existing buildings." Ph.D. thesis, Univ. of California, Berkeley, Calif.

Miranda, E., and Bertero, V. V. (1991). "Evaluation of structural response factors using ground motions recorded during the Loma Prieta earthquake." *CSMIP-1991*, California Dept. of Conservation, Sacramento, Calif.

Mohraz, B. (1976). "A study of earthquake response spectra for different soil conditions." *Bull. Seismological Society Am.*, 66(3), 915-935.

Mohraz, B., Hall, W. J., and Newmark, N. M. (1973). "A study of vertical and horizontal earthquake spectra." *Report AEC WASH-1253*, Nathan M. Newmark Consulting Engrg. Services, Urbana, Ill.

Murakami, M., and Penzien, J. (1975). "Nonlinear response spectra for probabilistic seismic design and damage assessment of reinforced concrete structures." *Report*

- No. UCB/EERC-75-38. Earthquake Engr. Res. Ctr., Univ. of California, Berkeley, Calif.
- Nau, J. M., and Hall, W. J. (1982). "An evaluation of scaling methods for earthquake response spectra." *Struct. Res. Series No. 499*, Civ. Engrg. Dept., Univ. of Illinois, Urbana-Champaign, Ill.
- Newmark, N. M., and Hall, W. J. (1969). "Seismic design criteria for nuclear reactor facilities." *Proc. of the Fourth World Conf. on Earthquake Engrg.*, Chilean Association on Seismology and Earthquake Engrg., Santiago, Chile, 2(B-4), 37-50.
- Osteraas, J. D., and Krawinkler, H. (1990). "Strength and ductility considerations in seismic design." *Report No. 90*, The John A. Blume Earthquake Engrg. Center, Stanford Univ., Stanford, Calif.
- "Recommended provisions for the development of seismic regulations for new buildings." (1988). *Publication No. 95*, Fed. Emergency Mgmt. Agency, Washington, D.C.
- Riddell, R., and Newmark, N. M. (1979). "Statistical analysis of the response of nonlinear systems subjected to earthquakes." *Struct. Res. Series No. 468*, Dept. of Civ. Engrg., Univ. of Illinois, Urbana, Ill.
- Riddell, R., Hidalgo, P., and Cruz, E. (1989). "Response modification factors for earthquake resistant design of short period structure." *Earthquake Spectra*, 5(3), 571-590.
- Seed, H. B., Ugas, C., and Lysmer, J. (1974). "Site-dependent spectra for earthquake-resistant design." *Report No. EERC 74-12*, Earthquake Engrg. Res. Ctr., Univ. of California, Berkeley, Calif.
- "Tentative provisions for the development of seismic regulations for buildings." (1978). *Report ATC 3-06*, Applied Tech. Council, Palo Alto, Calif.
- Trifunac, M. D. (1988). "The Whittier Narrows, California earthquake of October 1, 1987—Note on peak accelerations during the 1 and 4 October earthquakes." *Earthquake Spectra*, 4(1), 101-113.
- Trifunac, M. D., and Lee, V. V. (1989). "Empirical models for scaling pseudo-velocity spectra of strong earthquake ground acceleration in terms of magnitude, distance, site intensity and recording site conditions." *Int. J. Soil Dynamics and Earthquake Engrg.*, 8(3), 126-144.
- Uniform building code. (1988). Int. Conf. of Bldg. Officials, Whittier, Calif.
- Veletsos, A. S. (1969). "Response of ground-excited elastoplastic systems." *Report No. 6*, Rice Univ., Houston, Tex.

APPENDIX III. NOTATION

The following symbols are used in this paper:

- c = damping coefficient;
- k = initial stiffness;
- m = mass;
- R = restoring force;
- R_y = yield resistance;
- T = period of vibration;
- T_d = predominant period of site;
- u = relative displacement;
- \ddot{u}_g = ground acceleration;
- u_y = yield displacement;
- $\Delta_{elastic}$ = maximum elastic displacement;
- $\Delta_{inelastic}$ = maximum inelastic displacement;
- η = normalized strength;
- ξ = damping ratio;
- Ω_{req} = required overstrength; and
- ω = circular frequency.

4.

Evaluation of Seismic Design Criteria for Highway Bridges

Eduardo Miranda, M.EERI

After an overview of the development of U.S. seismic design specifications for highway bridges an evaluation of current Caltrans and AASHTO seismic criteria is presented. Linear and nonlinear response spectra of ground motions recorded on different soil conditions in the Loma Prieta earthquake and other recent earthquakes are compared with code recommendations. Special emphasis is placed on how present design procedures reduce elastic forces to take into account the energy absorption capacity of the structure, and on the estimation of maximum inelastic deformations. Results indicate that current design recommendations may underestimate strength and deformation demands, particularly for short-period bridges and for bridges on soft soils. Finally, recommendations are made on how seismic design specifications may be improved.

INTRODUCTION

The Loma Prieta earthquake of October 17, 1989, a 7.1 surface wave magnitude earthquake caused 62 deaths, approximately 3,750 injuries, and produced more than \$6 billion in property damage. The cost of the earthquake to transportation systems was \$1.8 billion, of which damage to state-owned bridges totaled about \$300 million, most of which were built on soft soil [7]. The most dramatic impact of the earthquake was the collapse of the Cypress Street Viaduct in which forty-two people died. The cause of the failure of this structure was attributed to the lack of knowledge in the practice of earthquake engineering at the time the structure was built (as reflected in the level of seismic loading, redundancy considerations and detailing practices) [7,10,12]. Given the significant probability of occurrence of future earthquakes with magnitudes equal to or larger than this event, it is of utmost importance to study the seismic vulnerability of highway bridges built according to old and current standards.

Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, CA 94720.
Currently at the Civil Engineering Department, Swiss Federal Institute of Technology,
CH-1015, Lausanne, Switzerland.

There is a general consensus that the greatest source of uncertainty in the determination of the response of structures to earthquake ground motions is that associated with the prediction of the intensity and characteristics of the seismic input. The Loma Prieta earthquake produced a large number of ground motions recorded on different soil conditions which offer a good opportunity to evaluate current seismic design criteria.

The objectives of this paper are: first, to present an overview of the evolution of seismic design criteria for highway bridges in the United States; and second, to evaluate current California Department of Transportation (Caltrans) and American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) seismic Design Specifications in view of recent earthquakes. Special emphasis is placed on the implications of ground motions recorded in the Loma Prieta earthquake. It is beyond the scope of this paper to discuss the distribution of design forces within the different elements which comprise the bridge-foundation system, as well as detailing and dimensioning requirements for these elements. Similarly, the paper does not discuss seismic criteria for base-isolated bridges which have been recently examined in Ref. 8.

HISTORICAL OVERVIEW OF BRIDGE SEISMIC DESIGN PRACTICE

The first code requirement in the U.S. for design of highway bridges to resist seismic forces was introduced by Caltrans (formerly the California State Highway Department) in 1940 [16]. In this first set of specifications, bridges had to be designed to resist an horizontal force which was a percentage (determined by the engineer) of the dead load. A specific percentage of the dead load to be applied as lateral force was introduced by Caltrans in 1943. This percentage was specified to vary between 2 and 6% depending of the type of foundation and soil bearing capacity.

AASHTO, formerly AASHO, incorporated their first seismic provisions in 1941. While this and the two subsequent editions recognized that bridges needed to be designed to resist earthquake forces, no specific recommendations were given on how these forces were to be determined. The 1961 edition of the AASHTO seismic provisions was the first edition to specify how earthquake forces were to be determined. These seismic provisions were essentially the same as the 1943 Caltrans recommendations.

In 1965 Caltrans adopted the Structural Engineers Association of California (SEAOC) code formulation by specifying seismic forces that were the product of the weight of the structure times a seismic coefficient that was a function of the period of vibration ($C=0.05/T^{1/3}$), times a factor K to explicitly account for the energy absorption capacity of the structure. The factor K varied from 0.67 to 1.33 depending on the type of structural system used in the bridge.

The 1971 San Fernando earthquake caused significant damage to highway bridges in California [6]. As a result of this event a major revision of seismic design criteria was initiated. The revised criteria were first introduced by Caltrans as a design memo in 1973 and formally published as a Design Specification in 1974. The Design Specification considered the relationship between the bridge site and the active faults in California by using a maximum credible earthquake map developed by Greensfelder at the California Division of Mines and Geology. This 1974 design criteria, which is the basis of the current Caltrans specifications, is based on a reduced linear elastic response spectrum, which yields seismic forces determined by

$$V = \frac{ARS}{Z} W \quad (1)$$

where the product of the three factors A, R, and S define the elastic response spectrum at the site that would result from a maximum credible event on the closest fault. In this equation A is the expected peak rock acceleration, R the normalized acceleration spectrum in rock, and S is the spectral soil amplification ratio. The reduction in forces for which individual elements are designed is done by dividing the ARS linear elastic spectrum by the Z adjustment factor for ductility and risk assessment. This Z factor takes into account the amount of ductility available in a particular component. In addition to ductility, the Z factor contains a judgement risk factor that reflects the degree of success of highway bridges in the San Fernando earthquake. A risk factor of 2 was thus

REDUCTION FACTOR

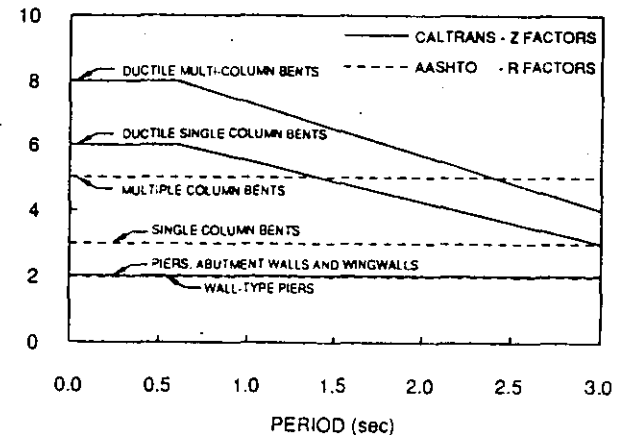


Figure 1 Reduction factors currently used by Caltrans and AASHTO.

selected for column members in structures with periods less than 0.6 sec. and a linearly decreasing risk factor (to 1) for periods between 0.6 and 3 seconds. The initial version of these criteria presented the designer with a set of pre-reduced design forces to be used in the analysis. This pre-reduced version, coupled with increased usage of spectral analysis resulted in much confusion among design engineers [6]. As a result of this confusion, and in order to provide the designer with better estimates of the deformations in the bridge, Caltrans changed its recommendations, first as a Memo in 1976 and later in 1977 as Design Specifications to apply the Z factor *after* the earthquake forces had been distributed.

The 1975 AASHTO code was expanded to include the 1973 Caltrans earthquake criteria. In 1983, the AASHTO Guide Specifications for Seismic Design of Highway Bridges was published following the completion of substantial research sponsored by the Federal Highway Administration (FHWA) and Caltrans [2]. The 1983 AASHTO code retained the requirements of the 1975 code but allowing the designer the optional use of the Guide Specification. In 1990 AASHTO adopted the Guide Specification as the Specification. In their latest (1991) edition these specifications are referred as Standard Specifications for Seismic Design of Highway Bridges [15]. The seismic design criteria in the Standard Specifications are based on modifications to previously published seismic regulations for buildings [1]. In this set of recommendations the seismic

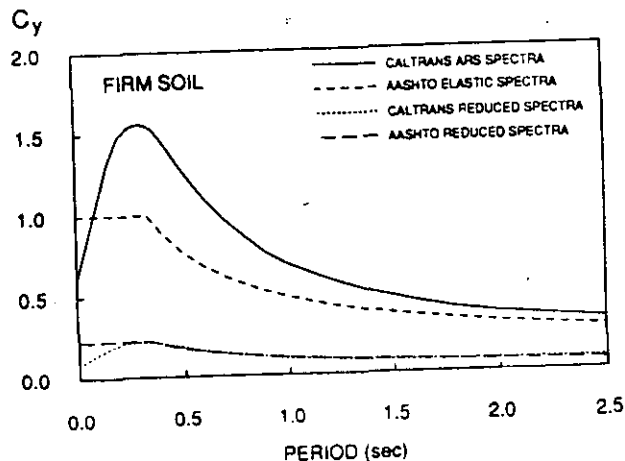


Figure 2 Comparison of elastic and reduced spectra currently used by Caltrans and AASHTO for multi-column bridges on firm soil sites.

forces for which structural elements are designed are the result of the distribution of forces equal to

$$V = \frac{C_s}{R} \cdot W \quad C_s = \frac{1.2 A S}{T^{2/3}} \quad (2)$$

where C_s is a smoothed linear elastic response spectrum, A is the acceleration coefficient, S is a dimensionless factor depending on the soil profile at the site, T is the period of vibration, W is the weight of the structure, and R is the response modification factor. In these recommendations, the reduction of forces (division by R) is also done *after* the elastic earthquake forces have been distributed by analysis of the structure.

The rationale behind the development of the R factors was based on considerations of redundancy and ductility provided by the various supports [15]. Figure 1 shows a comparison of Z reduction factors as used in the 1990 Caltrans Bridge Design Specifications and R reduction factors as used in the 1991 AASHTO Standard Specifications for Seismic Design of Highway Bridges. It can be seen that the reductions used by Caltrans for multi-column bridges are larger than the AASHTO reductions in the short period range and smaller for long period bridges. In some cases the difference between AASHTO and Caltrans reduction factors is substantial, as in the case of short-period ($T < 0.5$ s), single-column bents where the reduction recommended by Caltrans is twice that recommended by AASHTO.

Figure 2 shows a comparison of linear elastic design spectra and reduced design spectra as used in current Caltrans and AASHTO specifications for multi-column bridges on firm soil sites with highest seismicity. In this figure, C_y is the base shear normalized by the weight of the structure W . It can be seen that there is a significant difference in the linear elastic spectra used in these design specifications, however, the reduced spectra are very similar (except for periods less than 0.25 second). A similar comparison but for multi-column bridges on soft-soil sites is shown in Figure 3. Although the differences between AASHTO and Caltrans reduced spectra are more noticeable than in the case of firm sites these differences are much smaller than those between the corresponding elastic spectra.

As mentioned before, most of the damage to highway bridges resulting from the Loma Prieta earthquake occurred in soft soil sites. Thus, it is of interest to see how the required strength has changed with time in the two sets of specifications. A comparison of strength design spectra of the Caltrans and AASHTO recommendations from 1943 to 1991 is shown in Fig. 4. In this figure, strength spectra of code provisions based only on allowable stress design (1943-1973 codes) have been increased to strength level by multiplying them by 1.5. Similarly, for code provisions based on strength design for reinforced concrete bridges, the reduced spectra have been divided by 0.9 to reflect the increase in strength that may occur due to the use of flexural strength reduction factors. As illustrated in the figure with the exception of Caltrans 1965-1973 design specifications, the required strength of both sets of recommendations has not changed much over years.

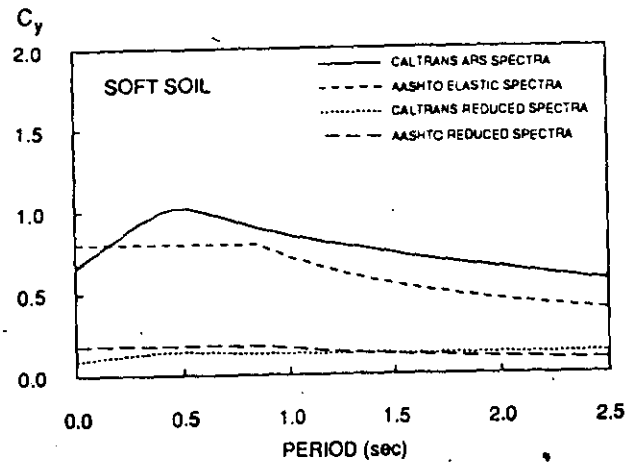


Figure 3 Comparison of elastic and reduced spectra currently used by Caltrans and AASHTO for multi-column bridges on soft soil sites.

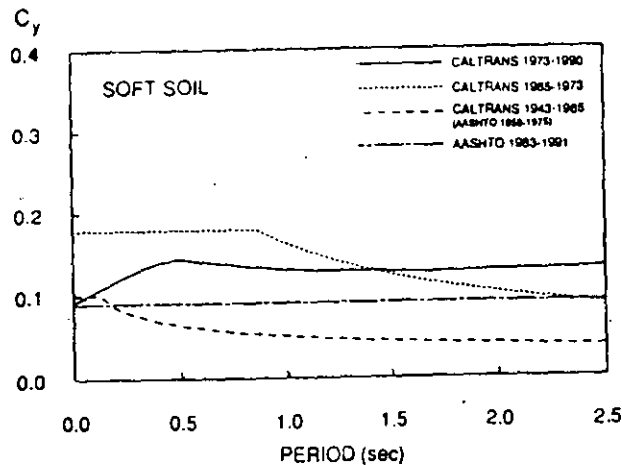


Figure 4 Evolution of AASHTO and Caltrans strength design spectra for multi-column bridges on soft soil sites.

EVALUATION OF CALTRANS AND AASHTO DESIGN SPECIFICATIONS

ESTIMATION OF STRENGTH DEMANDS

For both sets of design criteria, linear elastic response spectra constitute the starting point for computing elastic forces, displacements, and design forces for individual structural members. Figure 5 shows a comparison of 5%-damped linear elastic response spectra of three ground motions recorded on rock or firm soil conditions in recent earthquakes (two records are from the Loma Prieta earthquake and the other record is from the 1985 Chile earthquake) with Caltrans ARS spectra (for $A=0.6$ and soil conditions characterized by 0 to 10 ft of alluvium deposits) and AASHTO's Guide Specifications C_y spectra (for $A=0.4$ and $S=1.0$). This figure illustrates that although current elastic design spectra take into account seismicity, ground motion attenuation and site effects, they may still underestimate forces and deformations that could occur in future earthquakes. This is especially true for the AASHTO (ATC-6) elastic spectra which is particularly unconservative in predicting elastic demands for periods between 0.15 and 0.6 second. With the exception of base-isolated and long-span bridges most highway bridges have fundamental periods smaller than 0.6 second.

Figure 6 shows a comparison of 5%-damped linear elastic response spectra of three ground motions recorded on soft soil sites in recent earthquakes with AASHTO spectra (for $A=0.4$ and $S=1.5$) and with Caltrans ARS spectra (for $A=0.7$ and soil conditions defined by deep alluvium deposits). With exception of the SCT record the linear elastic spectra seem adequate. However, it is important to notice that the peak ground accelerations of these 3 records are relatively low compared to those considered in the development of the code spectra shown in the figure. Although limited by nonlinearities in the clay deposits, higher accelerations are likely to occur at the two Bay Area sites in closer and/or larger magnitude earthquakes than those recorded during the Loma Prieta earthquake.

Linear elastic response spectra give good estimates of the forces that could be developed in bridges responding elastically, however, severe earthquake ground motions will produce yielding in the structure and then linear elastic models fail to predict the strength and deformation demands on such structures. In Fig. 7 the reduced spectra for multiple column bridges used by Caltrans and AASHTO are compared with nonlinear response spectra of elasto-perfectly-plastic single-degree-of-freedom (SDOF) systems undergoing displacement ductilities equal to 3 when subjected to three ground motions recorded on rock or firm soil on recent earthquakes. This figure shows that for bridges with periods less than 0.6 s strength demands can be significantly higher than those used in both design specifications. Thus, indicating that most bridges need a strength higher than the minimum required by these specifications in order to avoid displacement ductility ratios higher than three.

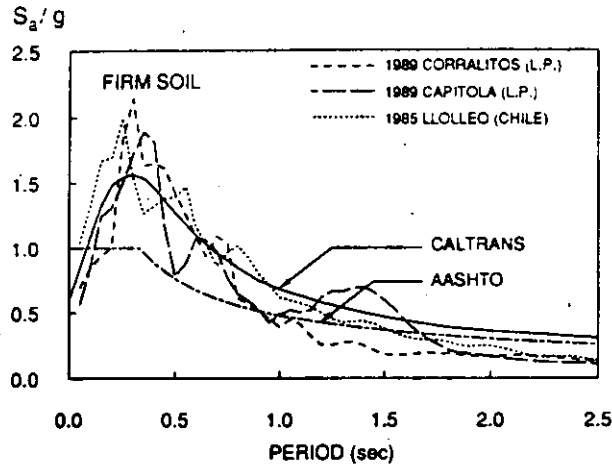


Figure 5 Comparison of AASHTO and Caltrans linear spectra with the 5% damped linear elastic spectra of three ground motions recorded on rock or firm soil.

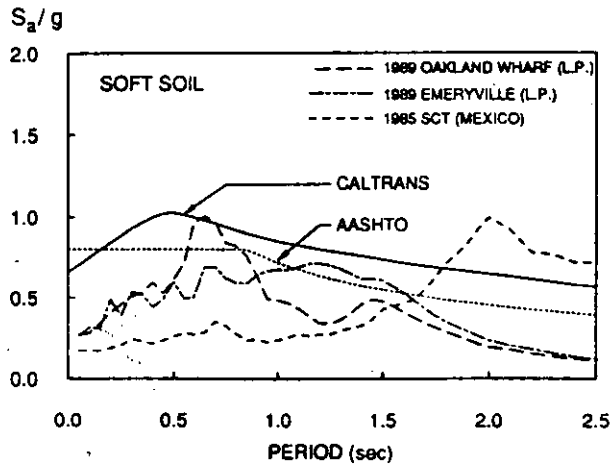


Figure 6 Comparison of AASHTO and Caltrans linear spectra with the 5% damped linear elastic spectra of three ground motions recorded on soft soil.

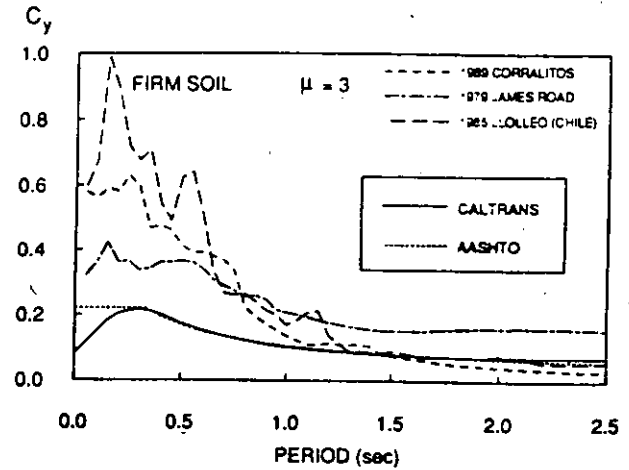


Figure 7 Nonlinear response spectra (for $\mu=3$) of three ground motions recorded on rock or firm soil compared with Caltrans and AASHTO strength design spectra.

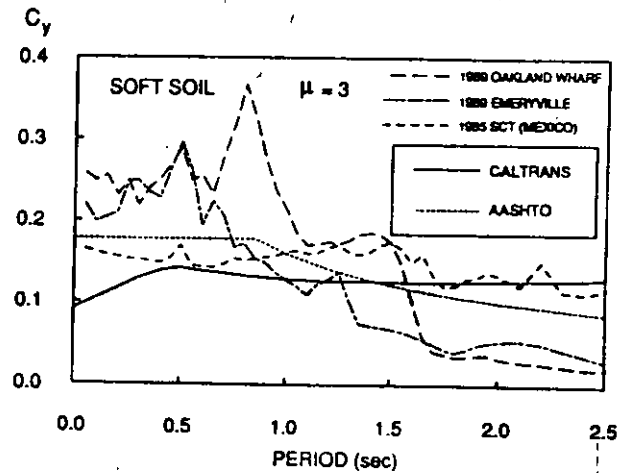


Figure 8 Nonlinear response spectra (for $\mu=3$) of three ground motions recorded on soft soil compared with Caltrans and AASHTO strength design spectra.

A similar comparison for soft soil records and reduced design spectra for soft soil is presented in Fig. 8. In this case, although the recommended elastic spectra seemed adequate (Fig. 6), the reduced spectra are again unconservative in the short period range. Although the spectrum computed for the SCT ground motion exhibits unusual amplifications due to the combination of a long distance from the source and special characteristics of the clay deposits in Mexico City, nevertheless the ground motions recorded at the two Bay Area sites during the Loma Prieta earthquake point out that there are soft soil sites in the U.S. which at present are not appropriately addressed by current design specifications for soft sites.

The strength demand reductions, R_μ , that are achieved by hysteretic (nonlinear) behavior in structures, are defined as the ratio of the strength demand of the elastically responding system, to the strength demand of a nonlinear system undergoing a certain ductility, μ . Mathematically this reduction is expressed as

$$R_\mu = \frac{C_y(\mu=1)}{C_y(\mu=\mu_i)} \quad (3)$$

where $C_y(\mu=1)$ is the lateral strength (normalized by the weight of the structure) that is required to maintain the structure elastic under a given ground motion, and $C_y(\mu=\mu_i)$ is the lateral strength (normalized by the weight of the structure) that is required to avoid displacement ductility demands larger than μ_i under the same ground motion.

Figure 9 compares the reductions in systems undergoing displacement ductility ratios equal to 4 when subjected to three rock (or firm soil) records. Reductions for multi-column bridges assumed by Caltrans and AASHTO recommendations are also included in the figure. It can be seen that the reductions considered in these specifications are, in general, greater than those resulting from the three ground motions considered here.

As shown in Fig. 9 for a given displacement ductility ratio the strength reduction R_μ varies from one ground motion to another. Recently, statistical studies on the response of nonlinear systems when subjected to a relatively large number of recorded earthquake ground motions were completed [9, 11]. Figure 10 shows a comparison of strength reduction recommended by Caltrans and AASHTO for multi-column bents with those computed for SDOF nonlinear systems undergoing displacement ductility ratios of 2 and 4 when subjected to ground motions recorded on rock and ground motions recorded on alluvium. The strength reductions shown in this figure were computed for SDOF systems having a bilinear hysteretic behavior with a post-elastic stiffness equal to 3% of the elastic stiffness and a constant damping coefficient corresponding to a damping ratio of 5%. It can be seen that, for a given displacement ductility ratio, mean strength reductions are characterized by important variations with changes in the period of the system. In general, strength reductions are smaller in the short period range and

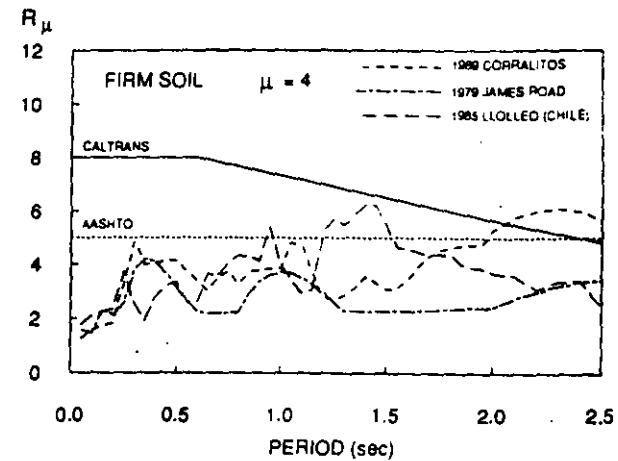


Figure 9 Reductions in strength demand of SDOF nonlinear systems (for $\mu=4$) when subjected to three ground motions recorded on rock or firm soil.

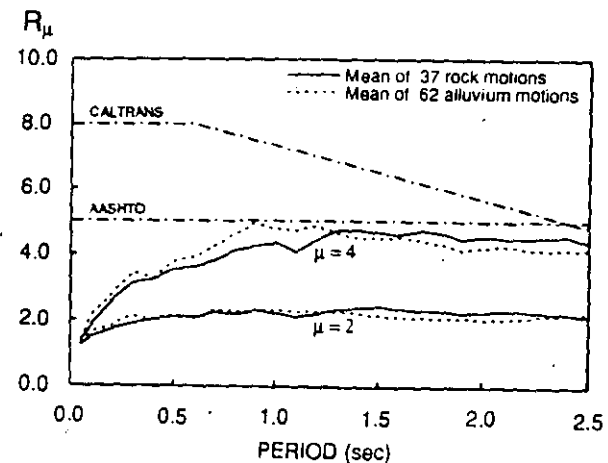


Figure 10 Comparison of strength reduction factors recommended by Caltrans and AASHTO for multi-column bents with those from statistical analysis.

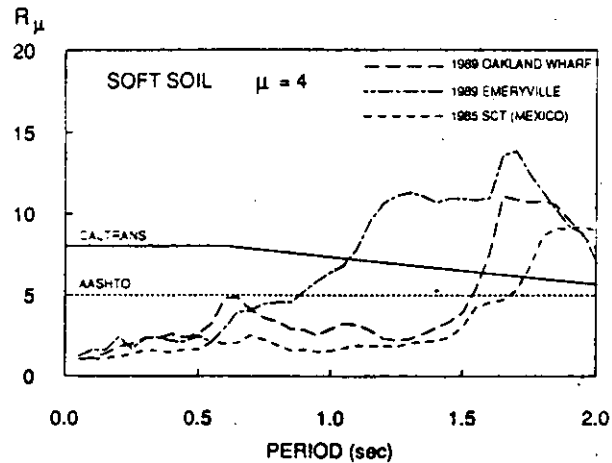


Figure 11 Reductions in strength demand of SDOF nonlinear systems (for $\mu=4$) when subjected to three ground motions recorded on soft soil.

increase with increasing period up to a certain limiting period where mean reductions become approximately equal to the displacement ductility ratio. This limiting period depends on the maximum level of inelastic deformation. Its value increases with increasing ductility demand.

Contrary to the period variations shown by mean strength reductions, strength reductions recommended by AASHTO are constant (period-independent). Caltrans reductions do have variations with period, but it is interesting to note that their trend is *opposite* to the trend produced in nonlinear SDOF systems subjected to recorded earthquake ground motions: that is, the Caltrans reductions decrease with increasing period while the computed reductions increase with increasing period. In the short period range (i.e., for most highway bridges) code reductions are larger than mean reductions computed here, indicating that bridges designed under these recommendations could experience ductilities in excess of four if they do not have significant overstrength above the minimum code-required lateral strength. This problem is exacerbated for bridges on soft soil sites where reductions produced by nonlinear behavior in structures with short periods are even smaller, as illustrated in Fig. 11 where Caltrans and AASHTO strength reductions are compared with strength reductions computed for nonlinear systems subjected to three soft soil records. It can be seen that for periods smaller than 0.6 s Caltrans and AASHTO strength reductions are between 2 and 8 times larger than those computed for SDOF systems.

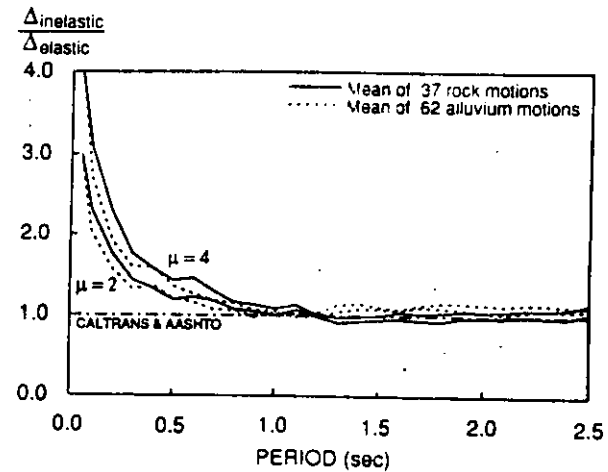


Figure 12 Comparison of the ratio of maximum inelastic to maximum elastic deformations used by Caltrans and AASHTO with those from statistical analysis.

Although additional reductions to those prescribed by R_μ can be taken into account in design due to overstrength in the structure, present reductions in both sets of design specifications may still be unconservative. Recent experimental research on small-scale and full-scale reinforced-concrete bridge columns has shown that overstrength in flexural capacities with respect to values predicted by ACI recommendations (essentially the same as Caltrans and AASHTO in this respect) is between 1.08 and 1.35 for columns with axial load ratios ($P/f'_c A_g$) less than 0.3. [13, 17]. Furthermore, if refined flexural strength calculation methods (based on confined concrete models and strain-hardening reinforcement models) are used, the overstrength in the columns (ratio of actual to analytical strength) can be much closer to 1.0.

ESTIMATION OF DISPLACEMENT DEMANDS

Seismic damage to highway bridges is primarily produced by lateral deformations. Therefore, an adequate estimation of lateral inelastic displacements is of great importance for the adequate design of highway bridges in seismic regions. A study of Figs. 5 and 6 reveals that code recommendations underestimate linear elastic forces (particularly the AASHTO specifications) and therefore an unconservative estimation of defor-

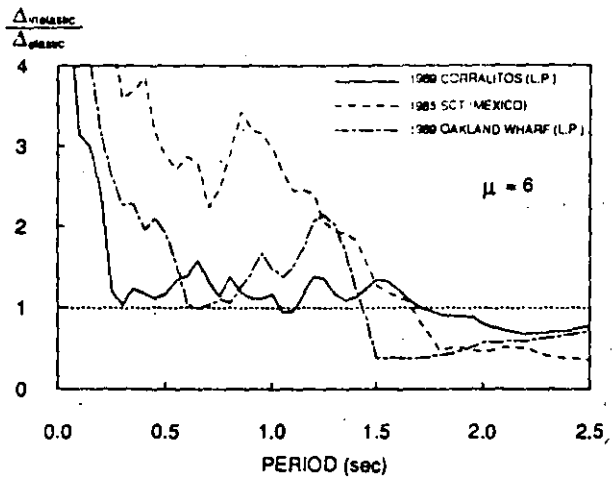


Figure 13 Ratio of inelastic to elastic displacements of SDOF systems when subjected to three recently recorded ground motions.

mations will also result, since both recommendations use elastic forces to estimate the bridge deformations. Furthermore, by using elastic forces to estimate maximum deformations, both codes assume that the maximum displacements of linear and nonlinear systems are the same. While this assumption is approximately true for long period structures built on rock or firm soils, it does not apply for structures with short periods nor to most structures built on very soft soils [4, 9]. Figure 12 shows mean ratios of the maximum displacement of nonlinear systems ($\Delta_{inelastic}$) to the maximum displacement of elastic systems ($\Delta_{elastic}$) for displacement ductility ratios of 4 and 6. It can be seen that for systems with periods smaller than 0.5 s the maximum displacement of systems behaving nonlinearly is significantly larger than that of linear elastic systems. This observation is particularly important for structures on soft soil sites. Figure 13 shows the ratio displacements of nonlinear systems undergoing displacement ductilities of 6 to displacements in linear elastic systems for three recently recorded ground motions. It can be seen that for short-period structures on very soft soil sites (i.e. bay mud deposits in Oakland wharf or old lake bed deposits in Mexico City) the use of elastic analyses can underestimate the maximum deformations by more than 100%.

ESTIMATION OF DUCTILITY DEMANDS

The 1990 Caltrans specifications compute member ductility demands, μ_D , by obtaining the ratio of the moments computed in a linear elastic analysis, M_{EQ} to the nominal moment capacity of the member, M_n , thus

$$\mu_D = \frac{M_{EQ}}{M_n} \quad (4)$$

Such a procedure is also based on the *equal displacement* assumption, so for spectral regions where this assumption is invalid (i.e. the short period range) an underestimation of ductility demand results. For certain ground motions recorded on soft soil this assumption may be unconservative for periods as long as 1.4 seconds.

CONSIDERATION OF BRIDGE IMPORTANCE

The Loma Prieta earthquake has showed that depending on the location and volume of vehicles that make use of a bridge, interruptions in service can have substantially different consequences. As an example, one may compare the consequences between the collapse of a bridge with moderate daily traffic like the Struve Slough Bridge (on California Highway 1) and the consequences of the collapse of the Cypress Street Viaduct or the damage to the San Francisco freeway viaducts which are located in zones of heavy daily traffic. The damage to these structures highlights the significance of tougher criteria for highway bridges of special importance as reflected by the location of the bridge, average daily traffic, existence of alternate routes, access to critical facilities, etc.

Present seismic design philosophy is based on the avoidance of collapse of the structure in the event of severe earthquake ground motions and in the case of bridges it recognizes that serious damage and possible closure may happen following an earthquake.

Caltrans design specifications do not contain specific requirements for bridges of special importance. AASHTO Guide Specifications include a bridge classification which separates essential bridges from other bridges. In these specifications essential bridges are those that must continue to function after an earthquake, however, for zones of the U.S. where the acceleration coefficient, A , is larger than 0.29, no difference in design or analysis requirements exist for these two categories (seismic performance categories C and D) except for the design of the foundation. There is a need of seismic design criteria that, in a rational manner, tries to maintain the functionality of essential bridges after severe earthquake ground motions.

RETROFITTING OF EXISTING HIGHWAY BRIDGES

In California alone there are more than 11,280 existing highway and pedestrian bridges with spans over 20 feet, many of which were designed according to pre-1973 design specifications. AASHTO does not have standards for the seismic retrofit of existing bridges, while Caltrans has a set of procedures and details for use by designers. Although reports have been published in this area [3, 5, 14], no code or technical standards have been officially adopted for the seismic retrofit of existing bridges. Problems encountered in the repair and retrofit of the San Francisco viaducts and other highway bridges in California reflect our need for research and design specifications that specifically address the seismic upgrading of existing bridges.

CONCLUSIONS

The California Department of Transportation 1990 Bridge Design Specifications and the American Association of State Highway and Transportation Officials 1990 Standard Specifications for Seismic Design of Highway Bridges may underestimate strength and deformation demands of highway bridges that experience severe earthquake ground motions. Unless they have significantly overstrength over the minimum required by these specifications, bridges with short periods of vibration built on soft soil may be particularly susceptible to severe damage in the event of nearby large magnitude earthquakes.

Based on the results of this study the following recommendations are made to improve current seismic design criteria for highway bridges:

- Lateral strength is an important parameter in controlling the maximum deformations as well as the ductility demand (and thus the damage) to short period bridges. The use of design forces based on nonlinear spectra together with analysis techniques that take into account nonlinear deformations can lead to more rational design criteria.
- If future editions of these specifications are to be based on reduced linear elastic spectra, it is recommended that: (i) elastic spectra of rock sites be improved (especially in the case of AASHTO); (ii) linear spectra representative of very soft soils be developed; (iii) more rational reduction factors be used that take into account damping, overstrength and energy dissipation as well as the influence of the fundamental period of the bridge and the site conditions; (iv) procedures be implemented to estimate total deformations and ductility demands that take into account the fact that inelastic deformations may be larger than elastic displacements.
- There is a need to study and calibrate the overstrength of new and existing highway bridges with different characteristics (number of spans, spans lengths, type of bents, etc.).

- It is desirable that the importance of the bridge, as reflected by the location of the bridge, average daily traffic, existence of alternate routes, access to critical facilities as well as other issues such as reparability and economical considerations be taken into account in its seismic design.

ACKNOWLEDGEMENTS

Dr. Ian Aiken of the Earthquake Engineering Research Center reviewed an earlier version of this manuscript. His assistance is acknowledged. My gratitude is also extended to Professors Vitelmo V. Bertero and Alexander C. Scordelis and to Katherine A. Frohberg for the information provided for this study. The comments and suggestions of the three anonymous reviewers to this paper is greatly acknowledged.

REFERENCES

1. Applied Technology Council, "Tentative Provisions for the Development of Seismic Regulations for Buildings," Publication No. ATC 3-06, June 1978.
2. Applied Technology Council, "Seismic Design Guidelines for Highway Bridges," Publication No. ATC-6, October 1981.
3. Applied Technology Council, "Seismic Retrofitting Guidelines for Highway Bridges," Publication No. ATC-6-2 (also Report No. FHWA/RD-83/007), August 1983.
4. Bertero, V.V., Anderson, J.C., Krawinkler, H., and Miranda, E., "Design Guidelines for Ductility and Drift Limits," Report No. UCB/EERC - 91/15, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, July 1991.
5. Buckle, I.G., Mayes, R.L., and Button, M.R., "Seismic Design and Retrofit Manual for Highway Bridges," Report No. FHWA/IP-87/6, Fed. Highway Administration, May 1987.
6. Gates, J.H., "Factors Considered in the Development of the California Seismic Design Criteria for Bridges," Workshop on the Earthquake Resistance of Highway Bridges, Applied Technology Council, November 1979.
7. Governor's Board of Inquiry on the 1989 Loma Prieta Earthquake, "Competing Against Time," State of California, May 1990.
8. Mayes, R.L., Buckle, I.G., Kelly, T.E., and Jones, L.R., "AASHTO Seismic Isolation Design Requirements for Highway Bridges," Journal of Structural Engineering, Vol. 118, No. 1, January 1992, pp. 284-304.
9. Miranda, E., "Seismic Evaluation and Upgrading of Existing Buildings," Thesis submitted for partial satisfaction of the requirements of the degree of Doctor of Philosophy in Engineering, University of California at Berkeley, May 1991.
10. Miranda, E., and Bertero, V.V., "Evaluation of the Failure of the Cypress Viaduct in the Loma Prieta Earthquake," Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 81, No. 5, October 1991, pp. 2070-2086.

11. Miranda, E., "Nonlinear Response Spectra for Earthquake Resistant Design," Proceedings of the Tenth World Conference on Earthquake Engineering, Madrid, Spain, July 1992.
12. Nims, D.K., Miranda, E., Aiken, I.D., Whittaker, A.S., and Bertero, V.V., "Collapse of the Cypress Street Viaduct as a Result of the Loma Prieta Earthquake," Report No. UCB/EERC-89/16, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, November 1989.
13. Priestley, M.J.N., and Park, R., "Strength and Ductility of Bridge Substructures," Report No. 84-20, Department of Civil Engineering, University of Canterbury, New Zealand, December 1984.
14. Priestley, M.J.N., Seible, F., and Chai, Y.H., "Seismic Retrofitting of Bridge Columns," Department of Applied Mechanics and Engineering Sciences, University of California, San Diego, 1988.
15. Standard Specifications for Seismic Design of Highway Bridges, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington D.C., 15th edition, 1991.
16. State of California, Department of Transportation, "Presentation by Caltrans to Governor's Board of Inquiry on the 1989 Loma Prieta Earthquake," Testimony presented by Caltrans to the Board of Inquiry, November 28, 1989.
17. Stone, W.C., and Cheok, G.S., "Inelastic Behavior of Full-Scale Bridge Columns Subjected to Cyclic Loading," Report No. 166, Building Science Series, National Institute of Standards and Technology, January 1989.

PROBABILISTIC SITE-DEPENDENT NON-LINEAR SPECTRA

EDUARDO MIRANDA*

Earthquake Engineering Research Center, University of California at Berkeley, 1306 South 46th St., Richmond, CA 94804, U.S.A.

SUMMARY

This paper presents a probabilistic approach to the estimation of lateral strengths required to provide an adequate control of inelastic deformations in structures during severe earthquake ground motions. In contrast to a deterministic approach, the approach presented herein accounts explicitly for the variability of the response of non-linear systems due to the inherent uncertainties in the intensity and characteristics of the input excitation by considering the probability distribution of maximum inelastic strength demands. This study is based on the computation of non-linear strength demands of single-degree-of-freedom (SDOF) systems experiencing different levels of inelastic deformation when subjected to 124 recorded earthquake ground motions. Using empirical cumulative distribution functions site-dependent probabilistic non-linear spectra were computed for six probabilities of exceedance of different levels of inelastic deformation. It is concluded that the lateral strength required to control displacement ductility demands is significantly affected by the maximum tolerable inelastic deformation, the system's period of vibration, the local site conditions and the level of risk in exceeding the maximum tolerable deformations.

INTRODUCTION

Present seismic design philosophy establishes that a structure should resist frequent minor earthquakes without damage, occasional moderate earthquakes without structural damage and rare but probable earthquake ground motions without collapse. Several studies¹⁻³ have concluded that one of the major problems in the implementation of this design philosophy is that associated with the large uncertainty in predicting the intensity and characteristics of future earthquake ground motions at a given site.

Building structures are commonly analysed and designed using lateral forces that are based on deterministic response spectra combined with empirical reduction factors to account for force reductions due to inelastic behaviour.⁴ An important shortcoming of this approach is that it does not consider explicitly the uncertainty in the response due to the uncertainties in the excitation. A probabilistic approach allows for the explicit consideration and quantification of this uncertainty in the response of structures to earthquake ground motions.

Using random vibration techniques several investigations have developed procedures to estimate the maximum response of linear systems to random excitations.⁵⁻¹¹ In other investigations probability-based concepts have been applied in the computation of probabilistic response spectra for systems responding elastically.¹²⁻¹⁴ However, building structures designed according to the previously mentioned seismic design philosophy are likely to experience significant inelastic excursions whose corresponding forces and deformations cannot be predicted with linear elastic models.

There are only a few studies that have considered non-linear structural behaviour in the computation of probabilistic response spectra. Riddell and Newmark¹⁵ computed non-linear spectra by combining mean plus one standard deviation elastic spectra with mean deamplification factors. For a greater degree of conservatism, they provided probability distribution parameters to compute elastic spectra and deamplification factors associated with smaller probabilities of exceedance. Murakami and Penzien¹⁶, and more recently

*Research Engineer, Currently at the Department of Civil Engineering, Swiss Federal Institute of Technology, CH-1015, Lausanne, Switzerland.

Conte *et al.*,¹⁷ presented constant strength probabilistic non-linear response spectra (PNRS) based on artificially generated accelerograms. Neither of these two studies on PNRS considered the effect of soil conditions which according to several studies¹⁸⁻²⁰ can influence significantly the response of structures to earthquake ground motions.

The aim of this study is to improve the estimation of inelastic strength demands on structures when subjected to earthquakes. The objectives of this paper are threefold: (1) to study the probability distribution of inelastic spectral ordinates as functions of the period of vibration, level of inelastic deformation, and local site conditions, (2) to develop cumulative distribution functions based on the response of single-degree-of-freedom (SDOF) systems of 124 ground motions recorded in various earthquakes and (3) to present site-dependent PNRS associated with six levels of probability of non-exceedance for different levels of inelastic deformation.

INELASTIC STRENGTH DEMAND SPECTRUM

The response of a damped SDOF system when subjected to an earthquake excitation is given by

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + R = -m\ddot{x}_g \quad (1)$$

where m , c and R are the mass, damping coefficient and restoring force of the system, respectively; x is the relative displacement, x_g is the ground displacement and the dot over a quantity represents its derivative with respect to time. The initial period of the system is given by,

$$T = 2\pi \left(\frac{m}{k} \right)^{1/2} = 2\pi \left(\frac{m x_y}{R_y} \right)^{1/2} \quad (2)$$

where k is the initial stiffness of the system, R_y is the system's yield strength and x_y is the yield displacement.

A displacement response spectrum is a plot of the period of vibration (T) versus the maximum absolute value of the relative displacement of the SDOF system when subjected to a certain ground acceleration time history. In the case of systems responding in a non-linear fashion, it is convenient to plot the initial period of vibration (T) versus the displacement ductility ratio, defined as the ratio of the maximum absolute relative displacement to its yield displacement,

$$\mu = \frac{\max |x|}{x_y} \quad (3)$$

The displacement ductility ratio is thus an indicator of the level of inelastic deformation experienced by the system. A constant strength non-linear spectrum is a plot of the displacement ductility ratio (i.e. ductility demand) of system with period T having either constant strength or constant normalized strength.

In earthquake-resistant design, the structure must be dimensioned and detailed such that the local (storey and member) ductility demands are smaller than their corresponding capacities. Therefore, in the preliminary design of a building structure, there is a need to estimate the lateral strength (lateral load capacity) of the structure that is required to limit the global (structure) displacement ductility demand to a certain predetermined value, which results in the control of local ductility demands.

A constant displacement ductility non-linear spectrum is a plot of the lateral strength of a SDOF (with period T) required to limit the displacement ductility demand to a certain value (target ductility). Computation of a constant displacement ductility response spectrum involves iteration (for each period and each target ductility) on the lateral strength R_y using equation (1) until the computed ductility demand μ is, within a certain tolerance, the same as the target ductility. Thus, although the computation of constant ductility non-linear spectra, also referred to as inelastic strength demand spectra, can involve several times more computational effort than that involved in the computation of constant strength non-linear spectra, they are more useful in earthquake-resistant design.

Iteration on the lateral strength using equation (1) in some cases does not yield a unique result, i.e. there can be more than one lateral strength that produces the same displacement ductility demand. In those cases, only the largest lateral strength is of interest for design purposes. This lateral strength capacity corresponds

to the minimum strength required by the structure in order to limit the ductility demand to the target ductility.

EARTHQUAKE RECORDS AND SYSTEMS CONSIDERED

Unlike the response of linear systems, the response of non-linear systems is very sensitive to the characteristics of individual acceleration pulses and their sequence within an earthquake ground motion.^{20,21} Depending on how artificial acceleration time histories are generated they may or may not reproduce the characteristics of recorded ground motions. Given the uncertainties in the characteristics of future earthquake ground motions at a site, it is particularly important that a family of artificially generated earthquakes reflects the variability found in recorded motions. O'Connor and Ellingwood³ reported coefficients of variation 50 to 60 per cent higher in the response of non-linear systems subjected to an ensemble of 20 recorded ground motions than that of non-linear systems subjected to three different families of artificially generated ground motions.

For this study 124 ground motions recorded on various earthquakes were selected, with emphasis on those recorded on California and on those which have produced significant damage during the last six years. Most of the records selected represent the so-called 'free-field' conditions.

Ground motions were classified according to the local site conditions at the recorded station. For many sites there exists very limited information on the soils conditions; therefore, the site classification was based on a simple criterion and information which was available for all recording stations. Thus, ground motion records were classified into three categories: (1) those recorded on rock, (2) those recorded on alluvium and (3) those recorded on very soft soils deposits characterized by low shear wave velocities. Complete listing of all ground motions including some data on the earthquake in which they are recorded, the epicentral distance and the peak ground acceleration (PGA) are presented in Tables I-III.

A total of 37 200 inelastic strength demands were computed corresponding to six different levels of inelastic deformation (target ductilities), and 50 periods of vibration between 0.05 and 3.0 s when subjected to the selected acceleration time histories.

In the case of ground motions recorded on soft soils, the seismic demands on both linear and non-linear systems are strongly dependent on the predominant period of the motion.^{20,22} Thus, for records in this category the inelastic strength demands were not computed for a fixed set of periods T but for a fixed set of fifty T/T_r ratios, where T_r is the predominant period of the ground motion, which in this study is estimated to be equal to the period of a linear 5 per cent damped SDOF system where the maximum spectral velocity occurs.

Several studies have shown that the shape of hysteretic models with no strength degradation has practically no effect on the maximum response on non-linear systems;^{15,21,23} therefore, this study was limited to SDOF systems having a bilinear hysteretic behaviour with a postelastic stiffness equal to 3 per cent of the elastic stiffness and with a damping ratio of 5 per cent. Response time histories were computed by numerical step-by-step integration of equation (1) using the linear acceleration method with a variable time step to minimize violations of the energy balance when changes in the stiffness of the system occur. During iteration the inelastic strength demand was accepted as correct if the computed ductility demand was within 1 per cent of the target ductility. Computed mean and standard deviation of inelastic strength demands can be found in Reference 24.

PROBABILITY DISTRIBUTION OF INELASTIC SPECTRAL ORDINATES

Consideration of the uncertainty of the response of structures subjected to earthquake ground motions through a probabilistic approach requires the knowledge of the probability distribution of response parameters. Several investigations have been devoted to develop approximate methods for determining this probability distribution. Shinozuka and Yang⁷ showed that for a narrow-band process, the distribution of ordinates of linear systems can be approximated by the Weibull distribution. Vanmarcke⁸ developed an approximate expression of the probability distribution in terms of the first three moments of the power

Table I. Selected ground motions recorded at rock sites

Station name	Local site condition	Earthquake date	Magn.	Epictr. dist. (km)	Comp.	PGA (g)
San Francisco Golden Gate Park	Siliceous sandstone	San Francisco 22 March 1957	5.3 (M _L)	11	N10E S80E	0.08 0.11
Parkfield Cholame Shandon No. 2	Rock	Parkfield 27 June 1966	5.6 (M _L)	7	N65E —	0.48 —
Castaic Old Ridge Road	Sandstone	San Fernando 9 February 1971	6.5 (M _L)	29	N21E N69W	0.32 0.27
Llolleo	Sandstone and volcanic rock	Central Chile 3 March 1985	7.8 (M _S)	45	N10E S80E	0.67 0.43
Valparaiso	Volcanic rock	Central Chile 3 March 1985	7.8 (M _S)	84	N70E S20E	0.18 0.16
La Union	Metavolcanic rock	Michoacan 19 Sept. 1985	8.1 (M _S)	84	N00E N90E	0.17 0.15
La Villita	Gabbro rock	Michoacan 19 Sept. 1985	8.1 (M _S)	44	N00E N90E	0.13 0.12
Zihuatanejo	Tunalite rock	Michoacan 19 Sept. 1985	8.1 (M _S)	135	N90W S00E	0.10 0.16
Natl. Geogr. Institute	Balsamo formation	San Salvador 10 October 1986	5.4 (M _S)	5.7	270 180	0.53 0.39
Inst. Urban Construction	Fluviate pumice rock	San Salvador 10 October 1986	5.4 (M _S)	5.3	90 180	0.38 0.67
Geotech. Invest. Center	Fluviate pumice rock	San Salvador 10 October 1986	5.4 (M _S)	4.3	180 90	0.42 0.68
Mt Wilson Caltech Seismic Station	Quartz diorite	Whittier-Narrows 1 October 1987	6.1 (M _L)	19	90 360	0.19 0.13
Corralitos Eureka Canyon Road	Landslide deposits	Loma Prieta 17 October 1989	7.1 (M _S)	7	90 360	0.47 0.62
Santa Cruz UCSC	Limestone	Loma Prieta 17 October 1989	7.1 (M _S)	16	90 360	0.41 0.43
San Francisco Cliff House	Franciscan sandstone	Loma Prieta 17 October 1989	7.1 (M _S)	99	90 0	0.11 0.07
San Francisco Pacific Heights	Franciscan sandstone	Loma Prieta 17 October 1989	7.1 (M _S)	97	360 270	0.05 0.06
San Francisco Presidio	Serpentine	Loma Prieta 17 October 1989	7.1 (M _S)	98	90 0	0.20 0.10
San Francisco Rincon Hill	Franciscan sandstone	Loma Prieta 17 October 1989	7.1 (M _S)	95	90 360	0.09 0.08
Yerba Buena Island	Franciscan sandstone	Loma Prieta 17 October 1989	7.1 (M _S)	95	90 360	0.06 0.03

Table II. Selected ground motions recorded at alluvium sites

Station name	Local site condition	Earthquake date	Magn.	Epictr. dist. (km)	Comp.	PGA (g)
El Centro Irrigation District	Alluvium	Imperial Valley 18 May 1940	6.3 (M _L)	8	S90W	0.21
					S00E	0.34
Taft Lincoln School Tunnel	Alluvium	Kern County 21 July 1952	7.7 (M _S)	56	N21E	0.15
					S69E	0.17
Figueroa 445 Figueroa St.	Alluvium	San Fernando 9 February 1971	6.5 (M _L)	41	N52E	0.15
					S38W	0.12
Hollywood Free field	Alluvium	San Fernando 9 February 1971	6.5 (M _L)	35	N90E	0.21
					S00W	0.17
Ave. Stars 1901 Ave. of the Stars	Silt and sand layers	San Fernando 9 February 1971	6.5 (M _L)	38	N46W	0.14
					S44W	0.15
Sendai city Kokutetsu Bldg.	Alluvium	Miyagi-Ken-Oki 12 June 1978	7.4 (M _S)	110	N90W	0.44
					N00E	0.24
Meloland Interstate S Overpass	Alluvium	Imperial Valley 15 October 1979	6.6 (M _L)	21	360	0.31
					270	0.30
Bonds corner Highways 98 & 115	Alluvium	Imperial Valley 15 October 1979	6.6 (M _L)	3	S40E	0.58
					S50W	0.77
James Road El Centro Array # 5	Alluvium	Imperial Valley 15 October 1979	6.6 (M _L)	22	S40E	0.52
					S50W	0.37
Imperial V. College El Centro Array # 7	Alluvium	Imperial Valley 15 October 1979	6.6 (M _L)	21	S40E	0.33
					S50W	0.45
El Almendral	Compacted fill	Central Chile 3 March 1985	7.8 (M _S)	84	N50E	0.29
					S40E	0.16
Viña del mar	Alluvial sand	Central Chile 3 March 1985	7.8 (M _S)	88	N70W	0.23
					S20W	0.36
Zacatula	Alluvium	Michoacán 19 September 1985	8.1 (M _S)	49	S00E	0.26
					N90W	0.18
Alhambra Fremont School	Alluvium	Whittier-Narrows 1 October 1987	6.1 (M _L)	7	270	0.40
					180	0.30
Altadena Eaton Canyon Park	Alluvium	Whittier-Narrows 1 October 1987	6.1 (M _L)	13	90	0.16
					360	0.31
Burbank Cal. Fed. Savings Bldg.	Alluvium	Whittier-Narrows 1 October 1987	6.1 (M _L)	26	130	0.22
					40	0.17
Downey County Maint. Bldg.	Deep alluvium	Whittier-Narrows 1 October 1987	6.1 (M _L)	17	270	0.16
					180	0.20
Inglewood Union Oil Yard	Terrace deposits	Whittier-Narrows 1 October 1987	6.1 (M _L)	25	90	0.23
					360	0.27
Los Angeles 116th St. School	Terrace deposits	Whittier-Narrows 1 October 1987	6.1 (M _L)	22	360	0.40
					270	0.29

Table II. (Contd.)

Station name	Local site condition	Earthquake date	Magn.	Epict. dist. (km)	Comp.	PGA (g)
Los Angeles Baldwin Hills	Alluvium over shale	Whittier-Narrows 1 October 1987	6.1 (M _L)	27	90 360	0.17 0.15
Los Angeles Hollywood Storage FF	Alluvium	Whittier-Narrows 1 October 1987	6.1 (M _L)	25	90 360	0.12 0.21
Los Angeles Obregon Park	Alluvium	Whittier-Narrows 1 October 1987	6.1 (M _L)	10	360 270	0.44 0.45
Long Beach Rancho Los Cerritos	Alluvium	Whittier-Narrows 1 October 1987	6.1 (M _L)	27	90 360	0.25 0.15
San Marino Southwestern Academy	Alluvium	Whittier-Narrows 1 October 1987	6.1 (M _L)	8	360 270	0.20 0.15
Tarzana Cedar Hill Nursery	Alluvium	Whittier-Narrows 1 October 1987	6.1 (M _L)	44	90 360	0.63 0.46
Whittier 7215 Bright Tower	Alluvium	Whittier-Narrows 1 October 1987	6.1 (M _L)	10	90 360	0.63 0.43
Alba 900 S. Fremont	Alluvium	Whittier-Narrows 1 October 1987	6.1 (M _L)	8	90 360	0.29 0.25
Capitola Fire Station	Alluvium	Loma Prieta 17 October 1987	7.1 (M _S)	9	90 360	0.39 0.46
Hollister South & Pine	Alluvium	Loma Prieta 17 October 1989	7.1 (M _S)	48	90 360	0.17 0.36
Oakland 2-Storey Office Bldg.	Alluvium	Loma Prieta 17 October 1989	7.1 (M _S)	92	290 200	0.24 0.19
Stanford Parking Garage	Alluvium	Loma Prieta 17 October 1989	7.1 (M _S)	51	360 90	0.26 0.22

Table III. Selected ground motions recorded at soft sites

Station name	Local site condition	Earthquake date	Magn.	Epictr. dist. (km)	Comp.	PGA (g)
Bucharest Building Research Inst.	Soft	Romania 4 March 1977	7.1 (M _S)	174	EW SN	0.17 0.20
SCT Sria. de Comunic. y Transport	Soft clay	Michoacán 19 September 1985	8.1 (M _S)	385	N90W S00E	0.17 0.10
Central de abastos Frigorifico	Soft clay	Michoacán 19 September 1985	8.1 (M _S)	389	99-53 77-52	0.10 0.08
Central de abastos Oficina	Soft clay	Michoacán 19 September 1985	8.1 (M _S)	389	76-56 67-95	0.08 0.07
Colonia Roma	Soft clay	Acapulco 25 April 1989	6.9 (M _S)	320	N90W S00E	0.06 0.05
Emeryville Free Field South	Bay mud	Loma Prieta 17 October 1989	7.1 (M _S)	97	350 260	0.21 0.26
Emeryville Free Field North	Bay mud	Loma Prieta 17 October 1989	7.1 (M _S)	97	350 260	0.20 0.22
Oakland Outer Harbor Wharf	Bay mud	Loma Prieta 17 October 1989	7.1 (M _S)	95	305 125	0.27 0.29
Treasure island Naval Base	Fill	Loma Prieta 17 October 1989	7.1 (M _S)	98	90 360	0.16 0.10
San Francisco International Airport	Bay mud	Loma Prieta 17 October 1989	7.1 (M _S)	79	90 360	0.33 0.23
San Francisco 18-Storey Commercial Bldg.	Fill over bay mud	Loma Prieta 17 October 1989	7.1 (M _S)	95	980 350	0.13 0.16
Foster City Redwood Shores	Bay mud	Loma Prieta 17 October 1989	7.1 (M _S)	63	90 0	0.28 0.26

spectral density functions assuming the earthquake ground motion to be a stationary Gaussian zero process. Based on the results presented by Davenport,⁶ Der Kiureghian⁹ developed semi-empirical expressions for the reduced rate of crossings and for peak factors that are consistent with the probability distribution proposed by Vanmarcke. Yang and Liu¹¹ showed that if the number of extreme values is large and if they are statistically independent, the probability distribution approaches asymptotically Gumbel's type III extreme-value probability distribution (the Weibull distribution). Furthermore, they showed that if the input excitation is assumed stationary, the probability distribution reduces to Rayleigh's distribution.

Before studying the probability distribution of inelastic structural ordinates, for each ground motion inelastic strength demands were normalized by the maximum base shear produced in a rigid system. This normalization procedure is equivalent to normalizing the ground motions to a peak ground acceleration equal to 1 *g*. In the long-period range this normalization will typically result in an increase in dispersion with increasing period of vibration.²² However, inelastic strength demands in this period range are generally much smaller than those in the short- and medium-period ranges. As illustrated in Figure 1, the resulting normalized inelastic strength demand, η , is a random variable whose probability distribution is unknown. This normalized inelastic strength demand is given by

$$\eta = \frac{R_y}{m \max |\ddot{x}_g|} = \frac{C_y g}{\max |\ddot{x}_g|} \quad (4)$$

where *g* is the acceleration due to gravity and C_y is the seismic coefficient defined as the ratio of the lateral strength of the system to its weight.

In this study attempts were made to fit the probability distribution computed from the statistical data to the following five theoretical probability density functions (PDF):

Normal:

$$f(\eta) = [2\pi\sigma^2]^{-1/2} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\eta - \phi}{\sigma}\right)^2\right] \quad (5)$$

Lognormal:

$$f(\eta) = [2\pi\sigma^2\eta^2]^{-1/2} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln \eta - \phi}{\sigma}\right)^2\right] \quad (6)$$

Gumbel type I:

$$f(\eta) = \frac{1}{\sigma} \exp\left\{-\frac{1}{\sigma}(\eta - \phi) - \exp\left[-\frac{1}{\sigma}(\eta - \phi)\right]\right\} \quad (7)$$

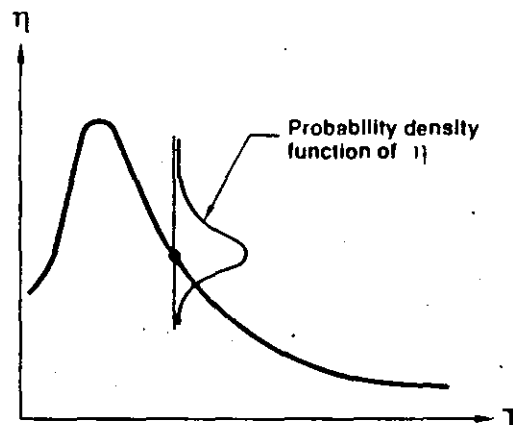


Figure 1. Normalized inelastic strength demand spectrum showing the uncertainty in the prediction of inelastic strength demands in future earthquakes

Weibull:

$$f(\eta) = \alpha\beta\eta^{\alpha-1} \exp(-\beta\eta^\alpha) \tag{8}$$

Gamma:

$$f(\eta) = \frac{\beta^\delta}{\Gamma(\delta)} \eta^{\delta-1} \exp(-\beta\eta) \tag{9}$$

where α , β , δ , ϕ and σ are probability distribution parameters and $\Gamma(\cdot)$ is the gamma function, which is defined as:

$$\Gamma(y) = \int_0^\infty z^{y-1} \exp(-z) dz \tag{10}$$

Two methods are available to determine whether the assumption of the data being distributed according to a certain theoretical PDF is reasonable: (mainly) goodness-of-fit (GOF) plots of probability paper and analytic distributional tests. In the first method the sorted data is plotted against the quantiles corresponding to different probability distributions. In the second method an analytic parameter is computed, which provides a basis to accept or reject the hypothesis of a certain theoretical probability distribution according to a certain level of probability of a type 1 error. For cases where there exists no closed-form analytical expression for the cumulative distribution function (i.e. normal, log-normal and gamma distributions) the quantiles were computed by numerical integration of the PDF together with a *regula falsi* root-finding method. For each probability distribution and each soil group 300 GOF plots were computed (corresponding to each level of inelastic deformation and each period or each T/T_g ratio).

Examples of GOF plots corresponding to a particular period and a particular level of inelastic deformation for ground motions recorded on alluvium are shown in Figure 2. For all three site conditions, scatter of the data was observed to increase with increasing periods (with increasing T/T_g ratios in the case of soft soils).

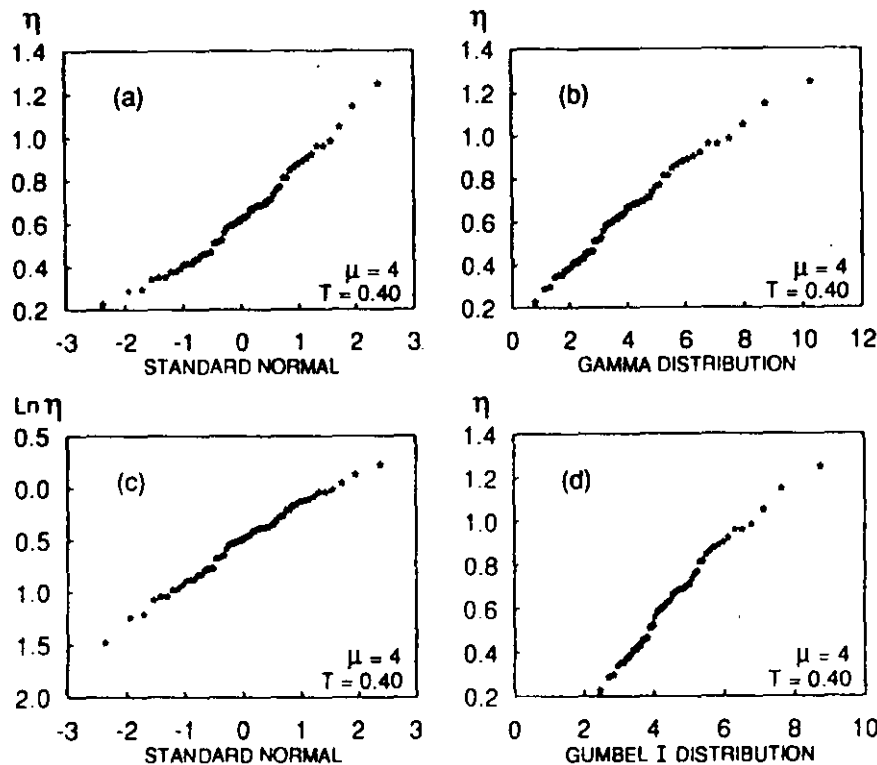


Figure 2. Goodness-of-fit plots for systems with $T = 0.4$ and $\mu = 4$ when subjected to ground motions recorded on alluvium using the following probability distributions: (a) normal; (b) gamma; (c) log-normal; (d) Gumbel type I

In addition to the GOF plots, the analytical test method was used to test each probability distribution. The W test was used for all probability distributions except for the gamma distribution, in which a chi-square test was employed. For description of these tests the reader is referred to Reference 25.

If the choice of a certain model is found to be reasonable, the parameters of the distribution can be computed to obtain estimates of the cumulative probability distribution function (CDF) that best fits the data. Examples of computed CDFs are shown in Figure 3. These CDFs correspond to systems with a period of 0.3 s undergoing a displacement ductility ratio of four when subjected to ground motions recorded on alluvium sites. In this case it can be seen that the normal and Rayleigh (a special case of the Weibull distribution with $\alpha = 2$) give the poorest fit of the data.

For all levels of inelastic deformation, the fit of the computed CDF to that of the data was better in the low period range than in the high period range. In general, the best fit to the data was provided by the gamma distribution, followed by the Gumbel type I distribution and the Weibull distribution. One disadvantage of using the Weibull distribution is that the estimation of the parameters α and β requires the solution of two non-linear equations when using the maximum-likelihood technique. For the normal, lognormal and Gumbel distributions, a better fit was obtained by using linear regression analyses on the GOF plot-data than when using the matching moment technique. In the case of the gamma distribution the latter technique yielded an adequate fit.

PROBABILISTIC NON-LINEAR SPECTRUM

If the probability distribution of inelastic strength demands is known, the computation of a probabilistic non-linear spectrum is reduced to finding (for each period T_k) the normalized strength (that needs to be supplied to the structure) required to avoid with a predetermined probability of non-exceedance of a ductility demand larger than the target ductility demand, μ_j .

If the displacement ductility demand is considered as a random variable, then for a system with a given normalized strength, η_i , the probability of having a ductility demand less than or equal to a certain predetermined ductility μ_j is given by,

$$F_i(\mu_j) = P(\mu \leq \mu_j) = \int_0^{\mu_j} f_i(\mu) d\mu \quad (11)$$

where $f_i(\mu)$ and $F_i(\mu)$, respectively, are the PDF and CDF of μ corresponding to a certain strength capability, η_i . Since the strengths required to limit the ductility demand to different target ductilities have been computed, for design purposes equation (11) can be rewritten as

$$F_j(\eta_i) = P(\eta \leq \eta_i) = \int_0^{\eta_i} f_j(\eta) d\eta \quad (12)$$

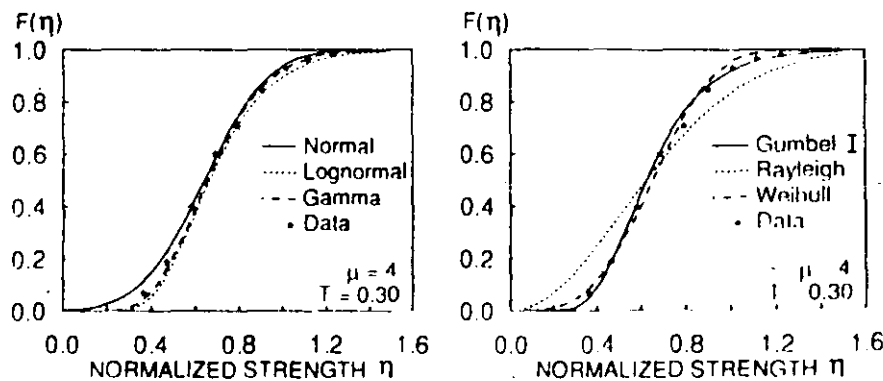


Figure 3. Cumulative distribution functions for systems with $T = 0.3$ and $\mu = 4$ when subjected to ground motions recorded on alluvium

where $f_j(\eta)$ and $F_j(\eta)$, respectively, are the PDF and CDF of η associated with a target ductility μ_j . The corresponding probability of exceedance of the target ductility μ_j is given by

$$P(\mu > \mu_j) = P(\eta > \eta_i) = 1 - F_j(\eta_i) \quad (13)$$

Thus, as illustrated in Figure 4, for a given target probability of non-exceedance, the normalized inelastic strength demand that needs to be supplied to the structure, η_i (in order to avoid ductility demands larger than μ_j) can be computed from the CDF of η .

As mentioned in the previous section, $f_i(\mu)$, $F_i(\mu)$, $f_j(\eta)$ and $F_j(\eta)$ are not known. In their study Murakami and Penzien¹⁶ assumed $F_i(\mu)$ to be a Gumbel type I extreme-value probability distribution, while Conte *et al.*¹⁷ assumed $F_i(\mu)$ to be a log-normal probability distribution. In this study, the PNRs were computed by using the CDF $F_j(\eta)$ calculated from the response of 300 systems subjected to 124 recorded ground motions. The advantage of this approach over the one used in the aforementioned studies is that the resulting empirical PNRs are based on no assumption regarding the probability distribution of inelastic spectral ordinates.

For each soil condition, each period of vibration (each T/T_r for soft soils) and target ductilities ranging from 1 to 6, normalized inelastic strength demands were computed for six probabilities of non-exceedance, namely, $F(\eta_i) = 50, 60, 70, 80, 90$ and 95 per cent, which correspond to probabilities of exceedance of the target ductility of 50, 40, 30, 20, 10 and 5 per cent respectively. The resulting 5400 inelastic strength demands, classified according to soil conditions, probability of non-exceedance and level of inelastic deformation are shown in Figures 5-7.

As shown in these figures, for all levels of probability, the lateral strength capacity required to control inelastic deformations is significantly affected by the period of vibration of the system and the target ductility ratio. For ductility ratios smaller than three and for systems subjected to rock and alluvium ground motions, strength demands typically increase with increasing period up to a period which lies between 0.2 and 0.4 s. Beyond this period, strength demands decrease with increasing period of vibration. Regardless of the soil condition, for displacement ductility ratio greater than four, lateral strength demands decrease with increasing periods.

A comparison of strength demands for systems of different soil conditions is shown in Figure 8. The figure corresponds to lateral strengths required to avoid ductility ratios larger than 2 with a 20 per cent probability of exceedance and to lateral strengths required to avoid ductility ratios larger than three with a 10 per cent probability of exceedance. A predominant period of 1.5 s is assumed for the soft soil site. In both cases, for periods of vibration greater than 0.6 s, required lateral strengths are significantly larger for systems subjected to ground motions recorded on soft soil sites than for systems subjected to ground motions recorded on either rock or alluvium sites. For certain periods, the computed required strength for structures on soft soil is more than twice that required for structures on rock or alluvium sites.

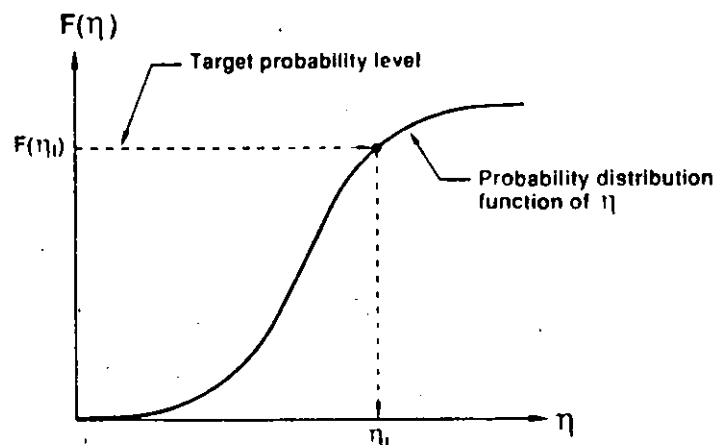


Figure 4. Computation of probabilistic strength demand spectral ordinates using cumulative distribution functions

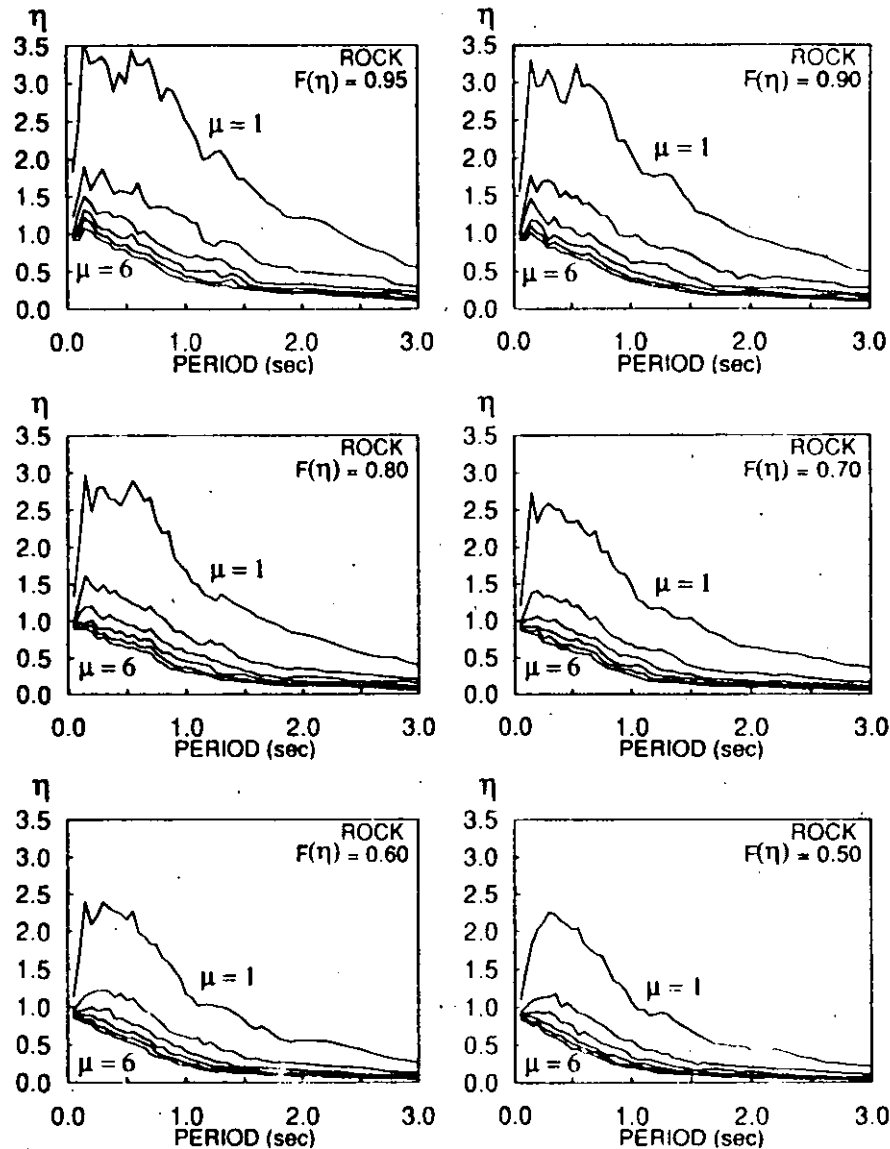


Figure 5. Probabilistic non-linear spectra of normalized strength demands for rock sites ($\mu = 1, 2, 3, 4, 5, 6$)

A comparison of lateral strength demands required to avoid a given maximum tolerable ductility ratio for three different probabilities of occurrence is shown in Figure 9. Strength demands shown in this figure were calculated for systems undergoing ductility demands of two and six when subjected to ground motions recorded on alluvium sites. As shown in this figure, consideration of a smaller probability of exceedance of the target ductility ratio (i.e. a larger value of $F(\eta)$) produces an approximately period-independent difference in strength demand. In general, this difference in lateral strength decreases with increasing ductility ratio. The corresponding increase in lateral strength (additional strength relative to the median), however, increases with increasing period.

Probabilistic non-linear response spectra computed in this investigation provide a more rational estimation of design forces than the one offered by deterministic response spectra, since they allow the designer to estimate the required lateral strength capacity corresponding to target probabilities of non exceedance, which may be different for different levels of inelastic deformations or for different levels of maximum acceleration. An illustrative example on the use of the PNRS is presented in the Appendix.

Inelastic strength demands shown in Figures 5-7 are based on response of SDOF systems undergoing various levels of maximum inelastic deformation when subjected to a relatively large number of recorded earthquake ground motions. The extrapolation of these results to MDOF structures requires the knowledge of the relationship between local (storey) ductility demands and the global (structure) ductility demand. This

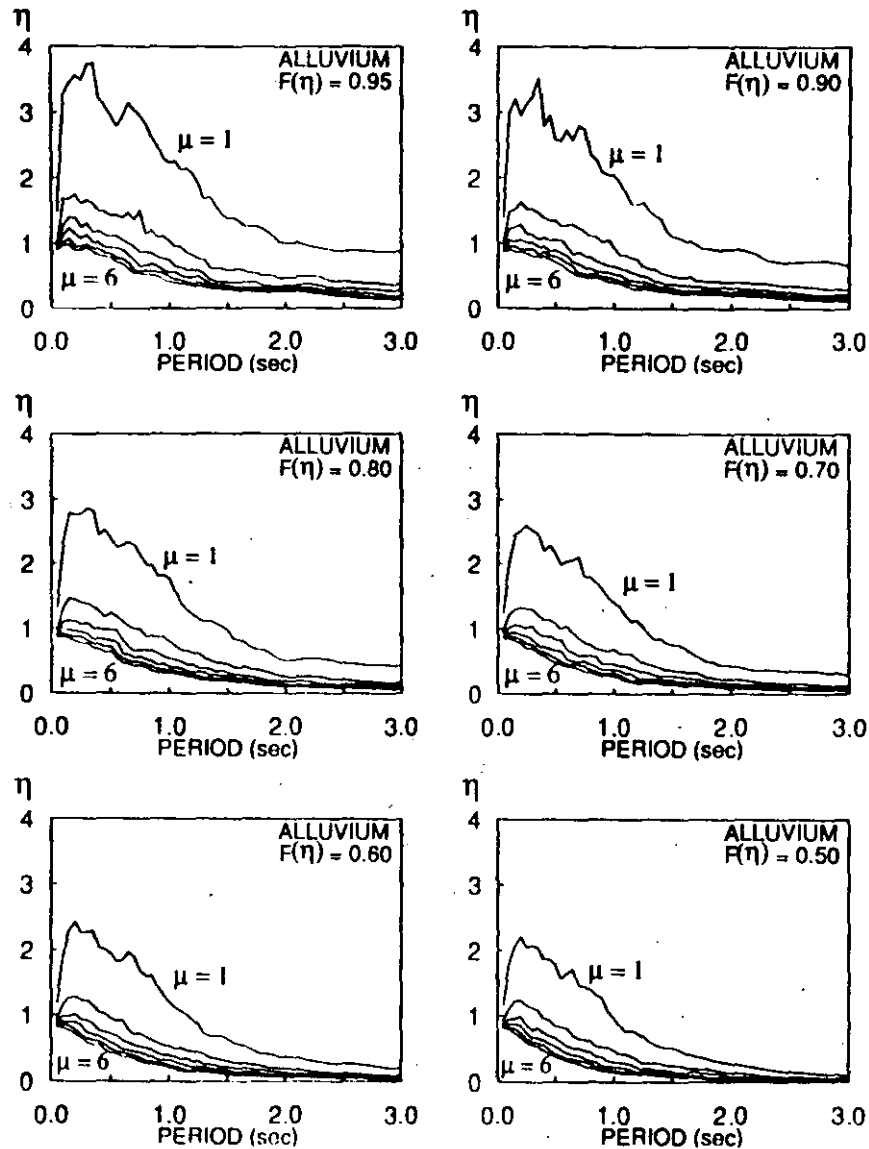


Figure 6. Probabilistic non-linear spectra of normalized strength demands for alluvium sites ($\mu = 1, 2, 3, 4, 5, 6$)

relationship, which varies with the level of imposed lateral deformation, is a function of both, the distribution of inelastic deformations within the structure and the ground motion. For many types of structures, an approximation of this relationship can be obtained through non-linear static analyses.²²⁻²⁶ Another approximate procedure to extend the results of SDOF systems to the design of MDOF structures has recently been proposed by Nassar and Krawinkler.²³

SUMMARY AND CONCLUSIONS

Uncertainties in the response of non-linear systems when subjected to earthquake ground motions were studied by computing the lateral strength capacity of SDOF systems required to control inelastic deformations below predetermined displacement ductility ratios. A total of 37 200 inelastic strength demands were computed corresponding to six levels of inelastic deformation and 50 periods (or T/T_g ratios) when subjected to 124 ground motions.

Attempts were made to fit the probability distribution of normalized inelastic strength demands computed from the statistical data to five theoretical probability distributions. For all levels of inelastic deformation,

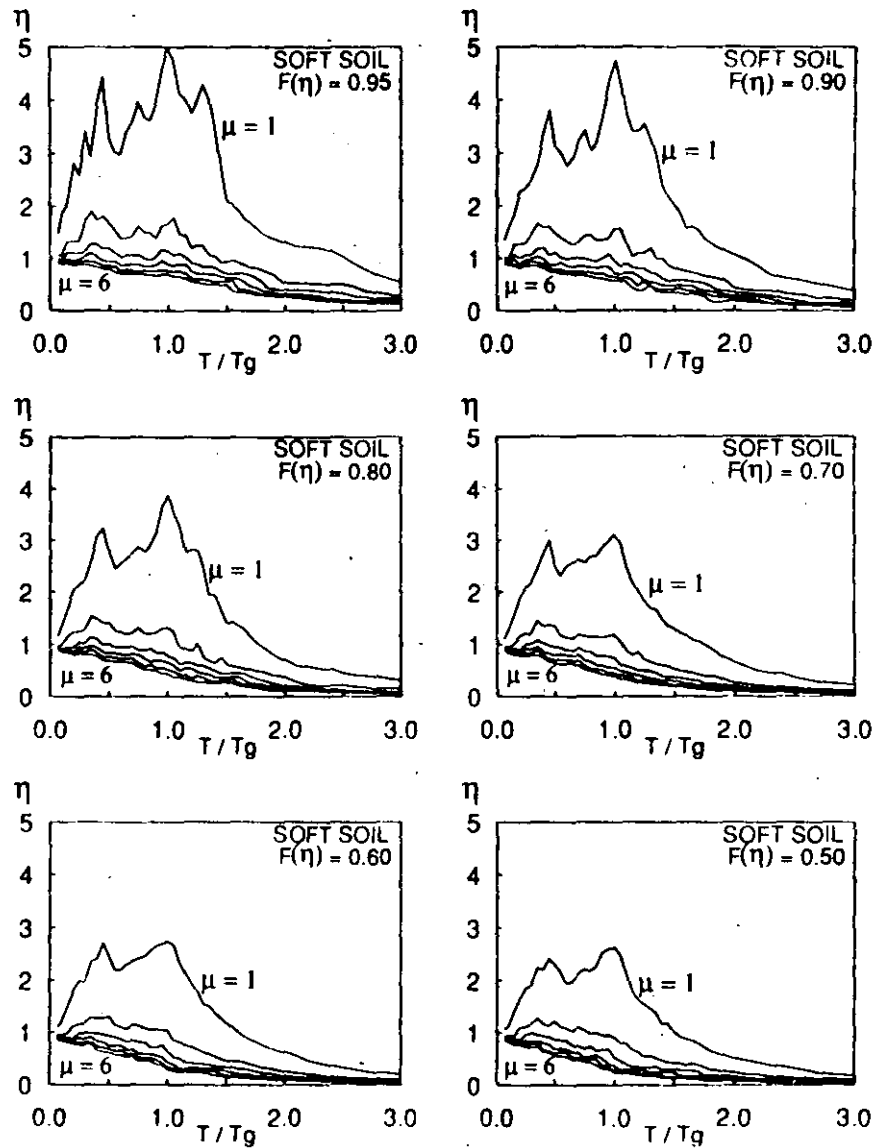


Figure 7. Probabilistic non-linear spectra of normalized strength demands for soft soil sites ($\mu = 1, 2, 3, 4, 5, 6$)

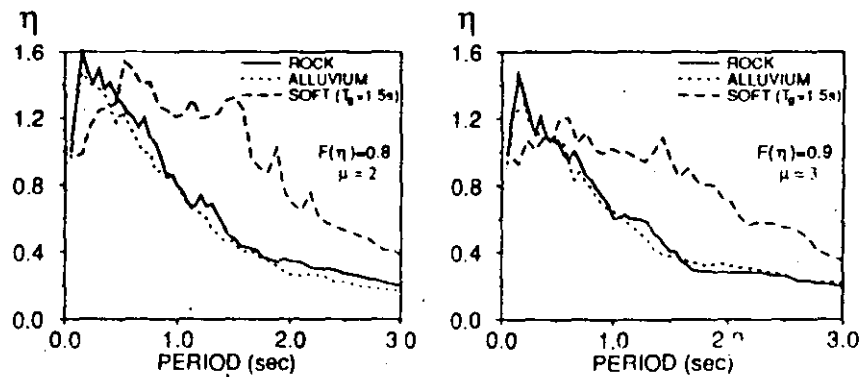


Figure 8. Effect of soil conditions on the lateral strength capacity required to control the maximum inelastic deformation

the fit of the cumulative distribution function was better in the low period range than in the high period range. In general, the best fit was provided by the gamma distribution followed by the Gumbel type I and Weibull distributions.

Using empirical cumulative distribution functions site-dependent probabilistic non-linear spectra were computed for six probabilities of exceedance of different levels of inelastic deformation. The lateral strength

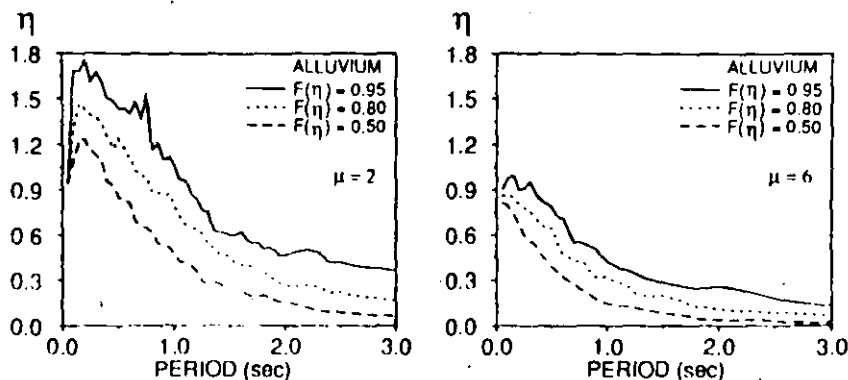


Figure 9. Effect of the probability of exceedance on the lateral strength capacity required to control the maximum inelastic deformation

required to control ductility demands is significantly affected by: (1) the maximum tolerable ductility demand, (2) probability of exceedance of the tolerable demand, (3) local site conditions and (4) the period of vibration of the system. In the case of soft soils, the required lateral strengths are also strongly dependent on the predominant period of the ground motion.

In contrast to the deterministic spectra, the spectra presented herein allow the estimation of the lateral strength that needs to be supplied to the structure which is associated with different probabilities of exceedance of predetermined levels of inelastic deformations. Thus, these PNRS explicitly account for the uncertainty in the response of non-linear systems when subjected to earthquake ground motions. Furthermore, they provide a clear insight into the variability aspects of the response of non-linear systems due to the inherent uncertainties in the intensity and characteristics of the earthquake excitation.

ACKNOWLEDGEMENTS

Part of the work presented in this paper was conducted while the author was a graduate student at the University of California at Berkeley working under the supervision of Vitelmo V. Bertero, whose guidance is greatly appreciated. The writer also would like to acknowledge J. P. Conte for his useful comments on this paper.

APPENDIX

This example illustrates the estimation of the inelastic strength demand of a SDOF system to an earthquake ground motion with a specified maximum ground acceleration.

It is assumed that the structure has a period of vibration of 0.8 s, 5 per cent damping and is located on alluvium. The site is likely to experience a maximum ground acceleration of 0.10 g during minor earthquakes and a maximum ground acceleration of 0.6 g during severe earthquakes. It is required to:

- Estimate the lateral strength required to maintain the system elastic (i.e. $\mu = 1$) during minor earthquakes with a confidence level (probability of non-exceedance) of 90 per cent.
- Estimate the lateral strength capacity associated with a 20 per cent probability of exceedance of a displacement ductility demand of three during severe earthquakes.

For alluvium sites the normalized inelastic strength demands can be obtained from Figure 6. To estimate the strength required in (a) the spectra corresponding to $F(\eta) = 0.9$ is used together with a $\mu = 1$ and a period of 0.8 s, to find a normalized strength demand $\eta = 2.35$. The corresponding lateral strength is obtained from equation (4)

$$R_y = m\eta \max |\ddot{x}_g| = m2.35(0.10g) = m0.24g$$

where m is the mass of the system.

To estimate the strength required in (b) the spectra corresponding to $F(\eta) = 0.8$ (probability of exceedance of 20 per cent) is used together with $\mu = 3$ and a period of 0.8 s. From Figure 6 we get $\eta = 0.68$. The corresponding lateral strength is given by

$$R_y = m\eta \max |\ddot{x}_g| = m \cdot 0.68(0.60g) = m \cdot 0.41g$$

Thus, the strength required in (b) controls the design of the structure.

REFERENCES

1. M. A. Austin, K. S. Pister and S. A. Mahin, 'Probabilistic design of earthquake-resistant structures', *J. struct. eng. ASCE* **113**, 1642-1659 (1987).
2. H. Hwang, B. Ellingwood, M. Shinozuka and M. Reich, 'Probability-based design criteria for nuclear plant structures', *J. struct. eng. ASCE* **113**, 925-942 (1987).
3. J. M. O'Connor and B. Ellingwood, 'Reliability of nonlinear structures with seismic loading', *J. struct. eng. ASCE* **113**, 1011-1028 (1987).
4. *Earthquake Resistant Regulations—A World List*, Int'l. Assoc. of Earthquake Eng., Tsukuba, Japan, 1992.
5. D. E. Cartwright and M. S. Longuet-Higgins, 'The statistical distribution of maxima of a random function', *Proc. roy. soc. Lond.* **327**, 212-232 (1956).
6. A. G. Davenport, 'Note on the distribution of the largest value of a random function with application to gust loading', *Proc. inst. civil eng.* **28**, 187-196 (1964).
7. M. Shinozuka and J-N. Yang, 'Peak structural response to nonstationary random excitations', *J. sound vib.* **16**, 505-517 (1973).
8. E. H. Vanmarcke, 'On the distribution of the first-passage time for normal stationary random processes', *J. appl. mech. A.* **215**-220 (1975).
9. A. Der Kiureghian, 'Structural response to stationary excitation', *J. eng. mech. div. ASCE* **106**, 1195-1213 (1980).
10. A. Amini and M. D. Trifunac, 'Distribution of peaks in linear earthquake response', *J. eng. mech. div. ASCE* **107**, 207-226 (1981).
11. J-N. Yang and S. C. Liu, 'Distribution of maximum statistical response of structures subjected to earthquake ground motions', *J. eng. mech. ASCE* **107**, 1089-1102 (1981).
12. A. S. Kiremidjian and H. C. Shah, 'Probabilistic site-dependent response spectra', *J. struct. div. ASCE* **106**, 69-86 (1980).
13. M. D. Trifunac, 'Seismic microzonation mapping via uniform risk spectra', *Proc. 9th world conf. earthquake eng.*, Tsukuba, Japan, vol. VII, 1988, 75-80.
14. M-H. Peng, F.E. Elghadamsi and B. Mohraz, 'A simplified procedure for constructing probabilistic response spectra', *Earthquake spectra* **5**, 393-407 (1989).
15. R. Riddell and N. M. Newmark, 'Statistical analysis of the response of nonlinear systems subjected to earthquakes', *Structural Research Series No. 468*, Dept. of Civil Eng., University of Illinois, Urbana, 1979.
16. M. Murakami and J. Penzien, 'Nonlinear response spectra for probabilistic seismic design and damage assessment of reinforced concrete structures', *Report No. UCB/FERC-75/38*, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, 1975.
17. J. P. Conte, K. S. Pister and S. A. Mahin, 'Influence of the earthquake ground motion process and structural properties on response characteristics of simple structures', *Report No. UCB/FERC-90/09*, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, 1990.
18. H. B. Seed, C. Ugas and J. Lysmer, 'Site-dependent spectra for earthquake-resistant design', *Report No. UCB/FERC-74-12*, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, 1974.
19. B. Mohraz, 'A study of earthquake response spectra for different soil conditions', *Civil and Mechanical Eng. Dept.*, Southern Methodist University, Dallas, 1975.
20. V. V. Bertero, J. C. Anderson, H. Krawinkler and E. Miranda, 'Design guidelines for ductility and drift limits', *Report No. FERC/UCB-91/15*, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, 1991.
21. S. A. Mahin and V. V. Bertero, 'An evaluation of inelastic seismic design spectra', *J. struct. div. ASCE* **107**, 1111-1127 (1981).
22. E. Miranda, 'Seismic evaluation and upgrading of existing buildings', *Ph.D. Thesis*, University of California at Berkeley, Berkeley, 1991.
23. A. A. Nassar and H. Krawinkler, 'Seismic demands for SDOF and MDOF systems', *Report No. 95*, John A. Blume Earthquake Engineering Center, Stanford University, Stanford, 1991.
24. E. Miranda, 'Evaluation of site-dependent inelastic seismic design spectra', *J. struct. div. ASCE* **119**, 1319-1338 (1993).
25. S. S. Shapiro, 'Selection, fitting and testing statistical models', in *Handbook of Statistical Methods for Scientists and Engineers*, Ed. H. M. Wadsworth, McGraw-Hill, New York, 1990.
26. J. D. Osteraas and H. Krawinkler, 'Strength and ductility considerations in seismic design', *Report No. 90*, The John A. Blume Earthquake Engineering Center, Stanford University, Stanford, CA 1990.



**FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA**

XX CURSO INTERNACIONAL DE INGENIERIA SISMICA

MODULO III: DISEÑO SISMICO DE EDIFICIOS

REQUISITOS DE DUCTABILIDAD PARA ESTRUCTURAS DE CONCRETO

DISEÑO SISMICO DE ESTRUCTURAS DE CONCRETO

DR. ROBERTO MELI PIRALLA

CURSO INTERNACIONAL DE INGENIERIA SISMICA

MODULO: **DISEÑO SISMICO DE EDIFICIOS**

TEMA: ESTRUCTURAS DE CONCRETO REFORZADO

PROFESOR: ROBERTO MELI

CONTENIDO

-GUIA DE ESTUDIO

-REQUISITOS DE DUCTILIDAD

-MODIFICACIONES A LA PRACTICA DE DISEÑO Y CONSTRUCCION.

GUIA DE ESTUDIO

1. DESEMPEÑO EN SISMOS RECIENTES
2. COMPORTAMIENTO DEL CONCRETO ANTE CARGAS ALTERNADAS
3. COMPORTAMIENTO DE ESTRUCTURAS HIPERESTÁTICAS
4. CRITERIOS DE DISEÑO SÍSMICO
5. SISTEMAS ESTRUCTURALES
6. MARCOS DÚCTILES
7. LOSAS PLANAS
8. MUROS DE CONCRETO
9. REFERENCIAS.

GUIA DE ESTUDIO

1. DESEMPEÑO EN SISMOS RECIENTES

EL NÚMERO DE CONSTRUCCIONES DAÑADAS HA SIDO ELEVADO. PRINCIPALMENTE DEFECTOS DE ESTRUCTURACIÓN, FALTA DE DUCTILIDAD.

EL SISMO DE 85 EN MÉXICO PUSO EN EVIDENCIA TODA LA GAMA DE PROBLEMAS.

EVIDENCIA DE BUEN COMPORTAMIENTO CUANDO SE HAN SEGUIDO LAS PRÁCTICAS ADECUADAS.

LAS MODIFICACIONES AL REGLAMENTO Y NORMAS TÉCNICAS HAN SIDO MUY FUERTES. LAS ESTRUCTURAS HAN CAMBIADO RADICALMENTE DESPUÉS DE 85.

2. COMPORTAMIENTO DEL CONCRETO ANTE CARGAS ALTERNADAS

PARA ESTRUCTURAS QUE DEBEN RESISTIR EFECTOS SÍSMICOS SE REQUIERE UN COMPORTAMIENTO DÚCTIL ANTE CARGAS LATERALES Y UN COMPORTAMIENTO ESTABLE ANTE REPETICIONES DE CARGA ALTERNADAS. LOS CICLOS DE HISTERESIS DEBEN CONTENER UN ÁREA GRANDE PARA QUE LA ESTRUCTURA PUEDA DISIPAR ENERGÍA MEDIANTE AMORTIGUAMIENTO INELÁSTICO.

EL CONCRETO SIMPLE ES UN MATERIAL FRÁGIL, TANTO EN TENSIÓN COMO EN COMPRESIÓN.

VARIABLES QUE INFLUYEN EN LA CURVA ESFUERZO-DEFORMACIÓN: VELOCIDAD DE CARGA, f'_c ,

ESTADO BIAXIAL Y TRIAXIAL DE ESFUERZOS Y EL EFECTO DEL COMPORTAMIENTO.

EL CONFINAMIENTO CON ZUNCHO O CON UNA COMBINACIÓN DE ESTRIBOS Y BARRAS LONGITUDINALES ES EL ÚNICO MEDIO DE LOGRAR UN COMPORTAMIENTO DÚCTIL.

EL COMPORTAMIENTO DESEABLE SE PUEDE LOGRAR SÓLO CUANDO EL MODO DE FALLA QUE DOMINA ES EL DE FLEXIÓN O FLEJO COMPRESIÓN CON CARGA AXIAL MUY BAJA.

LA SECCIÓN DEBE SER AMPLIAMENTE SUBREFORZADA, DOBLEMENTE ARMADA.

SE REQUIERE CONFINAMIENTO EN LAS ARTICULACIONES PLÁSTICAS Y ESPECIALMENTE EVITAR EL PANDEO DEL REFUERZO EN COMPRESIÓN.

LAS FALLAS POR FLEXOCOMPRESIÓN, CORTANTE, TORSIÓN, ADHERENCIA NO GARANTIZAN COMPORTAMIENTO DÚCTIL.

3. COMPORTAMIENTO DE ESTRUCTURAS HIPERESTÁTICAS

LOS CRITERIOS DE DISEÑO SÍSMICO ACTUALES SE BASAN EN LA CONSIDERACIÓN DE QUE SÓLO PARTE DE LA ENERGÍA DEL SISMO SE DISIPA POR TRABAJO DE LA ESTRUCTURA EN SU INTERVALO DE COMPORTAMIENTO LINEAL.

PARA SISMO EXCEPCIONALES SE TENDRÁN DEFORMACIONES INELÁSTICAS Y HAY QUE DAR A LA ESTRUCTURA CAPACIDAD PARA ENTRAR EN ESA ETAPA SIN DAÑO GRAVE O COLAPSO.

EL CONCRETO TIENE COMPORTAMIENTO NO LINEAL DESDE NIVELES DE CARGA MODERADOS: AGRIETAMIENTO POR FLEXIÓN.

EL COMPORTAMIENTO NETAMENTE NO LINEAL SE TIENE CON LA FLUENCIA DE SECCIONES POR MOMENTO FLEXIONANTE.

EL COMPORTAMIENTO NO LINEAL IMPLICA REDISTRIBUCIÓN DE MOMENTOS. LAS SECCIONES QUE SE AGRIETAN O FLUYEN PIERDEN RIGIDEZ O SE ARTICULAN Y AUMENTAN LOS MOMENTOS EN LAS ZONAS QUE PERMANECEN MÁS RÍGIDAS.

LA VIGA CONTINUA REPRESENTA UN EJEMPLO SIMPLE DEL FENÓMENO DE REDISTRIBUCIÓN.

EN CADA SECCIÓN EL MOMENTO ACTUANTE ESTÁ LIMITADO POR EL MOMENTO RESISTENTE (POSITIVO Y NEGATIVO) QUE DISPONE LA SECCIÓN DE ACUERDO CON EL REFUERZO PROPORCIONADO.

LOS MOMENTOS SE REDISTRIBUYEN DE ACUERDO A LA RESISTENCIA DISPONIBLE HASTA QUE SE FORME UN MECANISMO DE FALLA.

EL MECANISMO DE FALLA QUE SE PRESENTARÁ PUEDE SER SELECCIONADO EN LA ETAPA DE DISEÑO AL DEFINIR LOS MOMENTOS RESISTENTES DE LAS DISTINTAS SECCIONES.

ES ACEPTABLE DIMENSIONAR LAS SECCIONES A PARTIR DE LOS DIAGRAMAS DE ELEMENTOS MECÁNICOS QUE SE OBTIENE DEL ANÁLISIS ELÁSTICOS LINEALES. IDEALMENTE EN ESA CONDICIÓN SE ALCANZA SIMULTÁNEAMENTE LA CAPACIDAD DE TODAS LAS SECCIONES. TAMBIÉN ES FACTIBLE DIMENSIONAR PARA ELEMENTOS MECÁNICOS DIFERENTES DE LAS ELÁSTICAS Y QUE CUMPLAN CON EL EQUILIBRIO.

LOS CRITERIOS DE DISEÑO DE LAS NORMAS ACTUALES EXIGEN DISEÑAR DE MANERA QUE SE PRESENTEN MECANISMOS DE FALLA DÚCTILES Y TOMAR FACTORES DE SEGURIDAD ADICIONALES PARA MODOS DE FALLA FRÁGILES O QUE CORRESPONDAN A UN COMPORTAMIENTO CON DETERIORO.

4. CRITERIOS DE DISEÑO SÍSMICO

ESTO SE BUSCA MEDIANTE EL MANEJO DE FACTORES DE RESISTENCIA DIFERENTES O MEDIANTE LA REVISIÓN DE CONDICIONES DE EQUILIBRIO LOCAL (DE NUDO, DE ENTREPISO, DE VIGA O DE COLUMNA), VER EJEMPLOS.

POR ESTAS CONDICIONES EL DIMENSIONAMIENTO SE ALEJA MUCHO DE LOS RESULTADOS DEL ANÁLISIS ELÁSTICO.

LOS CÓDIGOS PERMITEN REDUCCIONES A LOS COEFICIENTES SÍSMICOS DEPENDIENDO DE QUÉ TAN SEVEROS SON LOS REQUISITOS QUE SE OBSERVAN PARA GARANTIZAR UN COMPORTAMIENTO DÚCTIL.

LOS CÓDIGOS ESTABLECEN REQUISITOS DE RIGIDEZ Y DE RESISTENCIA. LOS PRIMEROS (DESPLAZAMIENTOS ADMISIBLES) DEFINEN ESENCIALMENTE LAS DIMENSIONES DE LOS ELEMENTOS ESTRUCTURALES, LOS SEGUNDOS EL REFUERZO. LA DISTRIBUCIÓN DEL REFUERZO LONGITUDINAL Y TRANSVERSAL OBEDECE LA BÚSQUEDA DE LOS MECANISMOS DE FALLA DÚCTILES.

LAS REDUCCIONES POR DUCTILIDAD DE LOS COEFICIENTES SÍSMICOS DEBEN LIMITARSE PARA EVITAR DAÑOS FRECUENTES Y REPARACIONES COSTOSAS.

5. SISTEMAS ESTRUCTURALES

LA ELECCIÓN DEL SISTEMA ESTRUCTURAL APROPIADO ES EL PASO BÁSICO DEL DISEÑO.

ADEMÁS DEBE EVITAR COMPORTAMIENTOS INDESEABLES POR CONCENTRACIÓN DE FUERZAS, AMPLIFICACIONES, VIBRACIONES TORSIONALES, ETC. POR ELLO DEBE BUSCARSE UN SISTEMA REGULAR Y SIMÉTRICO.

TAMBIÉN SE DEBEN EVITAR CONCENTRACIONES DE FUERZAS EN LA CIMENTACIÓN.

EL MARCO "RÍGIDO" ES UN SISTEMA RELATIVAMENTE FLEXIBLE CON EL QUE RESULTA DIFÍCIL LIMITAR LOS DESPLAZAMIENTOS LATERALES A LOS VALORES ADMISIBLES EN EDIFICIOS DE CIERTA ALTURA.

CONVIENE RECURRIR A RIGIDIZACIÓN DE LOS MARCOS CON MUROS DE CONCRETO DE OTROS ELEMENTOS.

6. MARCOS DÚCTILES

LA ESTRUCTURACIÓN A BASE DE MARCOS PERMITE ALCANZAR GRANDES DUCTILIDADES. PARA ELLO DEBEN OBEDECERSE REQUISITOS ESCRITOS DE DISEÑO Y DETALLADO DE LAS VIGAS, COLUMNAS Y CONEXIONES VIGA-COLUMNA.

LOS REQUISITOS DEL RFD87 Y DEL ACI SON SIMILARES A ESTE RESPECTO. SUS OBJETIVOS SON QUE LAS ARTICULACIONES PLÁSTICAS SE PRESENTEN EN ZONAS ESPECIALMENTE DETALLADAS PARA ALCANZAR GRANDES DUCTILIDADES Y QUE AÚN LAS SECCIONES DONDE SE ESPEREN ARTICULACIONES PLÁSTICAS SE PROTEJAN CONTRA FALLA FRÁGIL.

RESUMEN DE REQUISITOS PARA VIGAS:

- . CUANTÍA MÁXIMA DE REFUERZO IGUAL A 50% DE LA BALANCEADA.
- . TENER UN REFUERZO MÍNIMO POSITIVO Y NEGATIVO EN TODAS LAS SECCIONES ($P_{MIN} = 14/F_Y$); MÍNIMO DOS BARRAS EN CADA LECHO.
- . COLOCAR EN LOS EXTREMOS REFUERZO POSITIVO QUE PROPORCIONE UN MOMENTO RESISTENTE IGUAL POR LO MENOS A LA MITAD DEL NEGATIVO.

POR LO MENOS UNA TERCERA PARTE DEL REFUERZO NEGATIVO DEBE EXTENDERSE HASTA UN CUARTO DEL CLARO Y UNA CUARTA PARTE DEBE SER CONTINUA EN TODO EL LECHO SUPERIOR. NO CORTAR REFUERZO EN ZONAS DE POSIBLES ARTICULACIONES PLÁSTICAS (A $2D$ DEL APOYO); SI NO PUEDEN EVITARSE TRASLAPES DEBERÁN COLOCARSE ESTRIBOS A LO LARGO DE LOS MISMOS. ESTRIBOS, MÍNIMO #3, A $D/2$ EN TODA LA VIGA Y A $D/4$ EN UNA DISTANCIA DE 4 PERALTES A PARTIR DEL APOYO. EN ESTA ZONA A, $\geq 0.15A_s \frac{s}{D}$ ó $0.15A_s \frac{s}{D}$. EN LA ZONA DE ARTICULACIÓN PLÁSTICA ($2D$ DEL APOYO) LAS BARRAS QUE DEBAN TRABAJAR EN COMPRESIÓN DEBERÁN ESTAR CONFINADAS POR ESTRIBOS (MÍNIMO #3) A UNA SEPARACIÓN NO MAYOR DE $16 \emptyset$ NI 30 CM. DEBE DISEÑARSE PARA LA FUERZA CORTANTE QUE SE PRESENTA EN LA VIGA CUANDO SE ALCANZAN LOS MOMENTOS ÚLTIMOS EN LOS EXTREMOS. ESTO ES CON LA FINALIDAD DE QUE PUEDA DESARROLLARSE UN MECANISMO DE FALLA POR FLEXIÓN.

RESUMEN DE REQUISITOS PARA COLUMNAS:

CUANTÍA DE REFUERZO ENTRE 1 Y 6%

LA SUMA DE LAS CAPACIDADES EN FLEXIÓN DE LAS COLUMNAS QUE CONCURREN A UNA UNIÓN DEBE SER MAYOR QUE LA SUMA DE CAPACIDADES DE LAS VIGAS QUE CONCURREN A LA MISMA. ESTO TIENE A ASEGURAR QUE LAS ARTICULACIONES PLÁSTICAS SE FORMEN EN LAS VIGAS. NO DICE CUÁNTO DEBEN SOBREDISEÑARSE LAS COLUMNAS.

SI $P \leq 0.4 P_B$ (CARGA AXIAL PARA FALLA BALANCEADA) DEBEN RESPETARSE EN LA COLUMNA LOS MISMOS REQUISITOS QUE PARA VIGAS.

CUANDO $P > 0.4 P_B$ HAY QUE CONFINAR EL NÚCLEO DE LA COLUMNA POR MEDIO DE ESPIRAL O ESTRIBOS EN UNA DISTANCIA IGUAL A UN PERALTE, $1/6$ DE LA ALTURA DE LA COLUMNA O 45 CM (EL MAYOR DE LOS TRES) A PARTIR DE LA CARGA DE LA VIGA.

LA CUANTÍA DE REFUERZO ESPIRAL SERÁ

$$\rho_s = 0.45 \left(\frac{A_G}{A_C} - 1 \right) \frac{F_C}{F_Y} \approx 0.12 \frac{F'_C}{F_Y}$$

EL ÁREA DE ESTRIBOS DE CONFINAMIENTO SERÁ POR LO MENOS

IGUAL A $A_{SH} = \frac{l_H s_H}{Z}$, s_H NO MAYOR QUE 10 CM.

PARA REDUCIR LA LONGITUD l_H PUEDEN EMPLEARSE GANCHOS DEL MISMO DIÁMETRO QUE LOS ESTRIBOS CUYA DEFORMACIÓN REQUIERE RETRINGIR.

SEPARACIÓN MÁXIMA DE ESTRIBOS: $d/2$; DISEÑADOS PARA RESISTIR EL CORTANTE QUE SE INTRODUCE EN LA COLUMNA AL FORMARSE LAS ARTICULACIONES PLÁSTICAS EN LAS VIGAS.

LAS CONEXIONES VIGA-COLUMNA SON PUNTOS CRÍTICOS DEL COMPORTAMIENTO DE UN MARCO. HA HABIDO FALLAS FRECUENTES SOBRE TODO POR ANCLAJE INADECUADAS DEL REFUERZO DE LAS VIGAS.

LAS CONEXIONES EXTREMAS SON MUCHO MÁS CRÍTICAS QUE LAS INTERIORES.

SE REQUIERE REVISAR LAS CONEXIONES:

- A) POR CONFINAMIENTO PROLONGANDO EL REFUERZO TRANSVERSAL A LOS EXTREMOS DE LA COLUMNA, DENTRO DE LA CONEXIÓN CON LA TRABE.
- B) POR CORTANTE, REVISANDO LA CONEXIÓN PARA UNA CONDICIÓN DE CORTANTE ÚLTIMA.
- C) POR ANCLAJE; EVITANDO TRASLAPES; DANDO LONGITUD DE ANCLAJE SUFICIENTE A LAS BARRAS LONGITUDINALES (ESTO RIGE EL TAMAÑO DE LA COLUMNA), DANDO UN TAMAÑO SUFICIENTE A LA VIGA Y A LA COLUMNA PARA PERMITIR LA INVERSIÓN DE ESFUERZOS.

7. LOSAS PLANAS

AL NO TENER VIGAS FRANCAS SE LIMITA EL EFECTO DE MARCO; RESULTAN SISTEMAS MUY FLEXIBLES Y CON PROBLEMAS DE CORTANTE EN LA CONEXIÓN LOSA-COLUMNA.

GRAN NÚMERO DE FALLAS OBSERVADAS EN ESTE SISTEMA.

ES NECESARIO QUE TENGAN OTROS ELEMENTOS QUE TOMEN CARGAS LATERALES (MUROS).

EL REGLAMENTO DEL DISTRITO FEDERAL DA REQUISITOS DE ANÁLISIS (ANCHO EQUIVALENTE DE LOSA) Y DE DIMENSIONAMIENTO DE REFUERZO EN LOSA Y EN LA CONEXIÓN, PARA QUE RESISTAN EFECTOS SÍSMICOS. LA EFICIENCIA ES LIMITADA.

EL REFUERZO POR SISMO DEBE CONCENTRARSE EN LAS NERVADURAS DE EJE DE COLUMNA Y DEBE PROPORCIONARSE REFUERZO DE CORTANTE EN UNA VIGA AHOGADA.

8. MUROS DE CONCRETO

MAL LLAMADOS MUROS DE CORTANTE, TRABAJAN PRINCIPALMENTE POR FLEXIÓN.

PUEDEN ALCANZAR GRAN DUCTILIDAD SI SE DETALLAN APROPIADAMENTE. POR SU ALTA RIGIDEZ TIENDEN A CONCENTRAR LAS FUERZAS SÍSMICAS.

REQUIEREN REFUERZO VERTICAL Y HORIZONTAL EN EL ALMA Y, ESPECIALMENTE, REFUERZO EN SUS EXTREMOS PARA QUE CUANDO TRABAJEN ESTAS EN COMPRESIÓN NO SE PRODUZCA FALLA FRÁGIL.

LOS ELEMENTOS EXTREMOS DEL MURO DEBEN DETALLARSE COMO COLUMNAS DÚCTILES.

LOS HUECOS Y ABERTURAS REQUIEREN DE DETALLADO ESPECIAL.

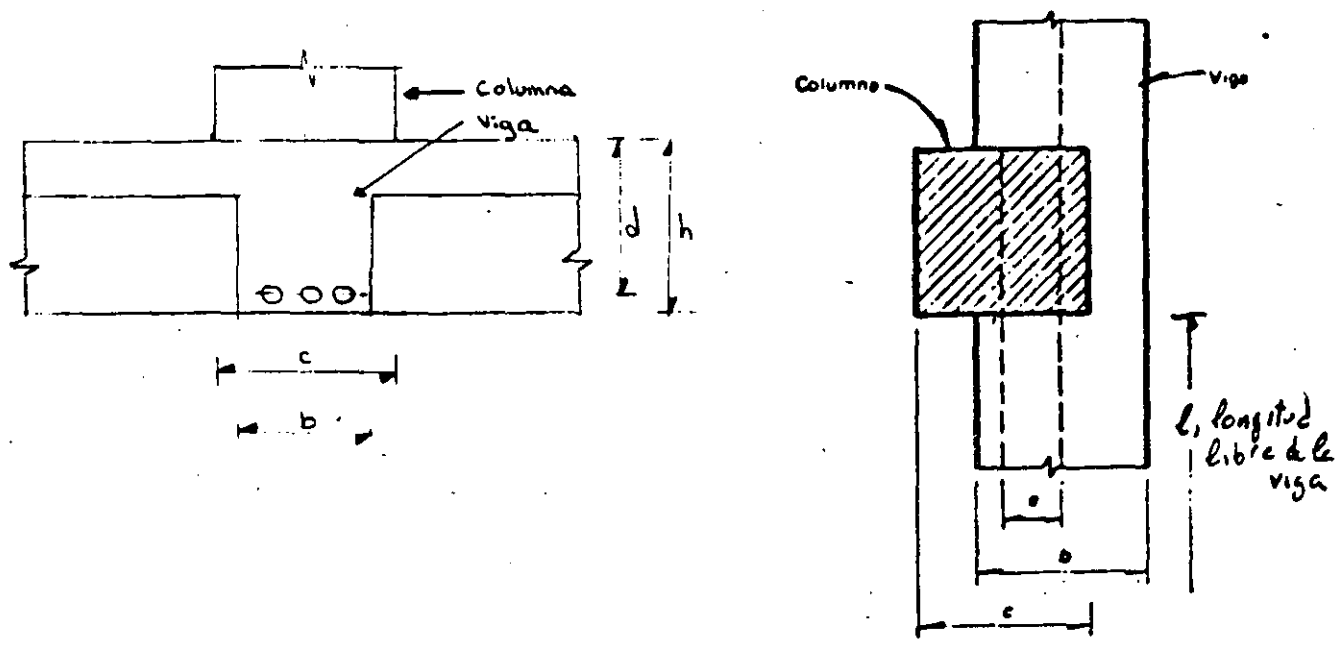
REFERENCIAS

1. PARK R. Y T. PAULAY "REINFORCED CONCRETE STRUCTURES", J. WILEY, 1975.
2. DOWRICK, D.J. "EARTHQUAKE RESISTANT DESIGN", 2^A EDICIÓN, J. WILEY, 1988.
3. BAZÁN, E. Y R. MELI "MANUAL DE DISEÑO SÍSMICO DE EDIFICIOS", LIMUSA, 1985.

4. LOERA, S. "MANUAL DE LAS NORMAS TÉCNICAS DE DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE ESTRUCTURAS DE CONCRETO DEL RDF 87", INSTITUTO DE INGENIERÍA, 1991.

REQUISITOS DE DUCTILIDAD
PARA ESTRUCTURAS DE CONCRETO

ROBERTO MELI



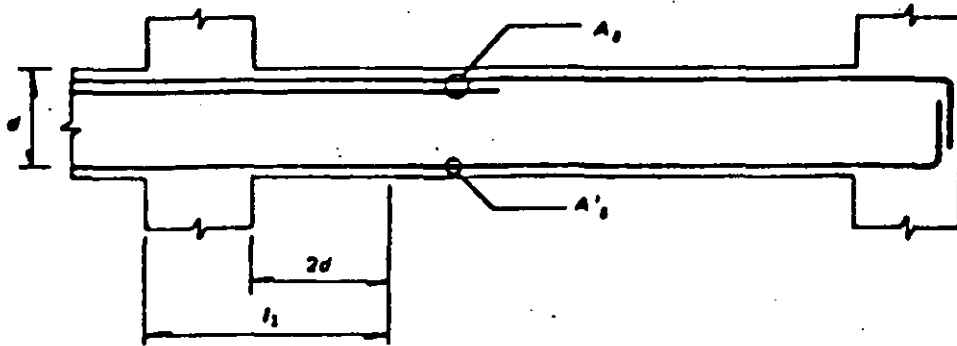
a) Requisitos Generales

$$l/b \leq 35$$

b) Requisitos para marcos dúctiles

$$\begin{array}{lll}
 b \geq 25 \text{ cm} & b \leq c & h/b \leq 3 \\
 e \leq 0.1c & l/b \leq 30 & l/d \geq 4
 \end{array}$$

Fig 10.1 Requisitos geométricos para vigas de marcos de concreto.



a) Requisitos generales

$$A_s \text{ y } A'_s \geq 0.7 \frac{\sqrt{f'_c}}{f_y} b d, \text{ en zonas donde aparezcan tensiones}$$

$$A_s, A'_s \leq 0.75 A_{sb} \text{ (área de refuerzo correspondiente a falla balanceada)}$$

b) Requisitos para marcos dúctiles

$$A_s, A'_s \geq 0.7 (\sqrt{f'_c} / f_y) b d, \text{ en toda la longitud de la viga}$$

$$A_s, A'_s \leq 0.75 A_{sb}$$

Mínimo dos barras #4 en toda la longitud y en ambos lados

No se admiten paquetes de más de dos barras.

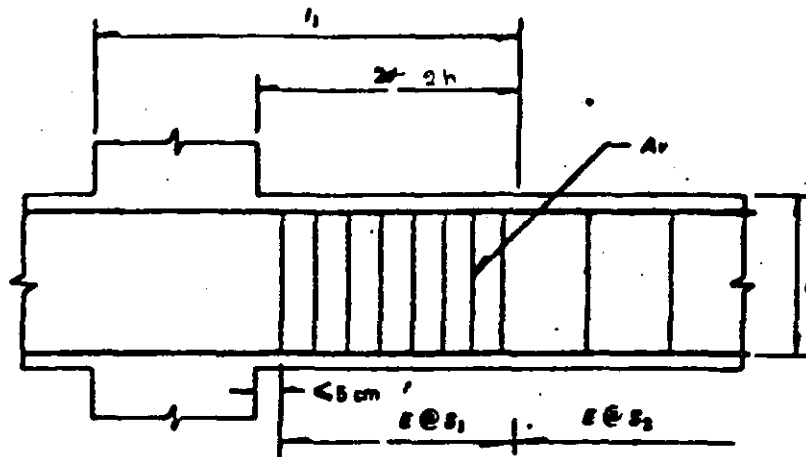
El momento resistente positivo en L_1 no será menor que la mitad del momento resistente negativo.

No puede haber traslapes, ni corte del refuerzo longitudinal en L_1

Todo el refuerzo de tensión, A_s , necesario por sismo deberá pasar por el núcleo de la columna

En toda sección de la viga deberá proporcionarse una resistencia a momento negativo y positivo no menor que una cuarta parte de la máxima que se tiene en los extremos de la viga

Fig 10.2 Requisitos para el refuerzo longitudinal de vigas de marcos de concreto.



a) Requisitos generales

No se tendrá en cuenta estribos:

- que formen un ángulo con el eje de la pieza $< 45^\circ$
- Ni barras dobladas en que dicho ángulo sea $< 30^\circ$

Suministrar refuerzo mínimo por tensión diagonal cuando

si $V_u < V_{cr}$, $\phi \geq \#2$ @ $0.5d$ (Se colocará a partir de toda unión de viga con columna ó muro hasta 0.25 del claro correspondiente).

si $V_u > V_{cr}$,
$$s = \frac{F_r A_v f_y d (\text{Sen } \theta + \text{Cos } \theta)}{V_u - V_{cr}} \leq \frac{F_r A_v f_y}{3.5 b}$$

NOTA: en secciones circulares se cambia d por el diámetro.

$$s \geq 5 \text{ cm}$$

$$\begin{aligned} V_{cr} \leq V_u \leq 1.5 F_r b d \sqrt{f'_c} & \quad s \leq 0.6d \\ 1.5 F_r b d \sqrt{f'_c} < V_u & \quad s \leq 0.25d \end{aligned}$$

En ningún caso se permitirá que $V_u > 2 F_r b d \sqrt{f'_c}$

Cuando el refuerzo consiste de 1 solo estribo ó grupo de barras paralelas dobladas en una misma sección, su área se calculará

$$A_v = \frac{V_u - V_{cr}}{F_r f_y \text{Sen } \theta}, \text{ en este caso no se admitirá } V_u > 1.5 F_r b d \sqrt{f'_c}$$

b) Requisitos para marcos dúctiles

1) Refuerzo Transversal para confinamiento

Estribas # 2.5 ó mayores

En la zona de los estribos deberán ser cerradas y con remate a 135° se indica en la fig. 10.4. La separación no deberá exceder de:

$$S_1 \leq \begin{cases} 8 \text{ diámetros de la barra longitudinal mayor} \\ 24 \text{ diámetros del estribo} \\ 30 \text{ cm.} \\ d/4 \end{cases}$$

Además al menos una de cada dos barras longitudinales de la periferia deberá estar abrazada por la esquina de un estribo.

2) Requisitos por cortante.

Fuera de la habra estribos a una separación $S_2 \leq d/2$
Estribas verticales cerradas de una pieza.

$$\phi_s \geq 2.5$$

$$V_{sismo} \geq \frac{V_u}{2} \rightarrow V_{cr} = 0$$

Fig. 10.3 Requisitos para refuerzo transversal de vigas de marcos de concreto

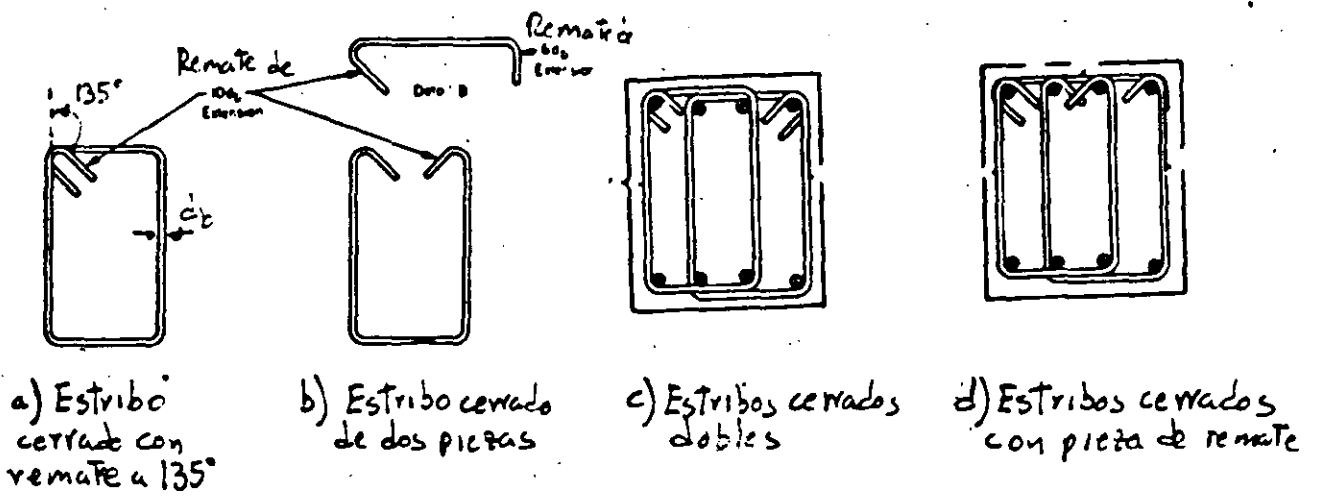


Fig 10.4 Estribos para confinamiento (de código ACI)

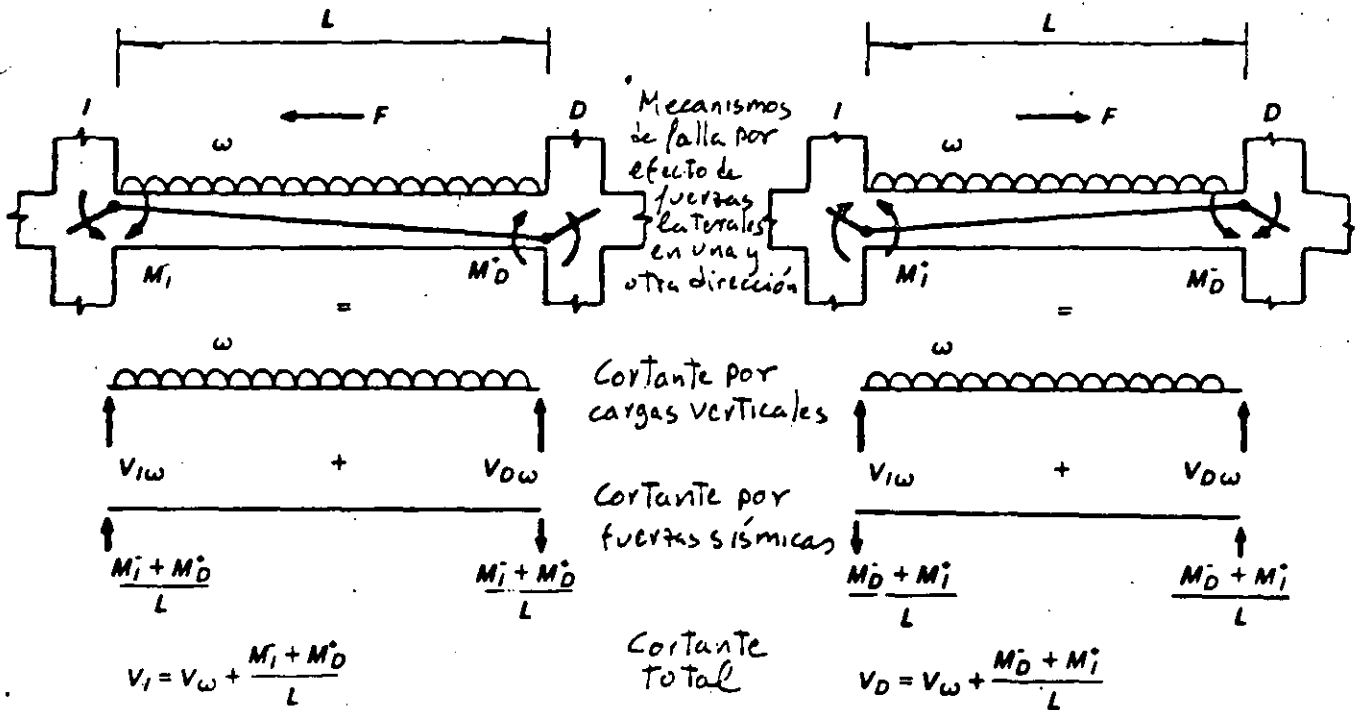
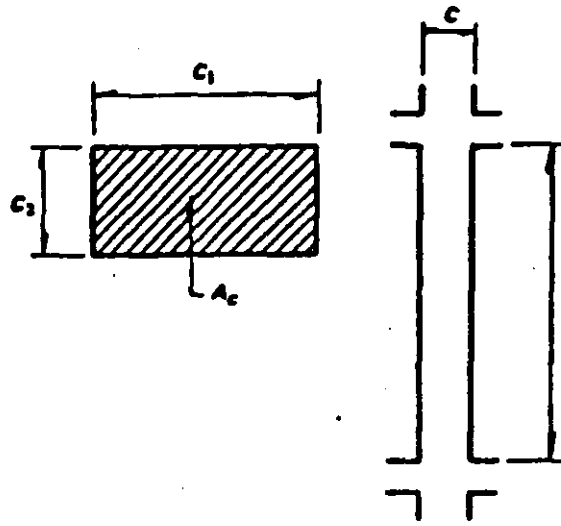


Fig 10.5 Determinación de las fuerzas cortantes de diseño para vigas de marcos dúctiles de concreto



Requisitos generales

$$c_1, c_2 \geq 20 \text{ cm}$$

$$c_1/c_2 \leq 4$$

Requisitos adicionales para marcos dúctiles

$$c_1, c_2 \geq 30 \text{ cm}$$

$$A_c \geq \frac{P_u}{0.5f'_c}$$

$$c_1/c_2 \leq 2.5$$

$$l/c \leq 15$$

Fig 10.6 Requisitos geométricos para columnas de marcos de concreto

I.- REFUERZO LONGITUDINAL

En la porción de la columna que atañen la unión con la viga debe colocarse el mismo ref. transversal que en la. Si el nudo está confinado

por cuatro trabes que llegan a él y el ancho de cada una es al menos igual a 0.75 veces el ancho respectivo de la columna, puede usarse la mitad del refuerzo transversal mínimo.

a) Requisitos generales.

$$\frac{20}{f_y} \leq \rho \leq 0.06$$

Mínimo 4 barras en columnas rectangulares y 6 en circulares

b) Requisitos para marcos dúctiles

$$0.01 \leq \rho \leq 0.04$$

Paquetes de no más de dos barras
Traspases solo en la mitad central de la altura libre de la columna

II.- REFUERZO TRANSVERSAL

El refuerzo transversal de toda columna no será menor que el necesario por resistencia a fuerza cortante y torsión, en su caso.

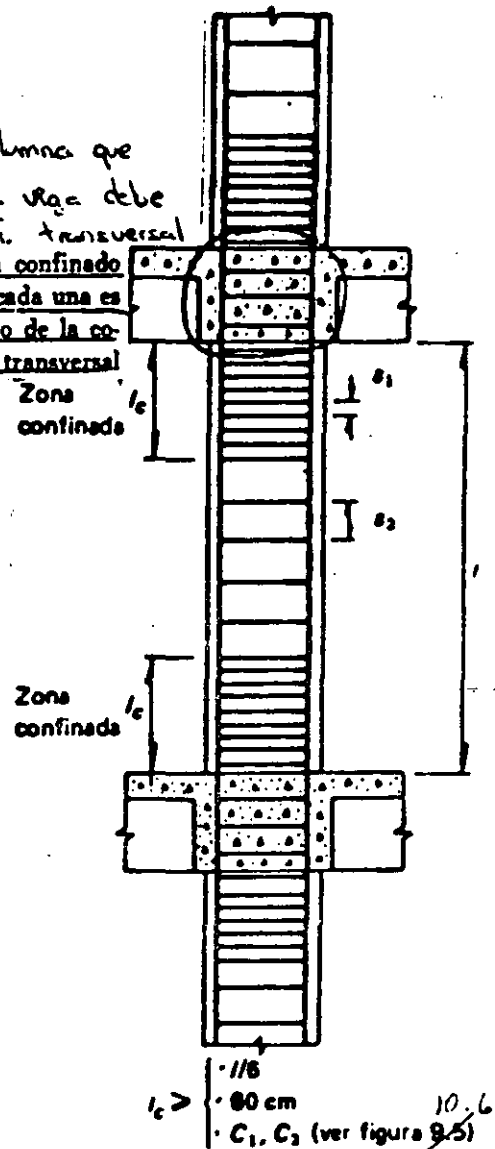
a) Requisitos generales

$$S_2 \leq \begin{cases} \frac{850 d_b}{\sqrt{f_y}} & d_b - \text{Ø más delgado} \\ 48 d_u & d_u - \text{Ø estribo} \\ c_1/2, c_2/2 \end{cases}$$

$S_1 \leq$ la mitad de los límites para S_2 .

b) Requisitos para marcos dúctiles

1) Confinamiento



En la parte inferior de columnas de planta baja este refuerzo debe llegar hasta media altura de la columna, y debe continuarse dentro de la cimentación al menos en una distancia igual a la longitud de desarrollo en compresión de la barra más gruesa

El refuerzo transversal no debe ser de grado mayor que 42.

$$d_v \geq \#3$$

Refuerzo Transversal mínimo:

$$S_1 \leq \begin{cases} 10 \text{ cm.} \\ \frac{C_{mexor}}{4} \end{cases}$$

S_1 - Mismos límites que para el caso general.

S_2 - Igual que para requisitos generales

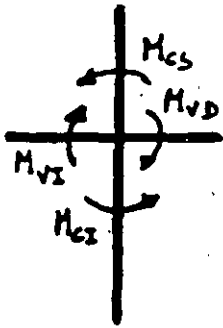
2) Fuerza cortante.

Si $P_o < \frac{A_g f'_c}{20}$ (Incluyendo efectos sísmicos)

$$V_{sismo} \geq \frac{V_u}{2} \rightarrow V_{cr} = 0$$

Fig. 10.7 Requisitos de refuerzo para columnas de marcos de concreto.

$$\Sigma M_c \geq 1.5(\Sigma M_v)$$

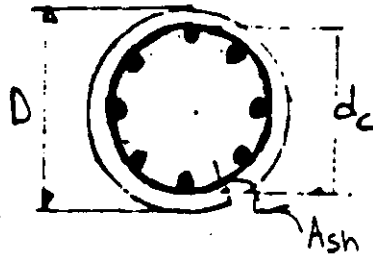


$\Sigma M_v = M_{vD} + M_{vI}$, es la suma de los momentos flexionantes resistentes (negativo de un lado y positivo del otro) de los extremos de las vigas que llegan a un nudo

$\Sigma M_c = M_{cS} + M_{cI}$, es la suma de los momentos flexionantes que deben ser capaces de resistir los extremos de las columnas (superior e inferior) que llegan a dicho nudo

El momento resistente de la columna se calculará para la carga axial que le corresponde a la columna por efecto de carga vertical más el doble de la que se genera por efecto de las fuerzas sísmicas actuando en la dirección correspondiente al signo de los momentos flexionantes considerados

Fig 10.8 Procedimiento para la revisión de la capacidad en flexocompresión de columnas de marcos dúctiles de concreto



Mínimo 6 barras longitudinales
 Ref. transversal $\phi \geq \text{No. 3}$
 El acero de la hélice \leq grado 42

$$A_{sh} \geq 0.11 \left(\frac{A_g}{A_c} - 1 \right) \frac{f'_c}{f_y} d_c s$$

$$A_{sh} \geq 0.12 \frac{f'_c}{f_y} d_c s$$

$$l_c \geq \begin{cases} D \\ h/6 \\ 60 \text{ cm} \end{cases}$$

$$s_2 \leq 7 \text{ cm } y \geq 1.5 \text{ tamaño agregado}$$

Los testapes tendrán 1.5 vueltas

Las hélices se anclarán en los extremos de la columna mediante 2.5 vueltas

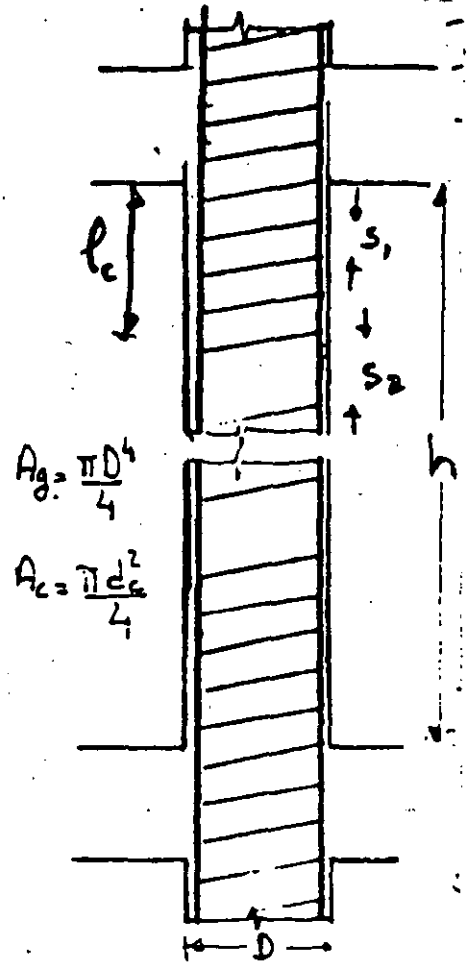


Fig 10.9 Requisitos para columnas zunchadas

$$\Sigma A_u \geq 0.3 \left(\frac{A_g}{A_c} - 1 \right) \frac{f'_c}{f_y} d_c S_1$$

$$\Sigma A_u \geq 0.19 \frac{f'_c}{f_y} d_c S_1$$

ΣA_u = suma de áreas de todas las ramas de estribos en la dirección considerada

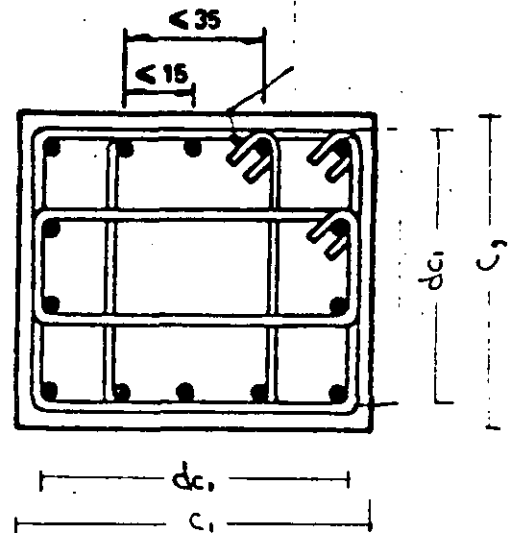
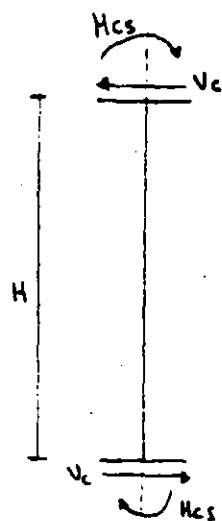


Fig. 10.10 Requisitos de distribución de refuerzo en columnas de estribos.

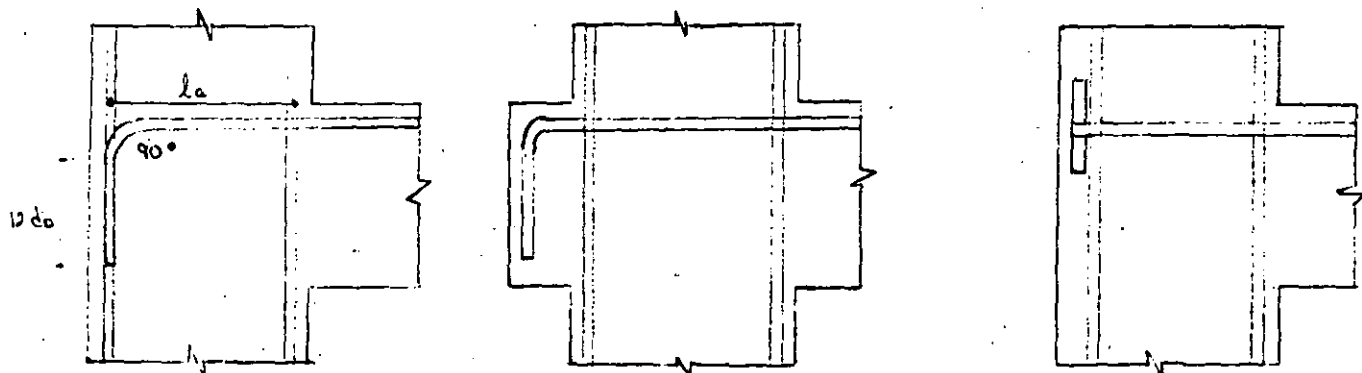


$$V_c = \frac{M_{cs} + M_{cs}}{H}$$

$$M_c \geq 1.5(\Sigma M_u)$$

- En el extremo inferior de columnas de planta baja, se usará el momento resistente de diseño de la columna obtenido con la carga axial de diseño que conduzca al mayor momento resistente.
- En el extremo superior de columnas del último entrepiso se usará $1.5 \Sigma M_u$.

Fig. 10.14 Procedimiento para la revisión de la capacidad por cortante de las columnas de marcos dúctiles.



$$l_a \geq \begin{cases} \frac{0.076 f_y d_b}{\sqrt{f_c}} \\ 15 \text{ cm} \\ 8 d_b \end{cases}$$

NOTA: 30% mayor en concreto ligero

a) Anclaje con gancho extremo

b) Ulega con saliente para proporcionar la longitud de anclaje necesaria

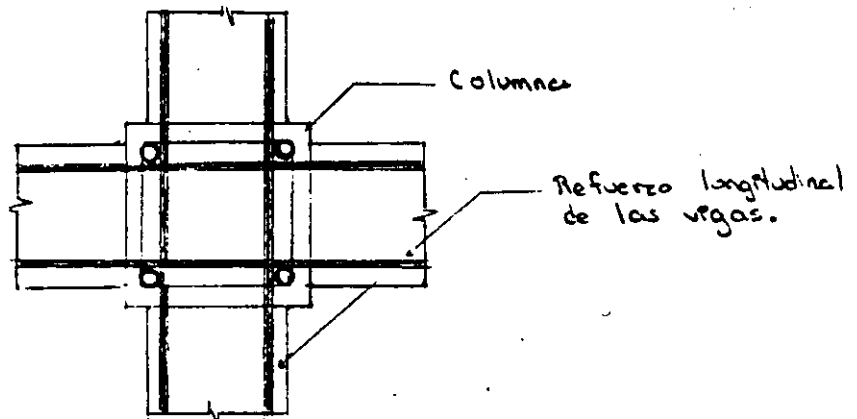
c) Anclaje mecánico

Fig. 10.15 Anclaje del refuerzo longitudinal en Vigas extremas de ...

UNION VIGA-COLUMNA

Marcos Dúctiles

a) Requisitos generales

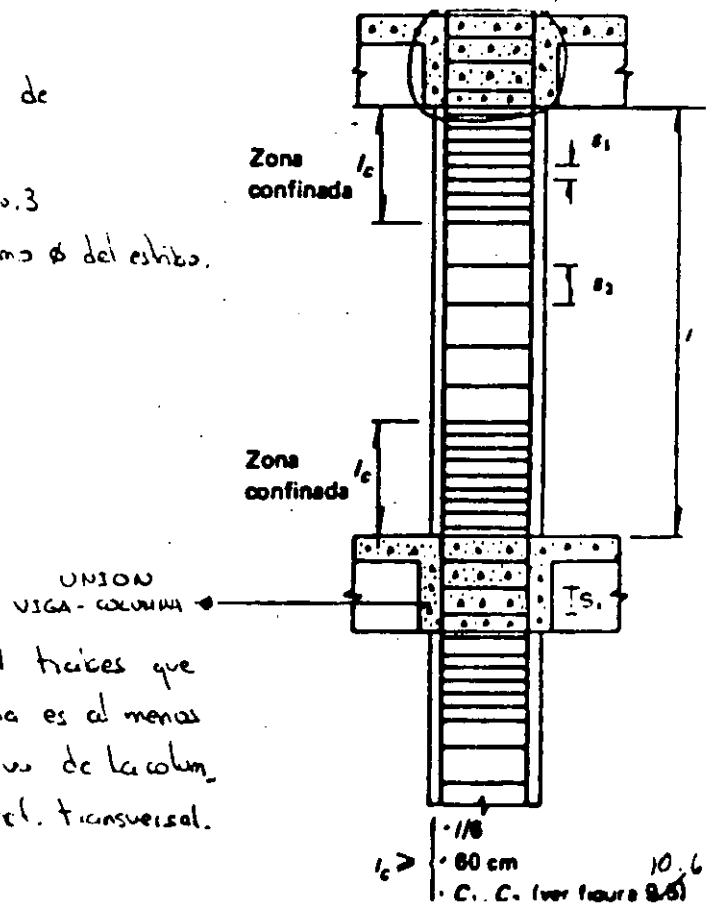


El refuerzo longitudinal de las vigas que llegan a la unión debe pasar dentro del núcleo de la columna.

b) Refuerzo Transversal

- El refuerzo transversal no debe ser de grado mayor que el 42.
- Estibos cerrados de una pieza, de $\phi \geq N\text{o.} 3$
- Puede complementarse con grapos del mismo ϕ del estibo.

$$s_1 \leq \begin{cases} 0.25 C_{\text{min}} \\ 10 \text{ cm} \end{cases}$$



Si el núcleo está confinado por 4 traveses que llegan a él y el ancho de cada una es al menos igual a 0.75 veces el ancho respectivo de la columna, puede usarse la mitad del ref. transversal.

2)

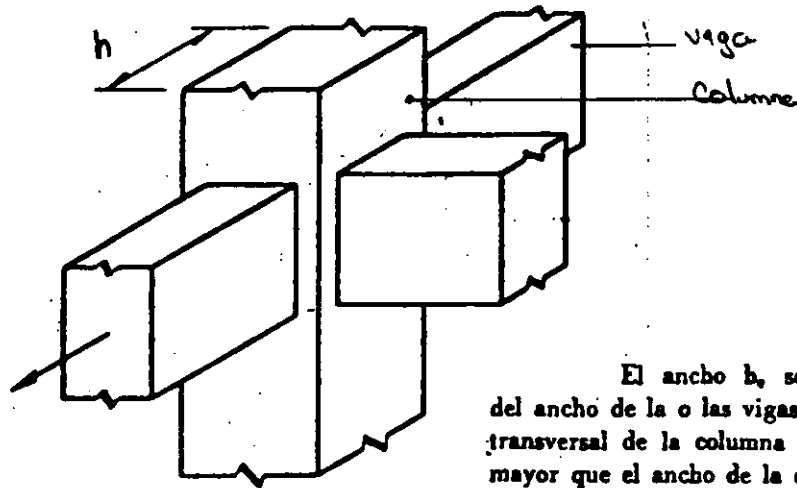
c) Resistencia a fuerza cortante.

La fuerza cortante se calculará en un plano horizontal a media altura del nudo.

En nudos confinados
otros nudos

$$V_u = 5.5 F_R \sqrt{f'_c} b_e h$$

$$V_u = 4.5 F_R \sqrt{f'_c} b_e h$$



d) Anclaje del refuerzo

Los diámetros de las barras de vigas y columnas que pasen rectos a través de un nudo deben seleccionarse de modo que se cumplan las relaciones siguientes:

$$h(\text{col.})/d_b(\text{barra de viga}) \geq 20$$

$$h(\text{viga})/d_b(\text{barra de col.}) \geq 20$$

$h(\text{col.})$ es la dimensión transversal de la columna en la dirección de las barras de viga consideradas

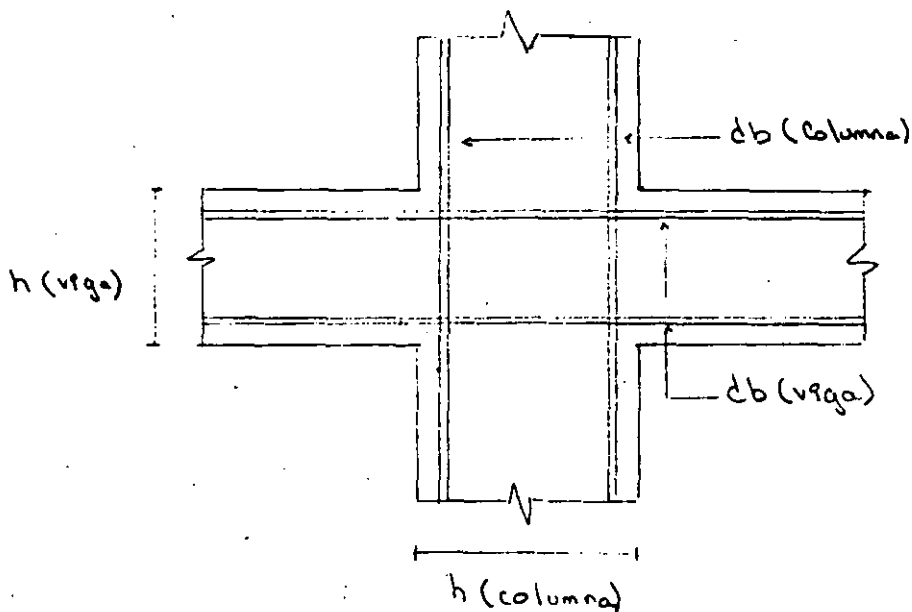
Si en la columna superior del nudo cumple:

10.16 b)

$$\frac{P_u}{A_g f'_c} \geq 0.3$$

Entonces: $h(\text{viga})/d_b(\text{barras de col.}) \geq 15$

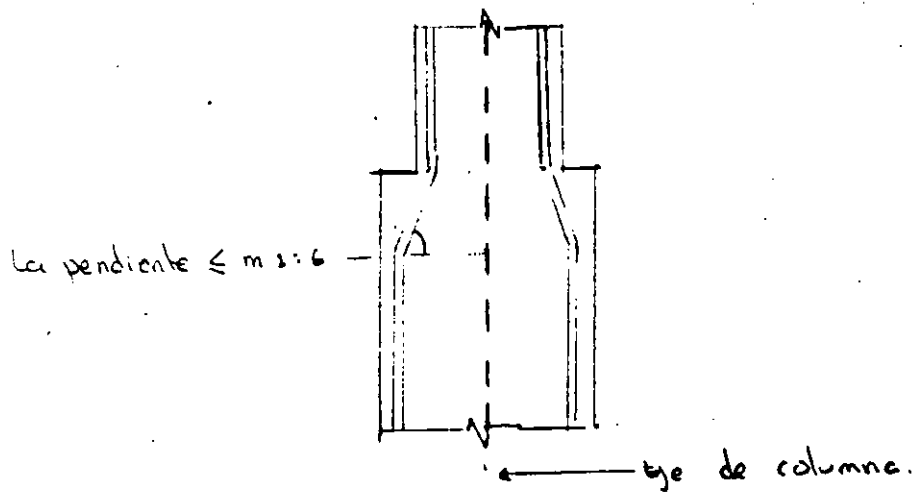
NOTA: también esta relación se cumplirá cuando en la estructura los muros de concreto reforzado resisten más del 50% de la fuerza lateral total.

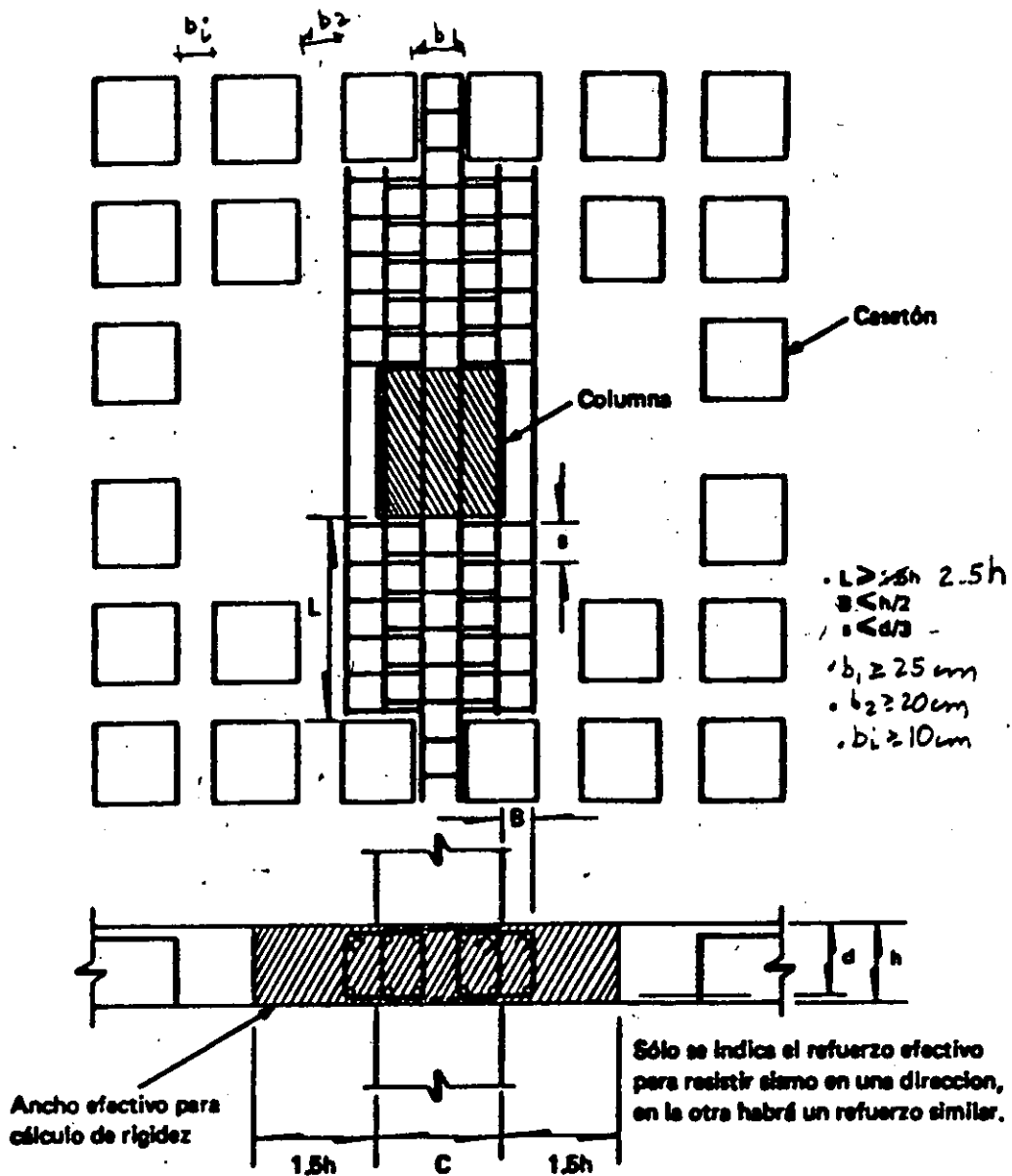


GENERALES:

Será de la misma manera que en la zona de confinamiento (el diámetro del ref. transversal no será menor que los usados en la columna en las secciones próximas a dicha sección, si es igual que en la zona de confinamiento).

Si la intersección es excéntrica, deben tomarse en cuenta las fuerzas cortantes, momentos y torsiones causados por la excentricidad.



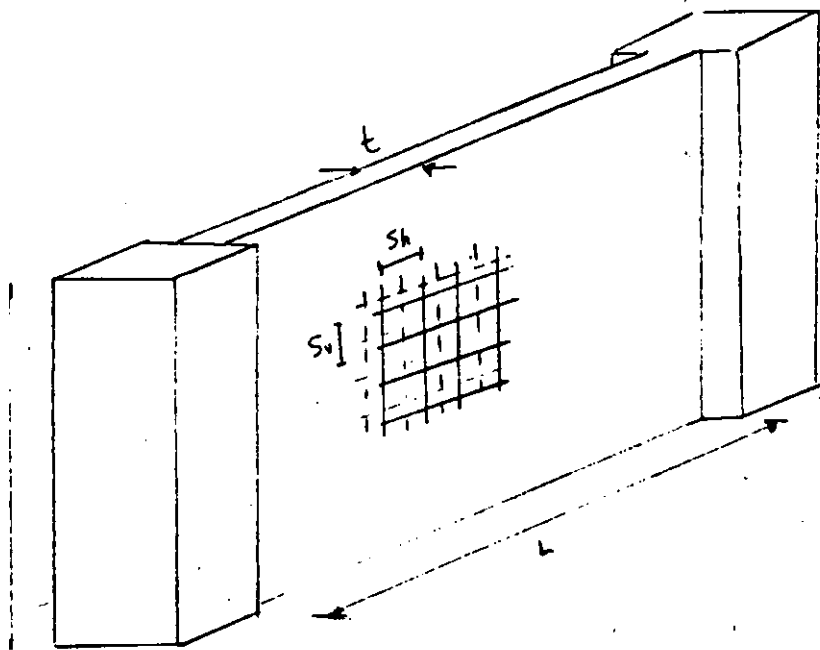


$$\frac{h(\text{columna})}{d_b(\text{barras de losa})} \geq 20$$

$$\frac{h(\text{losa})}{d_b(\text{barras de col.})} \geq 15$$

$h(\text{columna})$ - es la dimensión transversal de la columna en la dirección de las barras de losa consideradas.

Fig 10.17 Refuerzo en la conexión losa plano-columna



Limitaciones geométricas

$$L/t \leq 70$$

$$t \geq \begin{cases} 13 \text{ cms} \\ 0.06 H \text{ (altura no restrin-} \\ \text{gida lateralmente)} \end{cases}$$

Refuerzo mínimo

$$P_v, P_h \geq 0.0025$$

$$S_v, S_h \leq 35 \text{ cm.}$$

$$P_h = \frac{A_{sh}}{t S_v} \quad P_v = \frac{A_{sv}}{t S_h}$$

Fig. 10.18 Requisitos geométricos y de refuerzo en muros de concreto

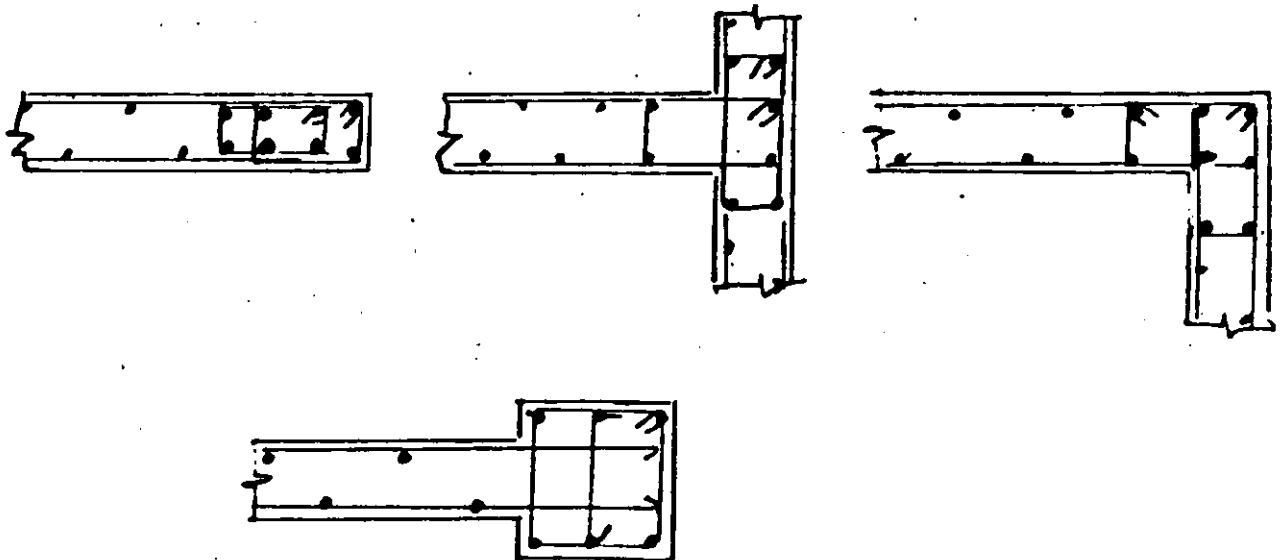
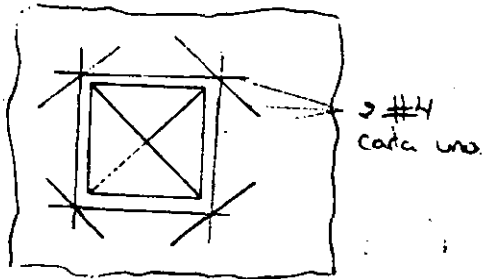
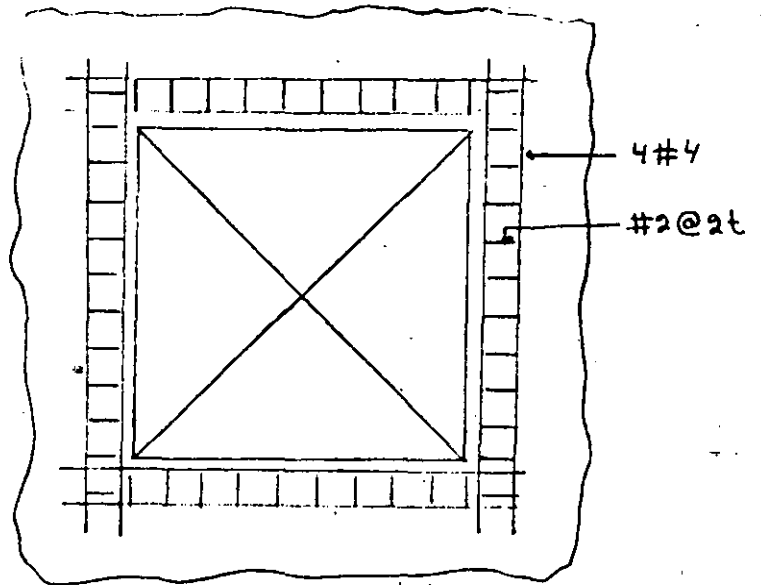


Fig. 10.14 Refuerzo en los extremos de muros



Refuerzo mínimo alrededor de aberturas pequeñas (la mayor dimensión del vano no supera 80 cm ni una cuarta parte de la dimensión de la pared)



Refuerzo mínimo alrededor de aberturas mayores.

Fig. 10.20 Detalles recomendados de refuerzo alrededor de aberturas en muros de concreto.

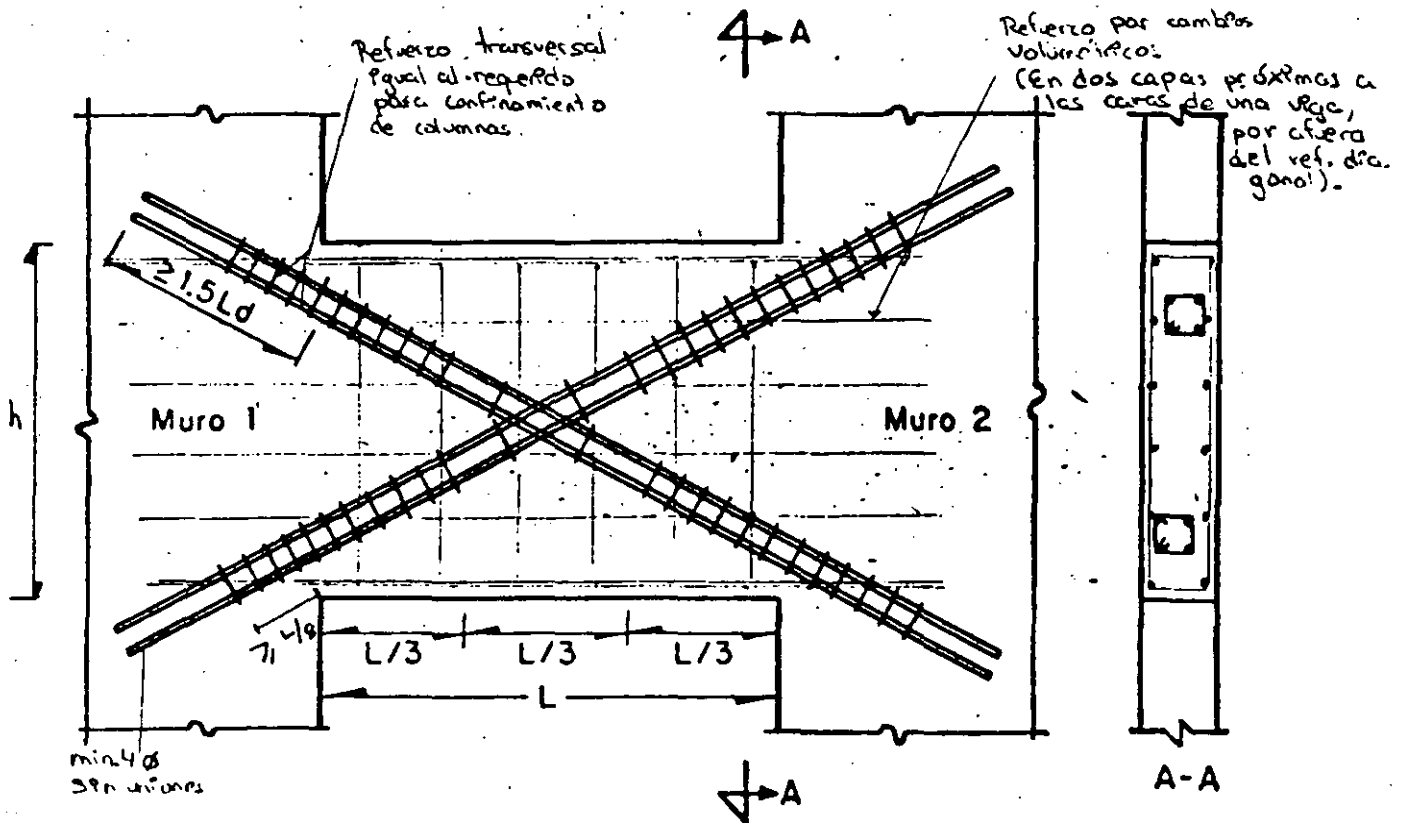


Fig. 10.21 Refuerzo de viga de acoplamiento que une muros de concreto. (norma 1/n/a)



**FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA**

XX CURSO INTERNACIONAL DE INGENIERIA SISMICA

MODULO III: DISEÑO SISMICO DE EDIFICIOS

**MODIFICACIONES A LA PRACTICA DE DISEÑO Y CONSTRUCCION DE ESTRUCTURAS
DE CONCRETO**

DISEÑO SISMICO DE ESTRUCUTURAS DE CONCRETO

DR. ROBERTO MELI PIRALLA

MODIFICACIONES A LA PRACTICA DE DISEÑO SISMICO DE ESTRUCTURAS DE CONCRETO



Roberto Meli*

Alcance

Fue en las estructuras de concreto donde se registró el mayor número de daños en los sismos de 1985 en la ciudad de México. Esto ocasionó que se avanzaran algunas dudas sobre la idoneidad del concreto reforzado para estructuras en zonas sísmicas. Si se compara el número de construcciones de concreto falladas con el de aquellas que tuvieron un desempeño satisfactorio en el sismo mencionado y en otros sismos severos, se concluye que es perfectamente factible construir edificaciones seguras en concreto reforzado. Es necesario sin embargo hacer modificaciones radicales a las prácticas de construcción que se seguían en el pasado. Estas modificaciones van más allá de la adopción de mayores coeficientes sísmicos en el diseño estructural: deben emplearse sistemas estructurales más idóneos para resistir acciones sísmicas, materiales con propiedades más adecuadas, métodos de diseño que mejor reflejen el comportamiento sísmico de las estructuras y detalles del refuerzo que permitan que los elementos soporten grandes deformaciones inelásticas sin deterioro de capacidad.

Parte de estas modificaciones se derivan de lo especificado por los nuevos reglamentos de construcciones. Otras modificaciones deben ser reflejo del criterio y la conciencia de los responsables del proyecto y construcción de las edificaciones.

En lo que sigue se harán algunas consideraciones sobre los cambios más importantes.

*Instituto de Ingeniería, UNAM

Materiales

La verificación de la calidad del concreto en algunos edificios dañados reveló que, aunque en términos generales la resistencia del concreto era superior a la de proyecto, la variabilidad de esta propiedad en las distintas partes de la estructura era elevada y en ciertos casos la resistencia insuficiente. Los defectos más frecuentes fueron los relacionados con mala colocación del concreto, como evidencia de segregación, de mala compactación y de juntas de colado mal ejecutadas. Por tanto la mejora más significativa al respecto será la que se derive de un mejor control de calidad en la elaboración y en la colocación del concreto. Los cambios que se han hecho en la reciente revisión del reglamento de construcciones, relativos a la exigencia de una supervisión más estricta y más calificada de la construcción, tienden a lograr este objetivo.

El concreto que se ha producido tradicionalmente en el valle de México no cumple con algunos requisitos de calidad que se establecen internacionalmente para el concreto estructural. Para su elaboración se emplean gravas andesíticas o basaltos vesiculares de bajo peso volumétrico y arenas andesíticas con altos contenidos de polvo; con estos agregados se obtiene un concreto con un peso volumétrico algo menor que el normal, pero con características propias de los concretos más ligeros: bajo módulo de elasticidad, alta contracción por secado y elevadas deformaciones por flujo plástico. Puede lograrse la resistencia deseada de proyecto con una dosificación adecuada; sin embargo las características antes mencionadas presentan desventajas en cuanto al comportamiento estructural, por la mayor flexibilidad de las estructuras resultantes, por la tendencia al agrietamiento y por las elevadas deformaciones con el tiempo.

En un estudio realizado recientemente (Ref 1) se encontró que con el empleo de gravas de mejor calidad, como las que se obtienen de la trituración de rocas calizas o basálticas, se pueden superar los defectos antes mencionados y obtener concretos con características iguales a las que se recomiendan internacionalmente. Como ejemplo, la Fig 1 muestra el aumento radical en el módulo de elasticidad que se logra al emplear gravas calizas en lugar de las andesíticas. Las mejoras en las características de contracción y de flujo plástico son también notables. El nuevo Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal exige el empleo de un concreto de mejores características para estructuras importantes. El nuevo concreto (clase I) ya está disponible en el mercado a un costo no excesivamente superior al del tradicional (clase II) y su empleo debe difundirse rápidamente.

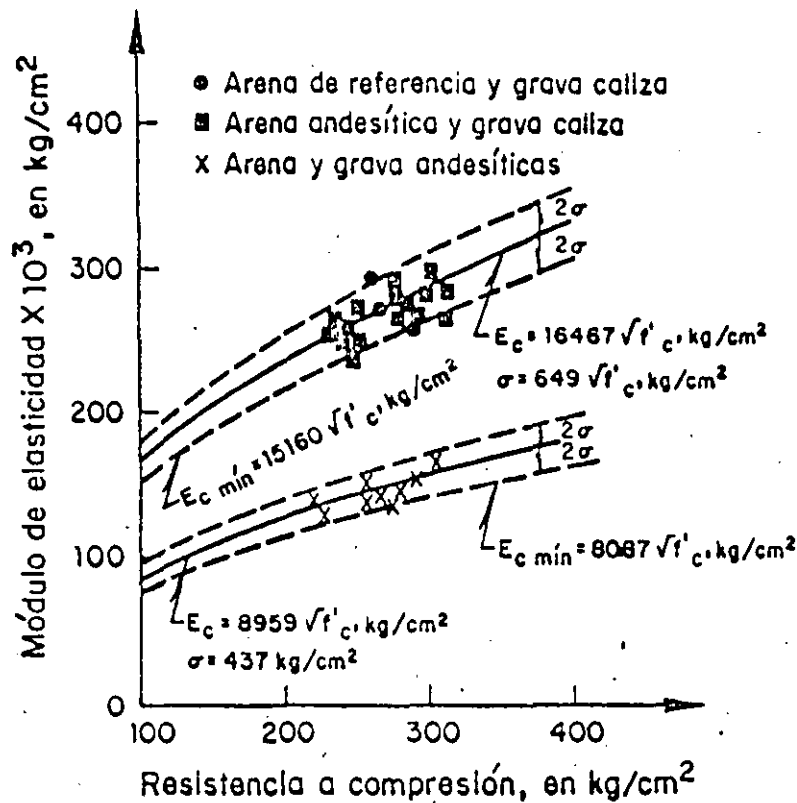


Fig 1. Relación módulo de elasticidad-resistencia a la compresión de los concretos andesíticos y calizos. (De Mendoza y Mena, Ref 1).

Otro aspecto preocupante de la práctica actual de elaboración del concreto es el uso de mezclas con proporciones excesivas de arena y consecuente escasez de grava así como con revenimientos muy elevados. Estas dosificaciones son típicas de los concretos que se transportan por bombeo y dan lugar a contracciones muy elevadas, las cuales tienden a producir una fisuración muy difundida en las estructuras y a debilitarlas para la resistencia a otras sollicitaciones. La escasez de grava da lugar además a concretos con módulos de elasticidad bajos. Debe eliminarse por tanto esta práctica y lograr la fluidez que se requiere para el bombeo, sin salirse de las dosificaciones que permitan producir un concreto con todas las propiedades adecuadas para un buen comportamiento estructural.

Para el refuerzo de las estructuras de concreto en zonas sísmicas conviene contar con aceros que tengan una amplia zona de fluencia definida, para un esfuerzo no excesivamente elevado. Con frecuencia las barras de refuerzo que se producen en el país (Grado 42) tienen una composición química tal que la zona de fluencia es muy reducida o desaparece totalmente, (esencialmente por el alto contenido de carbono). Deben evitarse estas situaciones ya que, al

no existir fluencia definida, los esfuerzos en las barras crecen en forma continua al ser deformada la estructura por el efecto de un sismo y no existe un límite en la capacidad por flexión de los elementos de concreto, el cual impida que se produzcan en dichos elementos los modos de falla que pueden ser de tipo frágil (cortante, torsión, compresión en columnas, adherencia). Este punto se aclarará más adelante. Particularmente crítico es el problema de la adherencia: si los esfuerzos en el acero crecen excesivamente, la transmisión de esfuerzos de adherencia al concreto tiende a producir el aplastamiento del concreto en contacto con las corrugaciones de las barras y un corrimiento progresivo de las barras dentro del concreto ante la repetición de ciclos de carga.

Otro aspecto desfavorable de los aceros con alto contenido de carbono es la dificultad de lograr soldaduras adecuadas. Se ha estado promoviendo la producción de aceros de grado 42 de baja aleación, con bajo contenido de carbono en los que se tiene una zona de fluencia muy amplia y que son muy fáciles de soldar. Aceros de este tipo son muy recomendables en zonas sísmicas.

El problema de la soldadura de barras en obra es crítico. El control de calidad de estas operaciones es muy delicado y en barras de gran diámetro el traslape ya no es admisible. Debe promoverse el empleo de conectores metálicos para este tipo de barras.

Sistemas estructurales

La edificación en las zonas urbanas se caracterizó hasta hace pocas décadas por su baja altura y por la abundancia de muros de mampostería de gran espesor; en los primeros edificios de cierta altura existía un esqueleto de estructura de acero, cubierto y rigidizado por gruesos muros de piedra o de tabique. Posteriormente, al aumentar la altura de los edificios y al popularizarse la construcción de concreto, subsistió la práctica de colocar un gran número de muros de tabique o de bloque en ambas direcciones y en todos los pisos. Poco a poco, sin embargo, los edificios se fueron haciendo más altos y más flexibles y el número de paredes rígidas de fachada y divisorias fue disminuyendo. Al mismo tiempo las formas se fueron haciendo más atrevidas e irregulares.

En la edificación tradicional las paredes divisorias y de fachada proporcionaban una resistencia apreciable a cargas laterales, suficiente para lograr un desempeño adecuado ante sismos de intensidad baja o moderada. Sin embargo la estructura resistente era inherentemente frágil y propiciaba el colapso ante sismos de excepcional intensidad.

En los edificios modernos, tanto en la ciudad de México como en la mayoría de las otras zonas sísmicas del país, no se sustituyó la resistencia y rigidez proporcionadas por los muros de mampostería, por la de otros elementos equivalentes como pudieron haber sido los muros de concreto; se adoptaron sistemas estructurales flexibles en los que el área de columnas y muros era relativamente pequeña y en los cuales la capacidad para resistir sismos de gran intensidad se basaba en la disipación de energía mediante deformaciones inelásticas.

Los resultados de la Fig 2 son muy ilustrativos. Se consiguan los periodos fundamentales de vibración medidos en edificios de distinto número de pisos en la ciudad de México (Ref 2). Se aprecia que en promedio la relación entre el periodo (en segundos) y el número de pisos es 0.10 para los edificios en terreno firme y 0.15 para aquellos ubicados en la zona del lago. En contraste esta relación vale en promedio 0.06 para los edificios típicos que se construyen en Japón. Ya que el periodo es inversamente proporcional a la raíz cuadrada de la rigidez, lo anterior indica que en promedio los edificios en Japón tienen una rigidez lateral superior en más de seis veces a la de los edificios típicos de la ciudad de México en la zona del lago. Parte de la diferencia se debe al efecto de la falta de empotramiento en la base que tienen los edificios desplantados en la zona de lago; los desplazamientos y rotaciones de la base reducen significativamente la rigidez lateral efectiva de los edificios. Los periodos mencionados se midieron para vibraciones ambientales de muy baja amplitud. Para vibraciones producidas por sismos intensos los periodos serían muy superiores. La razón principal de los elevados periodos de vibración es la adopción de sistemas estructurales muy flexibles. Esta decisión es particularmente desafortunada si se considera que los movimientos sísmicos en la zona del lago tienen periodos dominantes elevados por lo que afectan particularmente a los edificios flexibles (ver Ref 3).

Por lo anterior los sistemas estructurales que conviene adoptar en edificios deben permitir en forma natural que se alcancen resistencias y rigideces elevadas ante cargas laterales. El marco es un sistema poco eficiente para tal efecto. Los muros de rigidez, los contravientos en distintas combinaciones y modalidades resultan mucho más ventajosos. Conviene, entonces, construcciones más robustas con abundancia de elementos rigidizantes distribuidos uniformemente de manera de transmitir a toda el área de la cimentación las fuerzas debidas a los efectos sísmicos.

Se ha señalado repetidamente que uno de los factores que contribuyeron más significativamente a la falla o mal

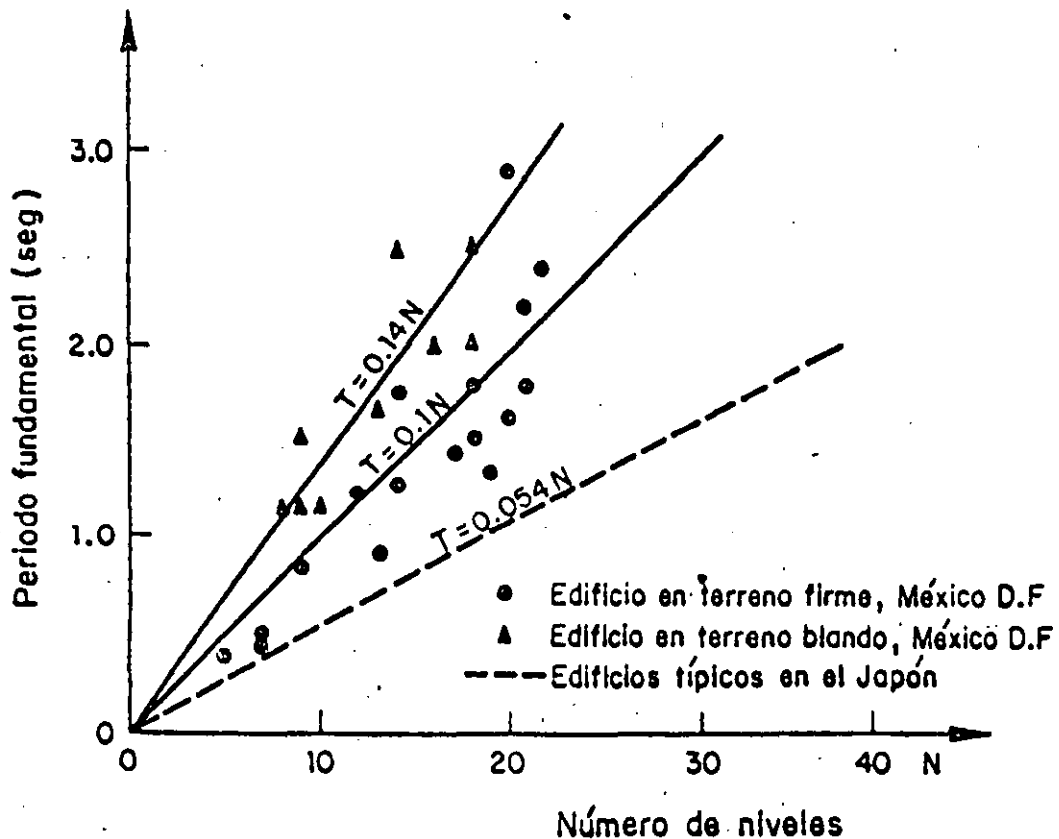
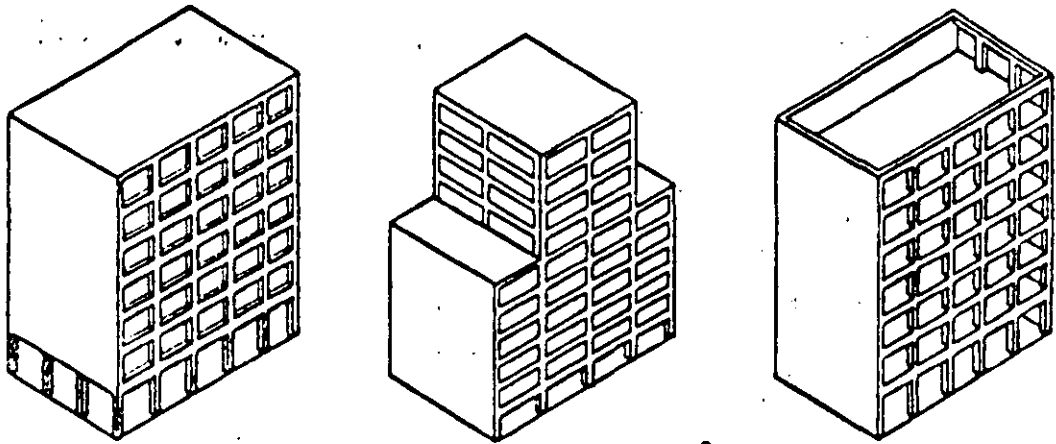


Fig 2. Relación de período fundamental contra número de pisos de edificios en distintas condiciones (de Ref 2)

comportamiento de los edificios fue la falta de regularidad del sistema estructural reflejada en formas irregulares en planta o en elevación del edificio, en asimetría en la disposición de los elementos resistentes, en cambios bruscos de rigidez y resistencia, en excesiva esbeltez o en discontinuidades en el flujo de fuerzas entre los elementos resistentes. Las ventajas de contar con estructuras regulares son indudables ya que se evitan las concentraciones y amplificaciones de sollicitaciones y el comportamiento sísmico es más sencillo y más fácil de entender, por lo cual el diseño puede hacerse con reglas más simples y más comprobadas. El Reglamento del Distrito Federal contiene ahora requisitos bien definidos para considerar una estructura como regular y poder adoptar así factores menos conservadores en el diseño. La Fig 3 muestra algunos casos de estructuras irregulares.

Merece un comentario especial el sistema de losa plana reticular. Desde mucho antes del sismo se había llamado la atención sobre el abuso que se estaba haciendo de este sistema, al emplearlo en construcciones cada vez de mayor altura y sin considerar adecuadamente la limitación de las deformaciones laterales ante efectos sísmicos, ni los problemas de resistencia al cortante en la losa alrededor de



- a) Planta baja débil b) Reducción brusca de rigidez y resistencia lateral c) Fuerte asimetría en planta, de rigidez y resistencia

Fig 3 Sistemas estructurales irregulares

la columna y en las columnas mismas. Las fallas espectaculares experimentadas por algunos edificios de este tipo han llevado a muchos proyectistas y constructores a la opinión de que el sistema debe proscribirse por ser inadecuado para resistir cargas laterales. La posición parece exagerada. La losa reticular ofrece un gran número de ventajas constructivas que pueden aprovecharse. Lo que es inadecuado es pretender resistir los efectos sísmicos en edificios de cierta altura, exclusivamente con la acción de marco que se forma entre las columnas y la losa. La resistencia a carga lateral debe ser proporcionada por muros de concreto o por elementos de rigidez y capacidad similar, dejando al sistema losa-columna la función de tomar las cargas verticales y una pequeña porción de las cargas laterales. La Fig 4 muestra esquemáticamente cómo podría combinarse una estructura de losa plana y columnas con un marco robusto de fachada que por su alta rigidez absorbería la casi totalidad de las fuerzas sísmicas. La ausencia de vigas en el interior del edificio mantendría las principales ventajas de la construcción con losa plana.

Un criterio de estructuración que debería promoverse también es que el edificio cuente con un núcleo robusto que proteja contra el colapso total de los entrepisos y la caída de las losas una sobre otra. Este mecanismo de falla fue el más catastrófico en el sismo de 1985 ya que fue responsable de la gran mayoría de las pérdidas de vidas

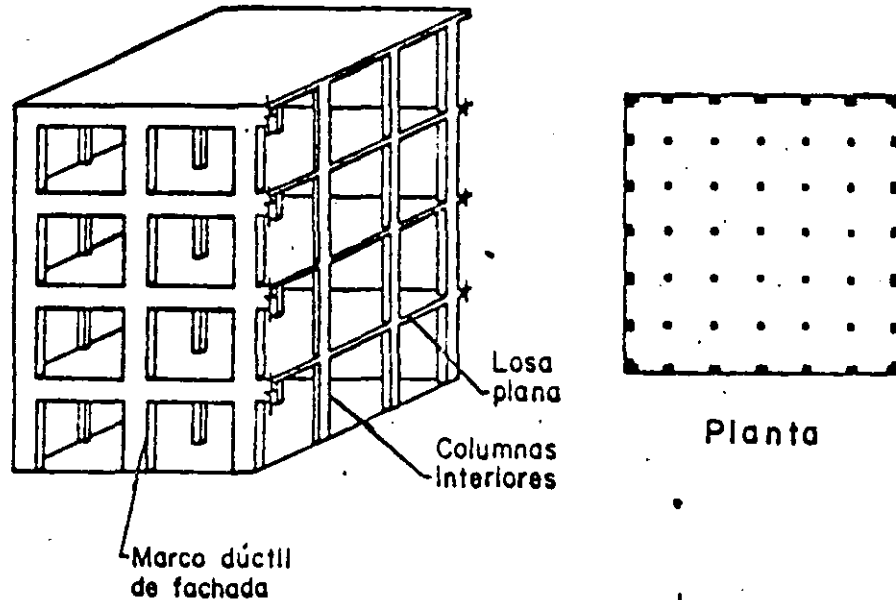


Fig 4 Edificio con marcos robustos de fachada y estructura interior de losa plana

humanas. La Fig 5 muestra un ejemplo. La existencia de un núcleo robusto central, como en la Fig 6 protegería contra este modo de falla a la vez que proporcionaría una ruta segura de escape a los ocupantes, al ser colocado alrededor de la zonas de escaleras.

Una limitante muy severa a la construcción de edificios de cierta altura en la zona de lago la constituye la gran deformabilidad del suelo. Hasta la fecha ninguno de los sistemas de cimentación empleados en la ciudad ha sido totalmente satisfactorio. La combinación de pilotes de fricción con cimentaciones compensadas, que ha sido la solución más común, da problemas de excesivas rotaciones de la base ante efectos sísmicos y en ocasiones de deformaciones permanentes. Los cimientos con pilotes de punta proporcionan un apoyo y empotramiento adecuados para cargas laterales, pero dan lugar a una emersión inaceptable del edificio debido al hundimiento regional del valle. Los pilotes de control han dado problemas por la inestabilidad del dispositivo de control.

Es necesario que se desarrollen e implanten sistemas de control más eficientes y seguros, ya que estos permiten la combinación de un apoyo del edificio en terreno firme y de evitar los hundimientos diferenciales.

Existe desde hace tiempo una polémica sobre la conveniencia de aprovechar el comportamiento inelástico del concreto

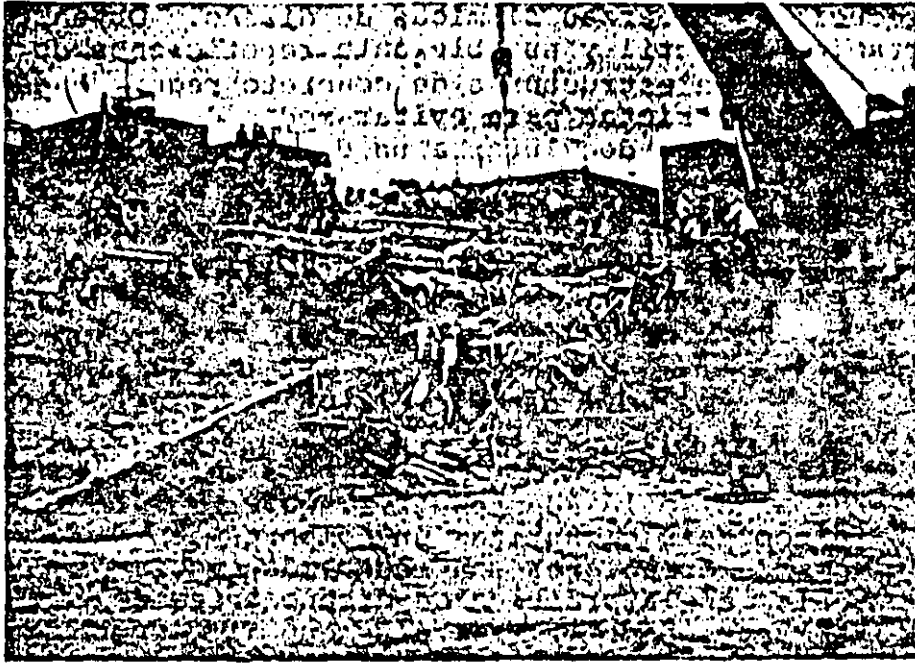


Fig 5 . Colapso total de entrepisos de un edificio de concreto

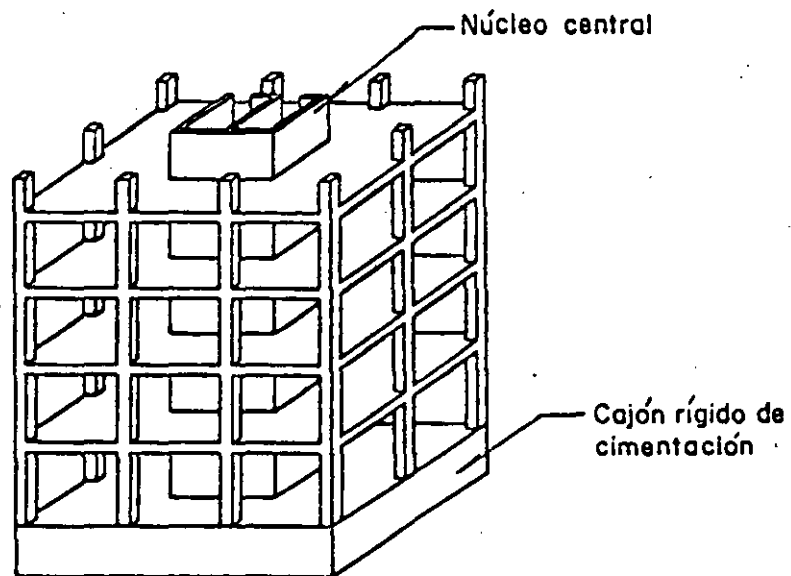
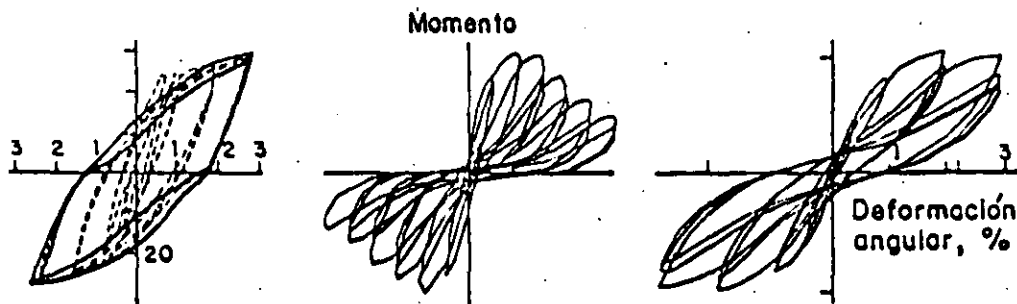


Fig 6 Estructura con núcleo central resistente

para reducir las fuerzas sísmicas de diseño. Obtener un comportamiento dúctil y estable ante repeticiones de ciclos de cargas en estructuras de concreto requiere de precauciones muy estrictas para evitar modos de falla que sean frágiles o que den lugar a un deterioro progresivo de la capacidad. La observación de los ciclos carga-deformación que se obtienen en ensayos de laboratorio muestra que en elementos sujetos a cargas axiales elevadas o en los que haya efectos importantes de cortante o de adherencia, el comportamiento se aleja mucho del elastoplástico, y tiende a deteriorarse.

En la Fig 7 se muestran las curvas carga-deformación ante ciclos de repetición de cargas para especímenes con diferente modo de falla. Se aprecia el deterioro notable cuando la carga axial o la adherencia rigen el comportamiento. Los requisitos para garantizar un comportamiento estable ante grandes deformaciones son mucho más estrictos que los que se seguían en la práctica de diseño antes de los sismos de 1985. Los cambios radicales que al respecto contienen las normas de concreto del Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal así lo reflejan. Algunos de los requisitos que conducen a modificaciones drásticas con respecto a la práctica que se tenía antes de 1985, son el del refuerzo por confinamiento en los extremos de columnas, como se aprecia en el ejemplo de la Fig 8, la longitud de desarrollo y el confinamiento del concreto y



- a) Falla por flexión
 b) Falla por flexo-compresión con carga axial elevada
 c) Falla por flexión con corrimiento de las barras por adherencia

Fig 7 Lazos carga-deformación de elementos de concreto con diferente modo de falla

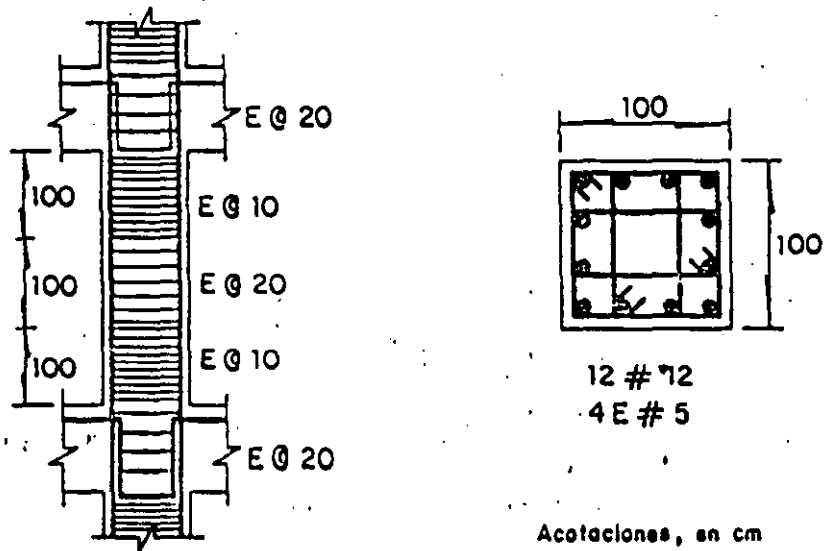


Fig 8. Ejemplo de refuerzo para columna de marco dúctil según requisitos de NTC de concreto del RDF87

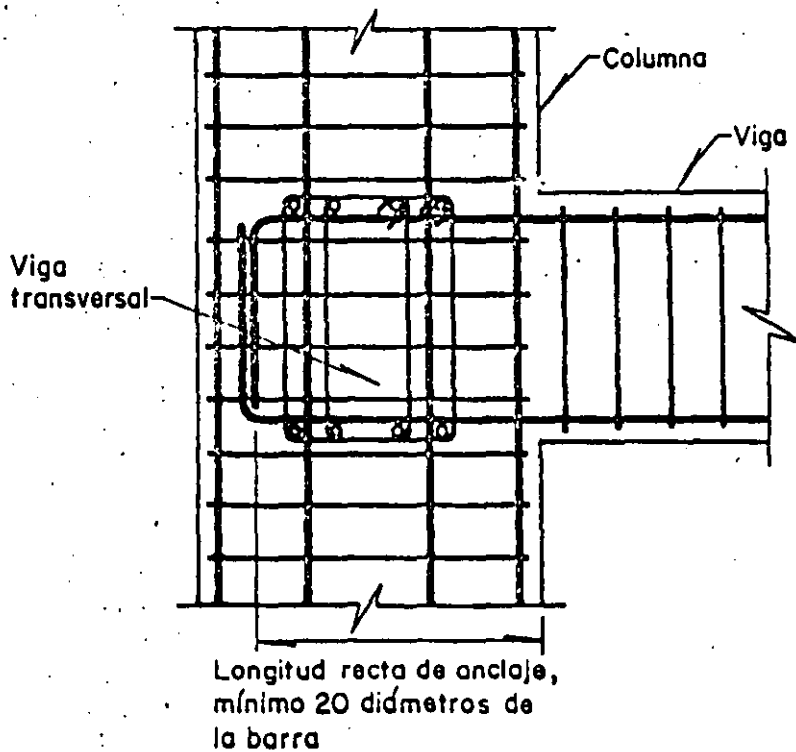


Fig 9. Ejemplo de unión viga-columna extrema según NTC del RDF87

el anclaje en las conexiones viga-columna, Fig 9, el confinamiento en los extremos de vigas, Fig 10 y el refuerzo transversal de las columnas en extremos de muros. La observancia de requisitos como los ilustrados en las figuras anteriores implica no solo un costo adicional por las cantidades de refuerzo que se requieren, sino un particular cuidado en la colocación del refuerzo y en el colado del concreto.

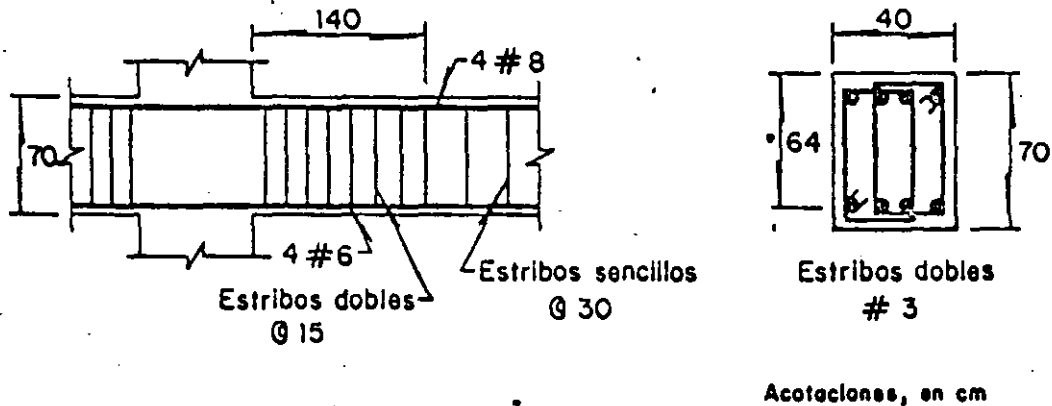
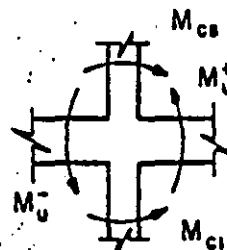
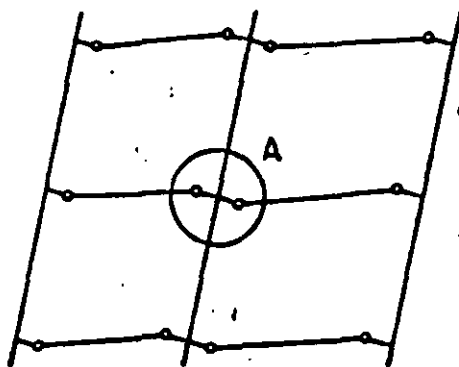


Fig 10. Ejemplo de refuerzo para extremo de viga de marco dúctil según requisitos de NTC de concreto del RDF87

Las precauciones para garantizar un comportamiento dúctil deben entenderse no como un medio para permitir grandes reducciones en las fuerzas sísmicas de diseño, sino como una protección contra el colapso de la estructura en caso de que las fuerzas sísmicas adquieran una intensidad excepcional. Un criterio de diseño que se ha estado propugnando desde hace algunos años para las estructuras de concreto en zonas sísmicas es una adaptación de métodos de diseño plástico de estructuras de concreto que se conoce en inglés como "capacity design". Se basa en la estrecha relación que existe en las estructuras de concreto entre la distribución de las fuerzas que se introducen en los distintos elementos estructurales y la forma en que estos se refuerzan y se detallan. Puede diseñarse la estructura de manera que, si el sismo alcanza intensidades excepcionales, esta sea capaz de disipar grandes cantidades de energía mediante el comportamiento inelástico de algunas zonas donde pueden desarrollarse grandes deformaciones sin problemas de falla frágil, mientras que el resto de la estructura se mantiene esencialmente elástico. Dado un sistema estructural, se elige el mecanismo de falla ante cargas laterales que se considera más apropiado para disipar energía y se diseñan las secciones que intervienen en

este mecanismo para que tengan la resistencia que corresponde a las cargas de diseño y se las detalla para un comportamiento dúctil. El resto de las secciones se diseña para capacidades superiores a las fuerzas que corresponden al mecanismo preseleccionado, de manera de asegurar de que no van a intervenir en el comportamiento inelástico.

De este criterio de diseño se han derivado el procedimiento de diseño que se prescribe para marcos dúctiles en las Normas de Concreto del Distrito Federal y de manera similar en las Normas del ACI. El procedimiento tiene como objetivo hacer que el comportamiento inelástico esté regido por un mecanismo de falla de "columnas fuertes-vigas débiles" como el que se ilustra en la Fig 11. Se trata que ocurra comportamiento inelástico solamente en los extremos de las vigas por la formación en ellas de articulaciones plásticas debidas a flexión. Se requiere detallar estas regiones para que sean capaces de desarrollar alta ductilidad y de diseñarlas para los momentos flexionantes que se obtienen del análisis sísmico. El diseño por cortante de las mismas vigas, el de las uniones viga-columna y el de las columnas por flexocompresión y cortante se hace con base en las fuerzas internas que se obtienen por equilibrio de los nudos cuando se alcanza el momento de fluencia en las secciones extremas de las vigas. Las Fig 12 y 13 ilustran esquemáticamente los procedimientos para la revisión de las vigas y de las columnas, respectivamente.



Detalle A

$$M_{cs} + M_{ci} = M_u^+ + M_u^-$$

- a) Mecanismo de falla de "columnas fuertes-vigas débiles"
- b) Relación entre los momentos en vigas y columnas

Fig 11. Mecanismo de falla postulado para marcos dúctiles

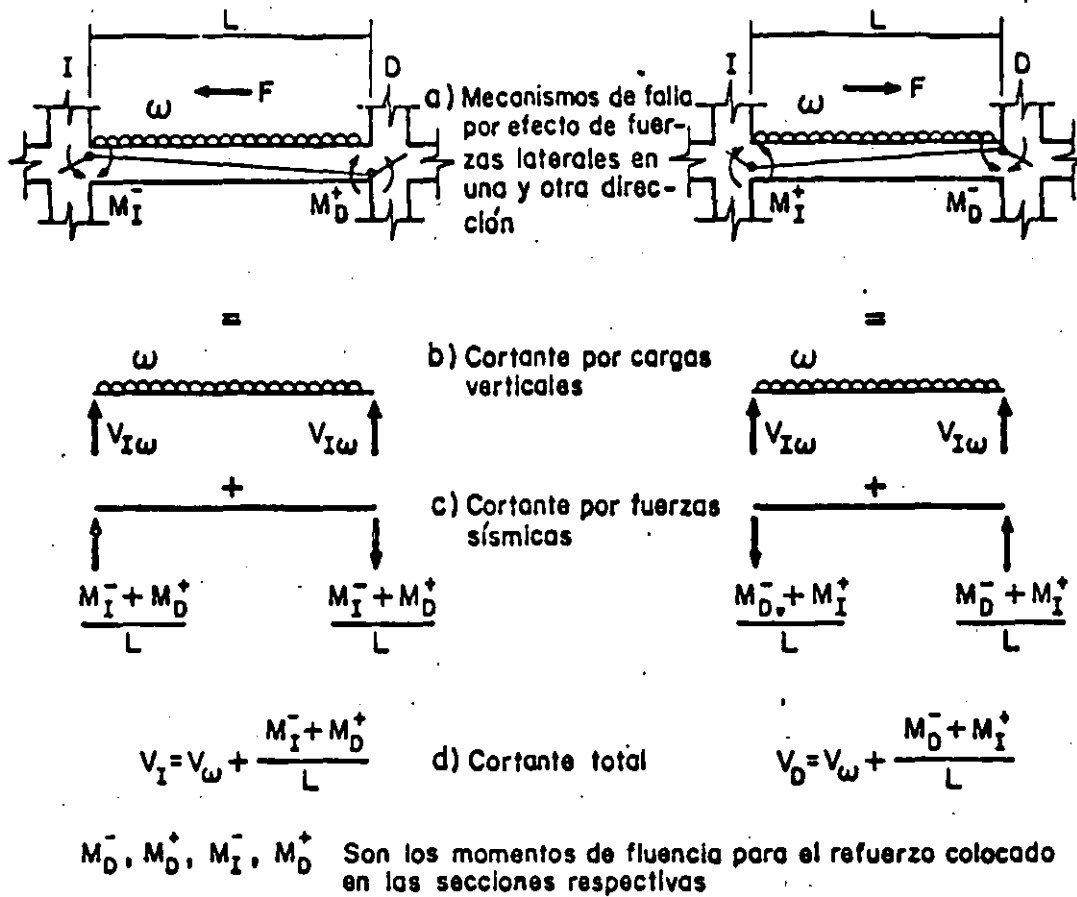


Fig 12. Determinación de las fuerzas cortantes de diseño para vigas de marcos dúctiles de concreto

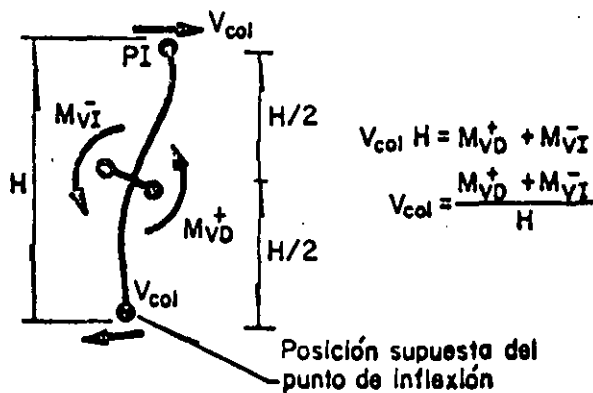


Fig 13. Fuerza cortante actuante en la columna, para el mecanismo de "columna fuerte-viga débil"

El nuevo Reglamento de Construcción para el Distrito Federal y las Normas correspondientes de concreto especifican el procedimiento anterior pero permiten un método opcional con el que tratan de lograr el mismo objetivo mediante la definición de factores de reducción de resistencia más

severos para los distintos elementos y modos de falla que no conviene intervengan en el comportamiento inelástico. Es deseable, sin embargo, que en estructuras importantes o con sistemas resistentes distintos de los convencionales, se identifiquen explícitamente los posibles modos de falla y se diseñe según el criterio anteriormente señalado.

La aplicación de los requisitos contenidos en los dos documentos mencionados va a ocasionar un cambio radical en la forma, las dimensiones, el refuerzo y el detallado de las estructuras de concreto en los edificios. Debe tenerse bien claro que los cambios van mucho más allá del mero incremento en los coeficientes sísmicos. La reducción en las deformaciones laterales permisibles, en los factores de comportamiento sísmico (Q) y en los factores de resistencia (F_R), así como una serie de requisitos mínimos para las dimensiones y para las cuantías de refuerzo longitudinal y transversal, van a redundar en incrementos sustanciales en la resistencia necesaria a cargas laterales. Estos van a influir en la modificación de los sistemas estructurales que sean económicamente más convenientes, así como en las alturas mismas de los edificios que se puedan construir.

Los Reglamentos no prohíben sistemas estructurales que son poco eficientes para resistir efectos sísmicos ni recomiendan explícitamente los que sí lo son. Desalientan el uso de los primeros exigiendo el empleo de métodos de diseño más refinados y de factores de seguridad más elevados que inciden en la economía de cada solución estructural. El diseñador no debe forzar las soluciones a entrar en los límites permitidos por el Reglamento. Debe pugnar por la adopción de un sistema estructural sano que proporcione defensas claras ante los efectos sísmicos y cuya seguridad se puede comprobar mediante métodos aproximados y sencillos.

Referencias

1. Mendoza C.J. y M. Mena F. "Influencia de los agregados en los concretos estructurales del D.F." Revista IMCYC, vol 25 No 192, may 1987, p 9 a 20
2. Rodríguez Cuevas N. "Análisis experimental de vibraciones en edificios" Instituto de Ingeniería, Informe interno, ene 1987
3. Meli, R. y J.A. Avila "The 1985 Mexico Earthquake, Analysis of Buildings' Response" Earthquake Spectra, vol 5, No 1, feb 1989, p 1 a 18.



**FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA**

XX CURSO INTERNACIONAL DE INGENIERIA SISMICA

MODULO III: DISEÑO SISMICO DE EDIFICIOS

DISEÑO SISMICO DE EDIFICIOS DE CONCRETO PRESFORZADO

DISEÑO SISMICO DE ESTRUCTURAS DE CONCRETO PRESFORZADO

M. EN I. JOSE LUIS CAMBA CASTAÑEDA

1.- INTRODUCCION.

La aplicación del presfuerzo en estructuras de concreto ha tenido un incremento importante en los últimos años, debido a las ventajas que presenta sobre el concreto reforzado principalmente en lo referente a escuadrias, a un mejor control de las deformaciones y el agrietamiento en el estado límite de servicio, bajo el efecto de cargas gravitacionales.

Sin embargo, la utilización del concreto presforzado para resistir efectos sísmicos es menos aceptada. Esto se debe principalmente a que se tiene poca información al respecto y a que comparativamente, con estructuras de concreto reforzado se observa cierto temor debido a que el primero tiene menor capacidad para disipar energía y por tratarse de un material menos dúctil que el concreto reforzado. En las presentes notas se comentan algunos detalles del comportamiento de miembros presforzados bajo cargas monótonicas y dinámicas, así como el detalle de conexiones y algunos lineamientos de reglamentos de construcción referentes al concreto presforzado.

2.- COMPORTAMIENTO DE TRABES PRESFORZADAS EN FLEXION.

2.1.- Concepto acción respuesta.

2.2.- Diagramas carga-deflexión.

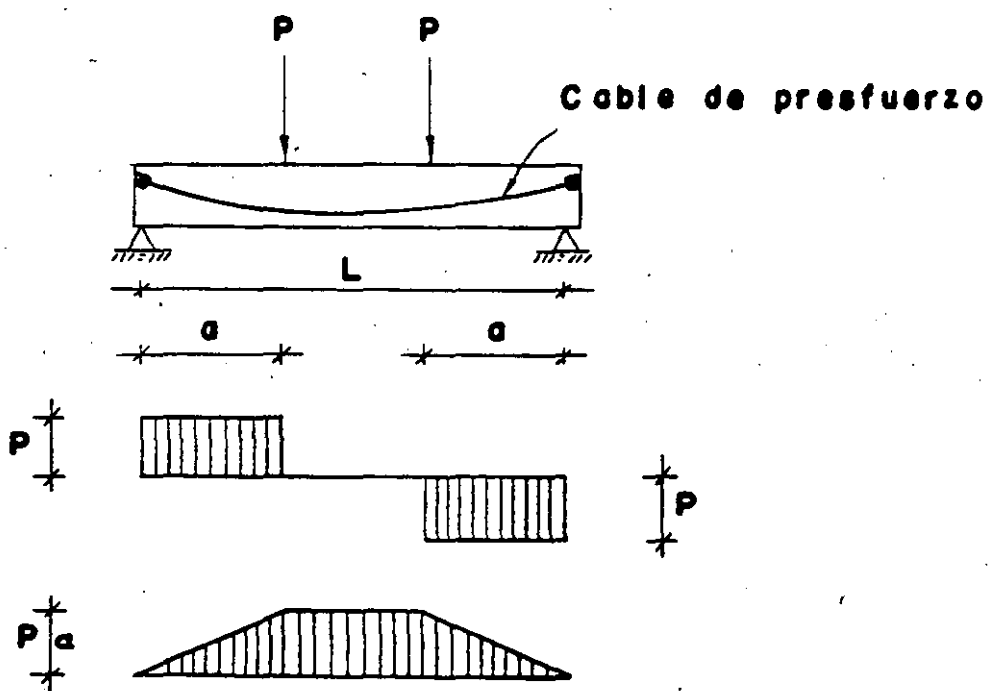
2.3.- Variables que intervienen en el comportamiento de trabes presforzadas.

2.4.- Estado límite de Falla.

2.- COMPORTAMIENTO DE TRABES DE CONCRETO PRESFORZADO EN FLEXION

2.1.- Introducción

La característica acción-respuesta en traves presforzadas se presenta, como en la mayor parte de los ensayos en flexión, mediante la gráfica carga-deflexión, de traves libremente apoyadas con dos cargas concentradas iguales y colocadas simétricamente, esto último con objeto de que en la zona central sea nula la fuerza cortante (fig. 1).



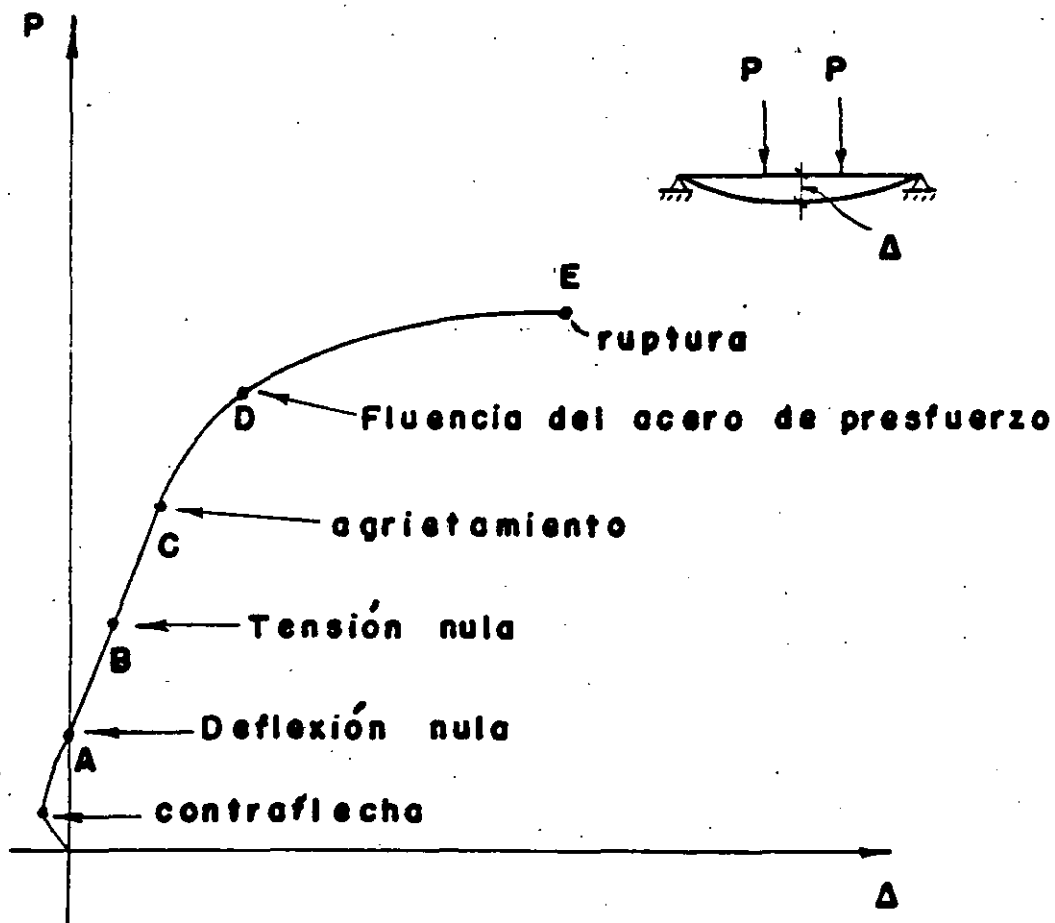
ANALISIS DE FLEXION

— F I G . 1 —

En las presentes notas se estudiará la gráfica típica carga-deflexión para traveses presforzadas y posteriormente la influencia de ciertas variables en el comportamiento de las mismas.

2.2.- Diagrama carga-deflexión

Una trabe presforzada con presfuerzo excéntrico y con un porcentaje de acero de presfuerzo usual en la práctica, tiene una curva carga deflexión como lo muestra la fig. 2.



CURVA CARGA — DEFLEXION

Al empezar a cargar la pieza, su comportamiento es básicamente lineal, habiendo proporcionalidad entre cargas y deflexiones. La gráfica indica un valor negativo para las flechas debido a que bajo el efecto del presfuerzo, el peso propio no es suficiente para contrarestar el valor de la flecha debido al de presfuerzo, resultando una contraflecha en la misma.

El punto A de la gráfica representa el punto de deflexión nula, que indica una distribución uniforme de esfuerzos en la sección.

Al seguir incrementando la carga, se llega al punto B, que significa el punto de tensión nula en la parte inferior.

El punto C, representa la aparición de la primera grieta, el cual indica que el concreto alcanzó el valor de su resistencia al agrietamiento.

Cuando empiezan a aparecer las grietas, las deflexiones aumentarán mas rapidamente que antes del agrietamiento y por consiguiente ya no habrá una proporcionalidad entre cargas y deformaciones, al seguir incrementando la carga mas allá del punto C.

El punto D, representa al valor de la carga que provoca la fluencia del acero de presfuerzo.

Finalmente, el punto E, representa la carga de ruptura que provoca la falla al alcanzar su resistencia.

Conociendo la curva carga-deflexión, se puede dimensionar una trabe de concreto presforzado.

Es importante señalar que la aplicación de cargas en trabes de concreto presforzado se hace generalmente en dos o tres etapas de carga. Para una estructura colada in situ habrá la

primera etapa el aplicarse el presfuerzo interviniendo también la carga permanente y la segunda etapa con las cargas de servicio. En el caso de elementos prefabricados, habrá una etapa adicional, anterior a las dos mencionadas que será solamente su peso propio y el presfuerzo, durante el transporte.

En general, la etapa crítica de carga en elementos presforzados es la que ocurre al tensar, ya que se tiene el va-
lor de la fuerza máxima de presfuerzo por un lado y el con-
creto es relativamente joven, la cual significa un "test"
para el elemento en cuestión.

2.3.- Variables que intervienen en el comportamiento de traves presforzadas.

a) Si se incrementa el acero de presfuerzo en una trabe, aumentará también el valor del momento resistente, pero se perderá ductilidad.

b) Las traves con presfuerzo adherido, caso del pretensado y también del postensado cuando se inyectan los cables, de acuerdo con los ensayos del laboratorio y la experiencia en la práctica, son mas dúctiles que sus equivalentes no adheridas.

c) El refuerzo no presforzado en tensión incrementa la capacidad resistente de momento, pero la trabe se hace menos dúctil. La presencia de dicho refuerzo la hace mas estable en la ruptura.

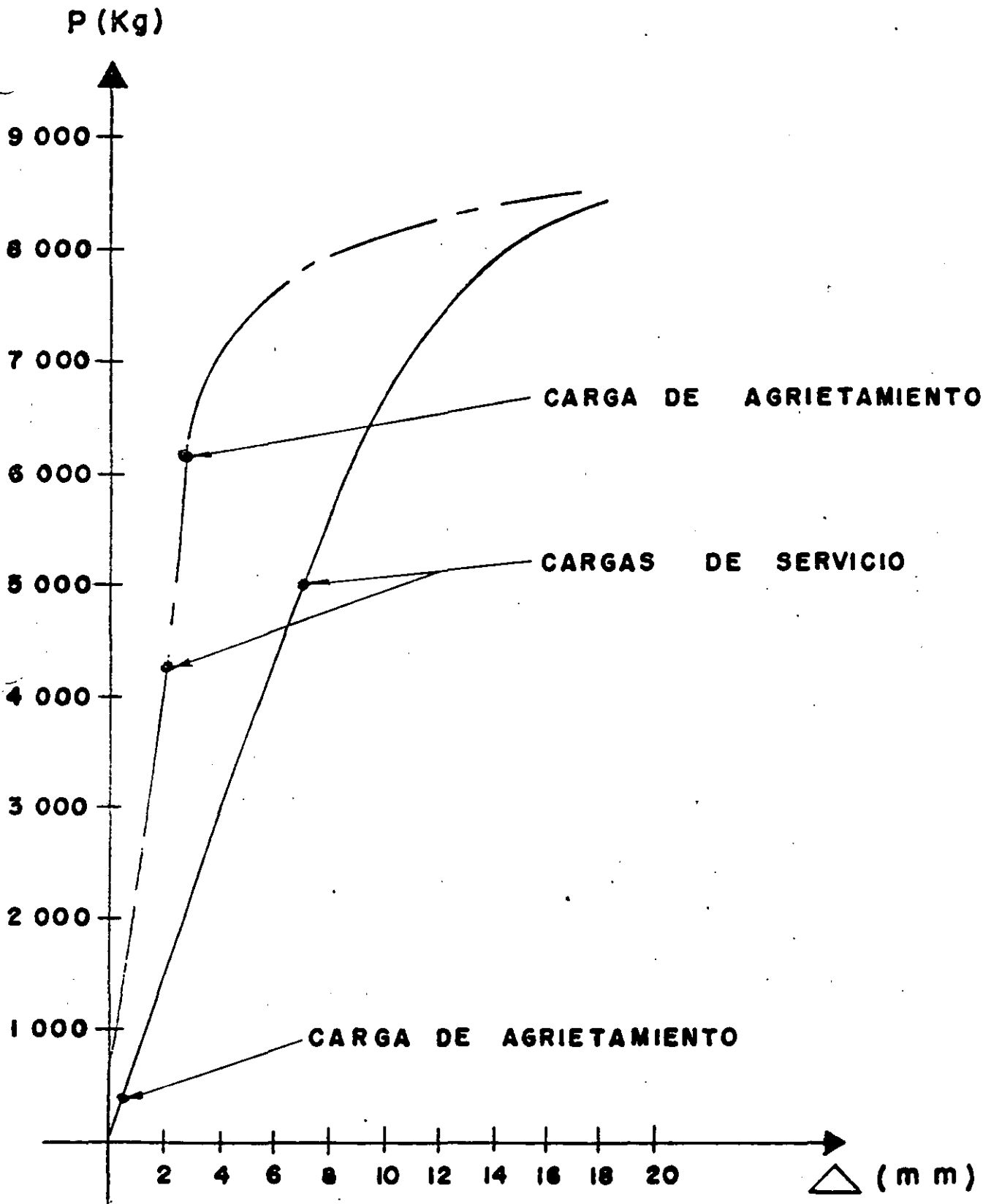
d) El refuerzo no presforzado en compresión no incrementa la capacidad de momento de una sección subreforzada pero la trabe se hace mas dúctil.

e) El comportamiento de una trabe depende de los diagramas esfuerzo - deformación de los materiales.

La idealización del diagrama esfuerzo -deformación del concreto en compresión, tiene poca influencia en el comportamiento de la trabe; en cambio el diagrama $f_s - \epsilon_s$ para el acero de presfuerzo influye en el valor del momento resistente de la trabe y en la ductilidad de la misma.

En la figura 3 se muestra la gráfica acción-respuesta de un ensaye típico de flexión de dos trabes de concreto con sección rectangular de 15 x 30 cm y de 3 m de claro. Una es presforzada y la otra reforzada, proporcionando el acero de presfuerzo y de refuerzo respectivamente en tal forma que la carga teórica de falla en ambas trabes fuera la misma y en las figuras 4 y 5 los agrietamientos correspondientes.

En las figuras 6, 7 y 8 se muestran las condiciones en la falla, de vigas presforzadas y en la fig. 9 el caso de una columna presforzada, aun cuando este último se presenta en la práctica muy pocas veces.



———— Trabe de concreto reforzado

- - - - - Trabe de concreto presforzado

GRAFICA CARGA — DEFLEXION

AGRIETAMIENTO TRABE DE CONCRETO PRESFORZADO

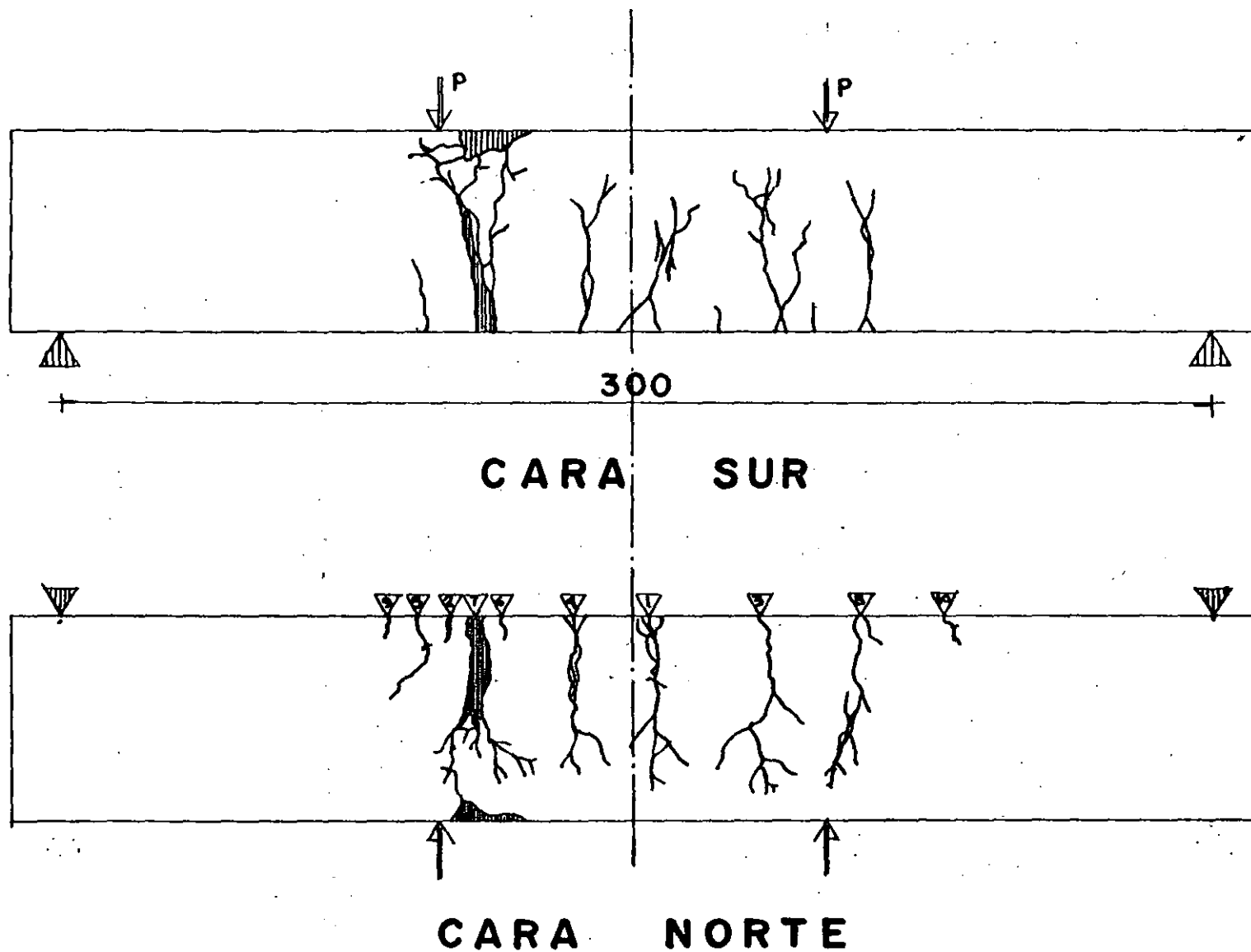


FIG. 4

AGRIETAMIENTO TRABE DE CONCRETO REFORZADO

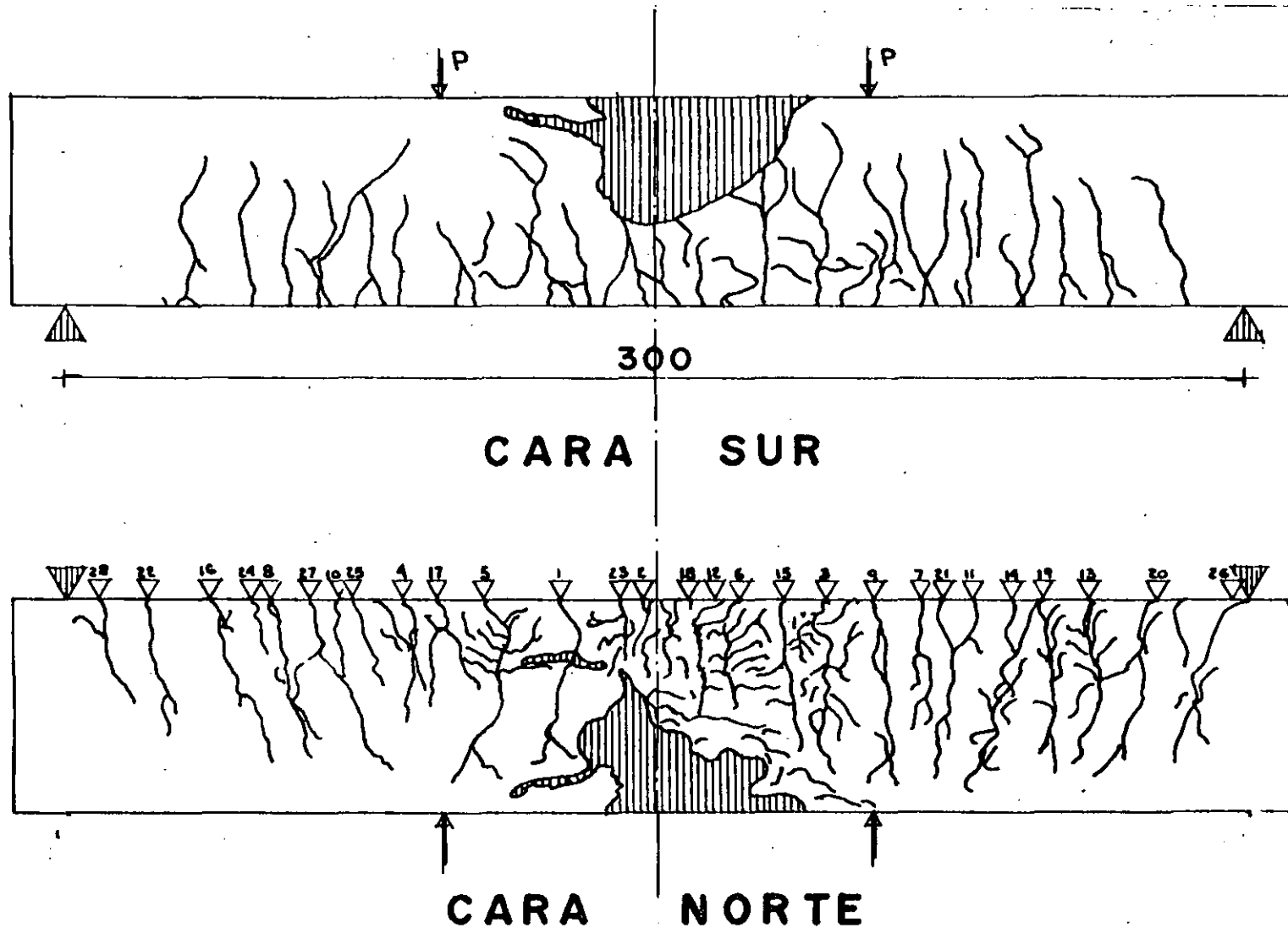
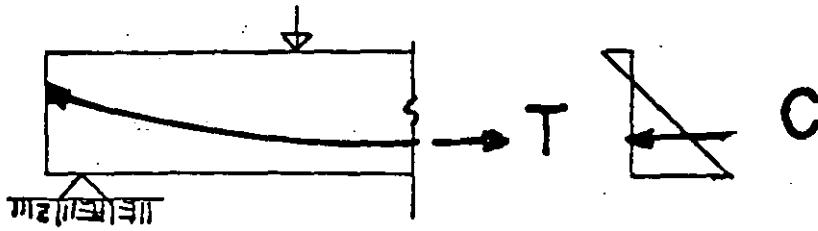


FIG. 5

ESTADO LIMITE DE FALLA

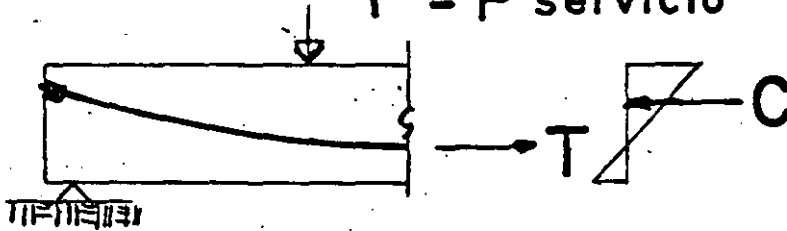
- Presfuerzo solamente

$$P=0$$



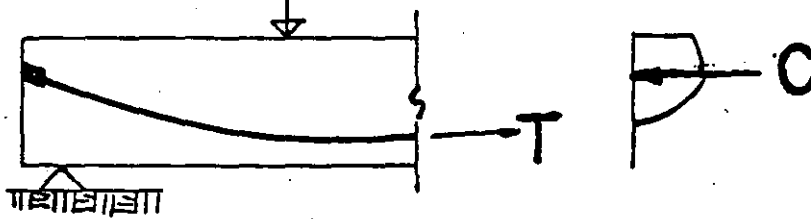
b) En servicio

$$P = P_{\text{servicio}}$$



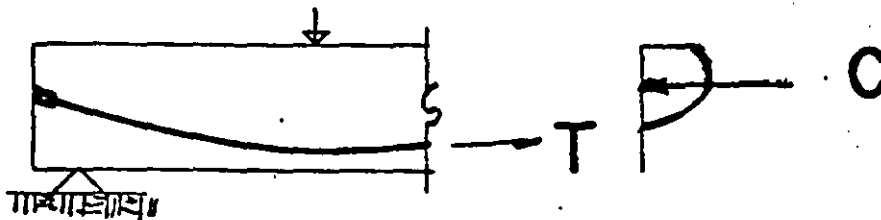
c) Al presentarse el agrietamiento

$$P > P_{\text{servicio}}$$

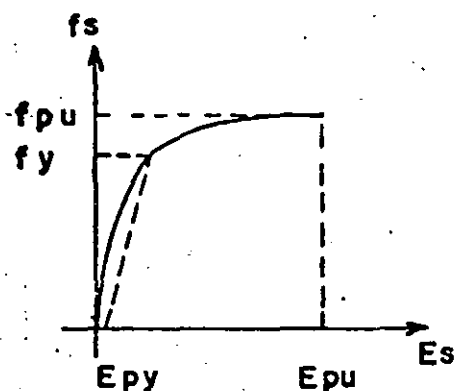


d) En la falla

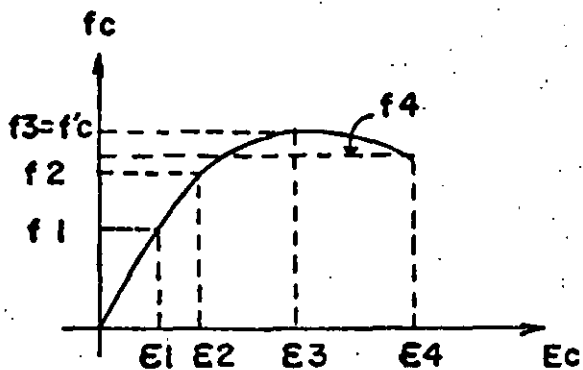
$$P = P_u$$



ESTADO LIMITE DE FALLA

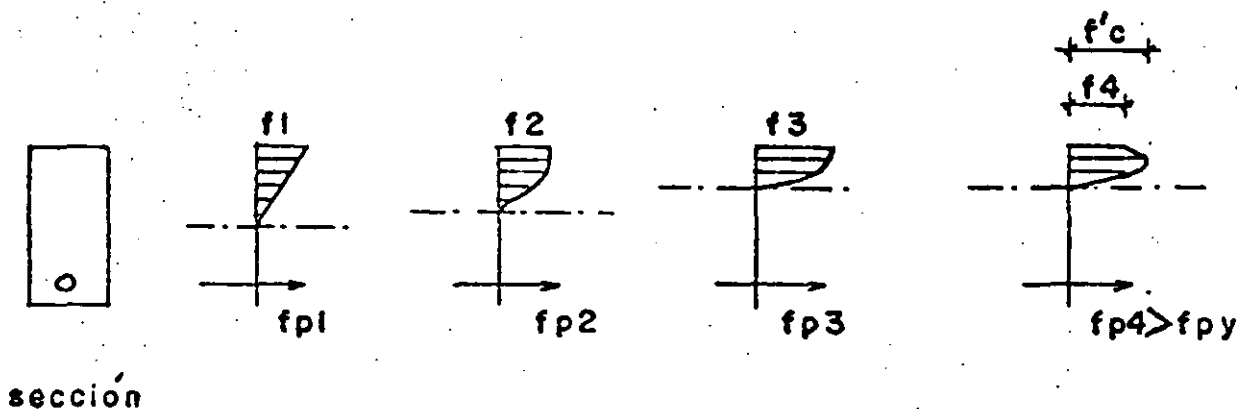


Acero de presfuerzo



Concreto

a) Trabe subreforzada



b) Trabe sobrerreforzada

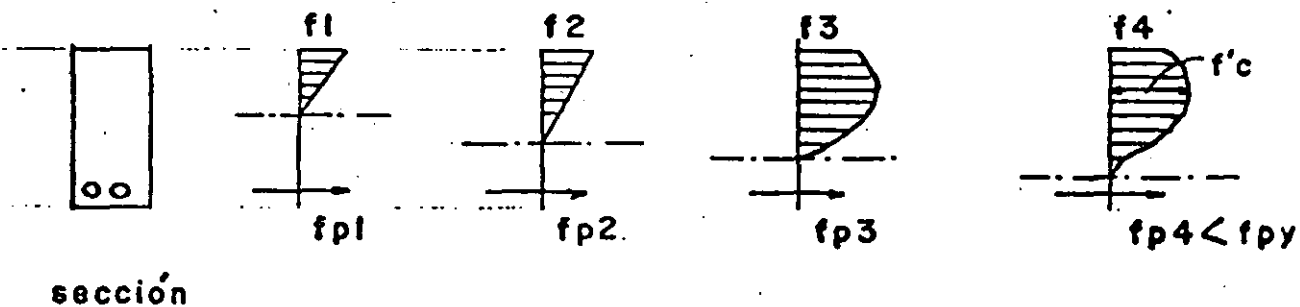
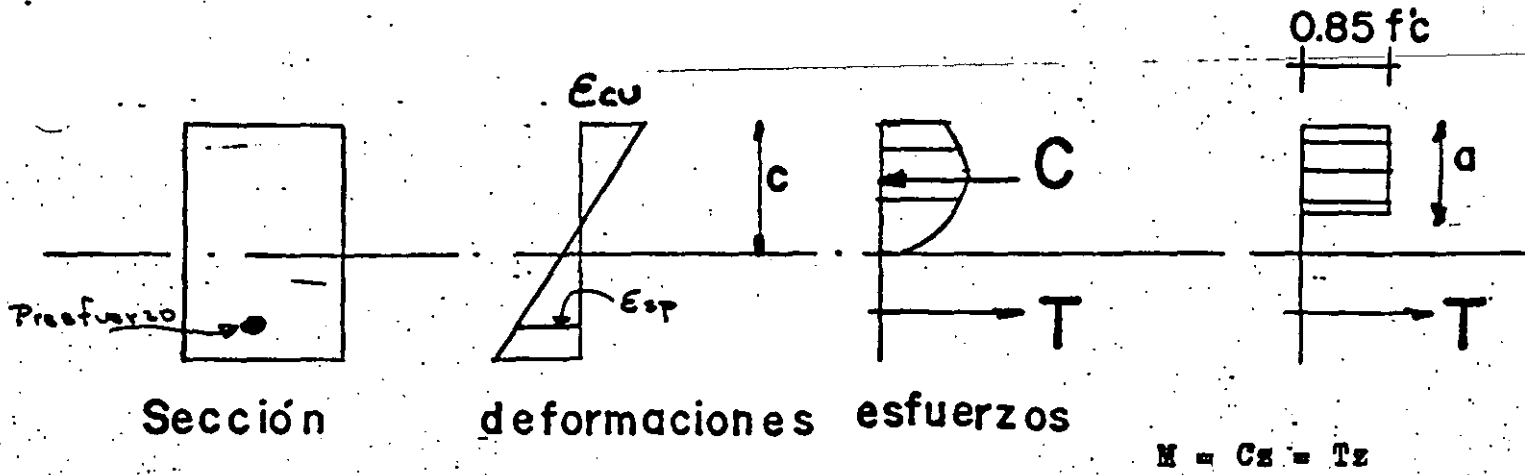


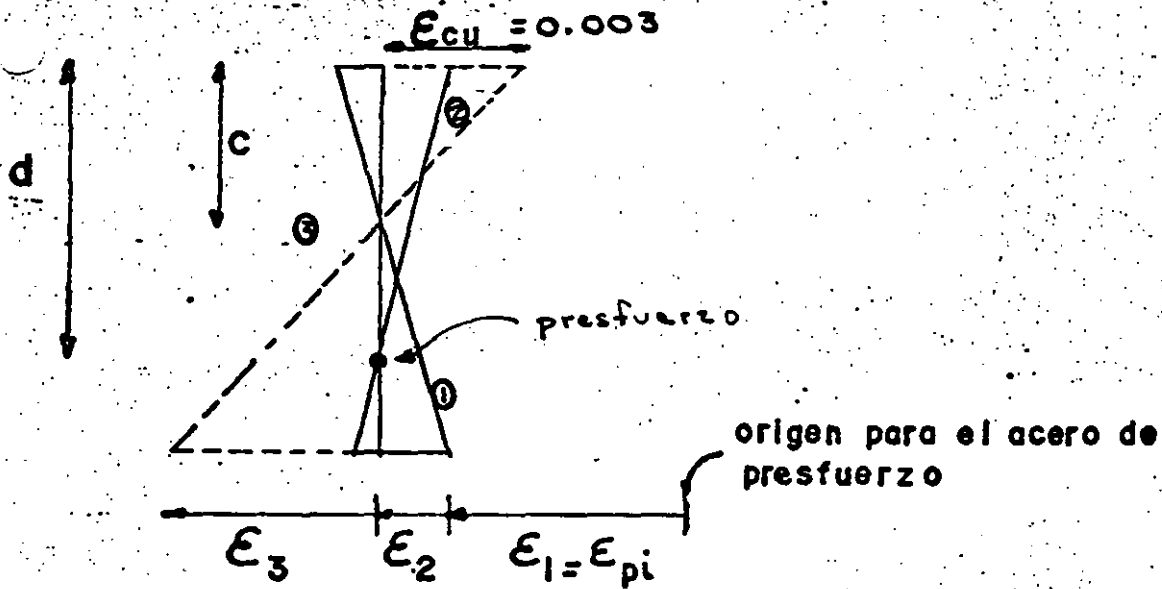
FIG. 7

ESTADO LIMITE DE FALLA



a).- Hipótesis

origen para el concreto



b).- Diagrama de deformaciones

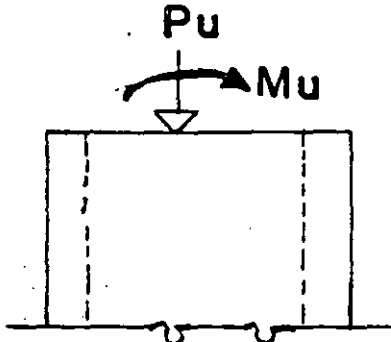
— FIG. 3 —

COLUMNAS P¹⁹RESFORZADAS

a).- Sección



b).- Elevación.



c).- Deformaciones bajo carga axial uniforme

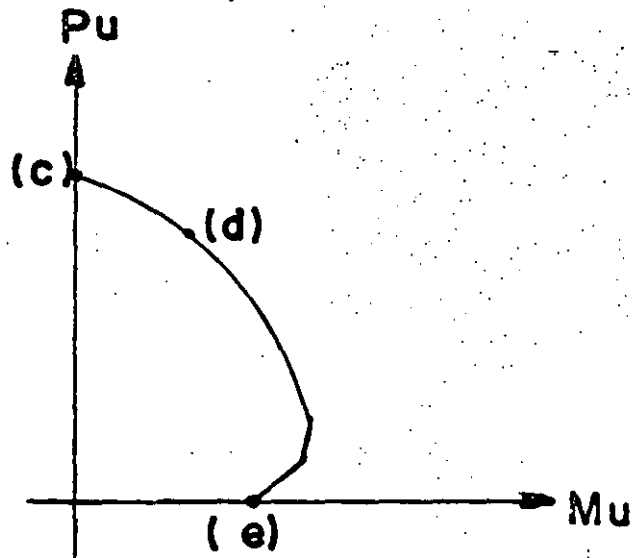
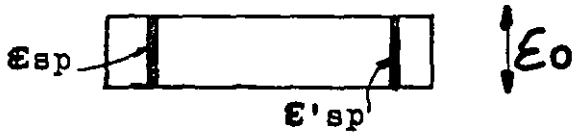
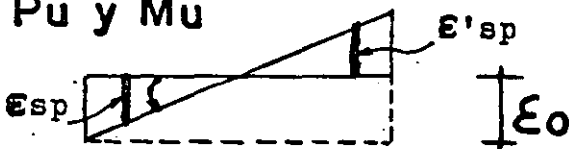
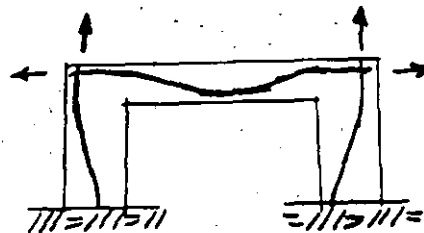
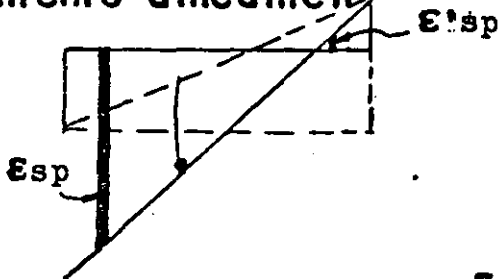


Diagrama típico de interacción

d).- Deformaciones bajo Pu y Mu



e).- Deformaciones debidas a momento únicamente



3.- DUCTILIDAD DE MIEMBROS DE CONCRETO PRESFORZADO.

3.1.- Resumen histórico.

3.2.- Análisis de miembros presforzados en flexión.

3.3.- Amortiguamientos.

3.- DUCTILIDAD DE MIEMBROS DE CONCRETO PRESFORZADO.

3.1 Resumen histórico de estudios realizados. Es conocido que un análisis dinámico de la respuesta elástica de estructuras usando aceleraciones sísmicas, ponen de manifiesto que una estructura puede estar sujeta a cargas mayores que las especificadas por reglamentos, lo cual implica que una estructura debe ser capaz de desarrollar grandes deformaciones antes de llegar a la falla en caso de sismos severos. Por tanto, es importante conocer la ductilidad que puede obtenerse en miembros de concreto presforzado.

La relación momento-curvatura para concreto presforzado bajo cargas monotónicas y cíclicas, permite comprender la ductilidad y la energía de disipación.

T.Y. Lin (1) presentó algunos aspectos importantes para el diseño sísmico de estructuras presforzadas, referentes a los factores de carga y esfuerzos permisibles así como algunos ensayos estudiando la capacidad de absorber energía, concluyendo Lin en su artículo en que los diagramas Momento-Curvatura en vigas de concreto presforzado en flexión se presentaban áreas importantes

que mostraban alta capacidad para absorber energía.

Rosenblueth (2) comentando el artículo de Lin, enfatizaba el inconveniente de establecer conclusiones basadas en la curva de primera carga, indicando la importancia de las curvas idealizadas carga-deformación en la descarga Fig.1, para miembros de concreto presforzado y miembros de concreto reforzado presentaban que para masas y rigideces comparables una estructura de concreto presforzado tendría probablemente mayores deformaciones debido a su baja capacidad de amortiguamiento que una de concreto reforzado y que así mismo sería más flexible la primera, lo cual contrarrestaría en parte el efecto de su baja capacidad para absorber energía.

Despeyroux (3) concluye que las áreas bajo el diagrama Momento-Curvatura en concreto presforzado y reforzado son comparables y no necesariamente menores las de concreto presforzado, pero que un factor importante que afecta la respuesta sísmica de estructura es su capacidad para disipar energía, En su artículo, de acuerdo con la Fig.2 concluye que la energía absorbida es efectivamente comparable en miembros de concreto presforzado y reforzado pero que la energía disipada es bastante menor en los miembros de concreto presforzado, lo cual representará que la respuesta en estos últimos bajo el sismo será mayor.

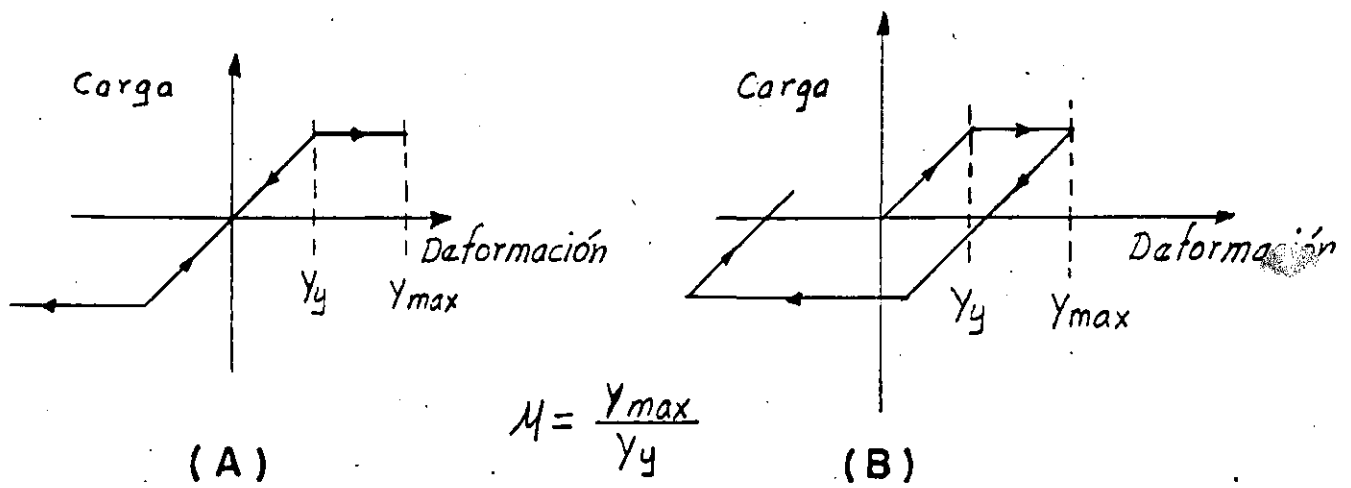


Fig. 1 Idealización de curvas típicas carga-deformación

A) concreto presforzado

B) concreto reforzado

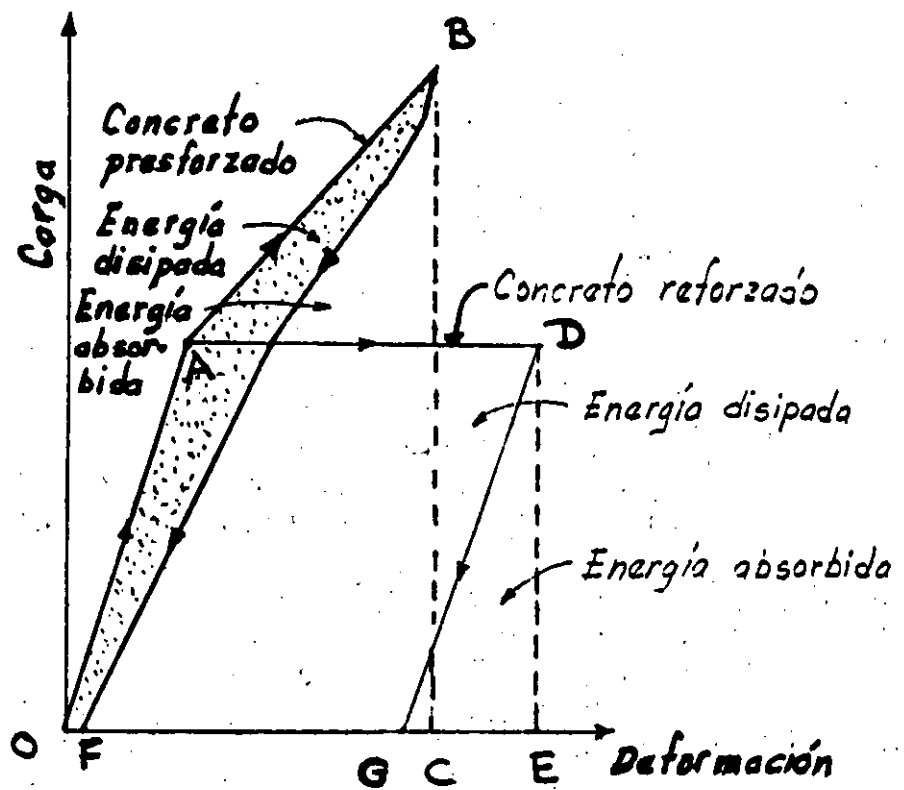


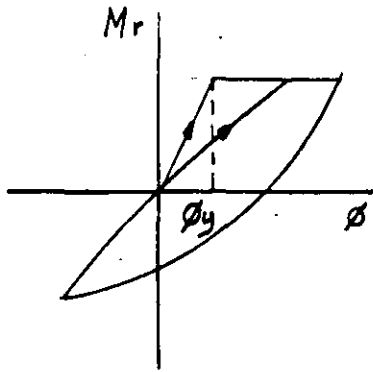
Fig. 2 Idealización de curvas típicas de disipación de energía.

Un estudio reciente realizado por Blakeley (4) sobre la respuesta dinámica no lineal de sistemas de concreto presforzado - concluyó que el desplazamiento máximo obtenido es del orden de - 40% mayor que el de un sistema de concreto reforzado con misma - resistencia, rigidez inicial y mismo porcentaje de amortiguamiento viscoso.

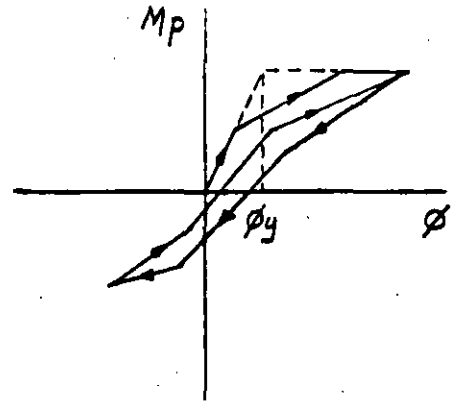
Thompson (5) hizo un estudio comparando las respuestas de - miembros presforzados, parcialmente presforzados y reforzados - bajo diversos movimientos sísmicos, idealizando los diagramas - Momento-Curvatura como lo indica la Fig. 3 y tomando los registros del sismo de El Centro 1940, N-S.

El factor de ductilidad se define como la relación que existe entre el desplazamiento en la falla y el desplazamiento correspondiente a la primera fluencia. Thompson encontró que para pequeños períodos el factor de ductilidad era mayor y que la tendencia a disminuir el desplazamiento se debía a un incremento en el acero de presfuerzo.

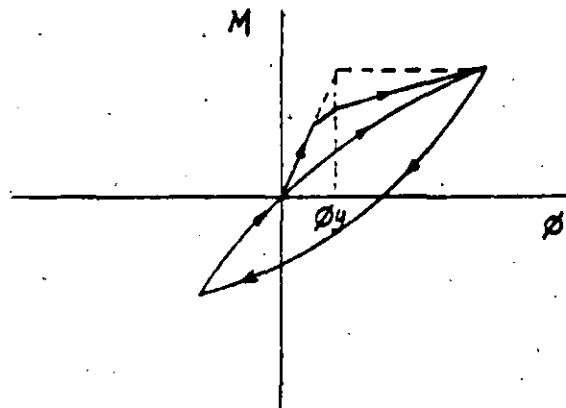
3.2 Análisis de miembros presforzados en flexión. Los estudios realizados por Blakeley (4) para determinar las relaciones Momento-Curvatura bajo carga monotónica, demostraron que la curva ob-



a) Concreto reforzado



b) Concreto prestorizado



c) Concreto parcialmente prestorizado

Fig. 3 Diagramas idealizados de Momento Curvatura

tenida para este tipo de carga es colineal con la curva envolvente de cargas cíclicas en miembros de concreto presforzado y que por lo tanto este análisis puede efectuarse para el estudio de la ductilidad bajo cargas sísmicas.

Se realizaron ensayos para obtener diagramas Momento-Curvatura en traveses haciendo variar el valor de la fuerza de presfuerzo, las posiciones del mismo en la sección y la cantidad de refuerzo transversal.

Así mismo, Thompson (5) realizó ensayos en uniones presforzadas viga-columna, reforzando el núcleo de acuerdo con las especificaciones de cortante del ACI 318-71. Las columnas se diseñaron de tal forma que tuvieran una mayor resistencia que las vigas y los ensayos se hicieron con carga cíclica estática simulando la carga sísmica.

Los resultados obtenidos por los estudios mencionados (4) y (5) se resumen a continuación:

a) Porcentaje del acero de presfuerzo.

El efecto de la relación entre el área de acero de presfuerzo y la de concreto, $p = A_s/bh$, se muestra en la Fig. 4. La forma de las curvas indican claramente que a un incremento de capacidad de momento corresponde una disminución de ductilidad. El --

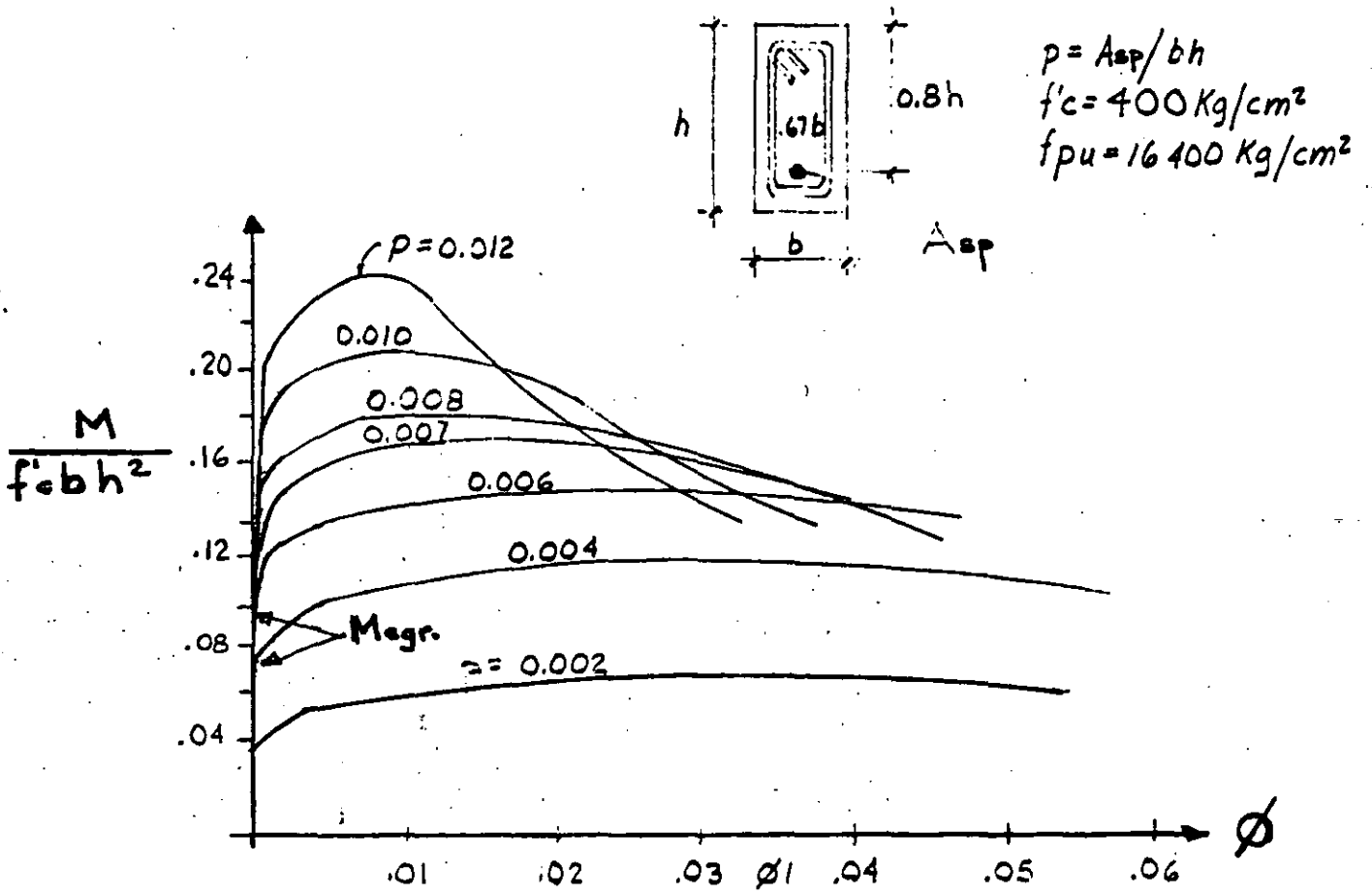


Fig. 4 Relaciones momento-curvatura para una sección con diferentes cantidades de presfuerzo excéntrico

ACI 318-71, especificaba que la máxima cantidad de acero de presfuerzo que debe tener una trabe para prevenir una falla frágil es:

$$\frac{f_{sp} A_{sp}}{b d f'c} \leq 0.3 \quad (1)$$

Este límite corresponde a $p = 0.0069$. El estudio de las curvas de la Fig.4 , indica que para asegurar una ductilidad razonable en diseño sísmico, Blakeley y Thompson recomiendan disminuir la expresión a 0.2, lo cual conduciría a $p=0.0043$. La ecuación (1) significa que la máxima fuerza de tensión es $0.2 f'c b d$, lo cual implica que en el bloque de esfuerzos en una sección rectangular se tendrá:

$$a = \frac{0.2 f'c b d}{0.85 f'c b} = 0.235 d$$

y si

$d = 0.85h$, la condición queda como:

$$a \leq 0.20h$$

b) Distribución del acero de presfuerzo.

En una sección transversal de una trabe se hizo variar el número y la posición en los cables de presfuerzo, permaneciendo constante la fuerza total de presfuerzo, $p = 0.0069$ -

Así mismo, se observó que si se aumenta el acero de presfuerzo en la zona de compresión, la curvatura no disminuye, debido a que el cable de presfuerzo actúa como acero de compresión en curvaturas grandes. Cuando el acero de presfuerzo se concentra en un solo cable centrado hay una pérdida considerable de capacidad de momento para grandes curvaturas. En cambio solo existe una pequeña diferencia entre dos o más cables. Por tanto, se recomienda que el acero de presfuerzo se distribuya en dos o más posiciones por efecto de ductilidad.

c) Efecto del refuerzo transversal.

En los ensayos realizados, la cantidad de refuerzo transversal tuvo poco efecto en la ductilidad de trabes, ya que triplicando el número de estribos normalmente especificado se logró un incremento relativamente pequeño en la capacidad de momento.

d) Ductilidad en columnas de concreto presforzado.

En los ensayos de columnas bajo cargas cíclicas, las curvas experimentales se trazaron para una articulación plástica

directamente sobre la trabe, provocándose así el mecanismo en un marco de un nivel. El diagrama Momento-Curvatura en la columna de concreto presforzado se reduce con un nivel de carga axial y se requiere un refuerzo transversal especial cuando la carga alcanza valores de $0.1 P_o$, siendo P_o la resistencia de la columna con carga axial concéntrica únicamente. Hay poco conocimiento del comportamiento de acero presforzado de miembros a compresión, sin embargo de los estudios realizados se pudo concluir que en las curvas de Momento-Curvaturas, la correspondiente a $p/f'cbd = 0.12$, corresponde a la máxima curvatura obtenida en los ensayos.

3.3- Amortiguamiento de miembros de concreto presforzado. En la referencia (2), se menciona la relativamente baja capacidad de amortiguamiento en estructuras presforzadas.

Depeyroux (3) hace notar que el amortiguamiento del concreto presforzado es comparable al de las estructuras metálicas, es decir del orden del 3% del crítico. En cambio en concreto reforzado es del orden 10% del crítico. Nakano (6) encontró valores mayores del 7% del crítico para estructuras presforzadas.

Esto significaría que deberán tomarse coeficientes sísmicos mayores para estructuras de concreto presforzado, por

ejemplo del orden de 20% mayores que los aplicados al concreto reforzado.

Una investigación reciente de Penzien (7) sobre el amortiguamiento en trabes de concreto presforzado, mostraron que el presfuerzo y la resistencia del concreto tienen efecto sobre el amortiguamiento solo cuando se aproximaba al momento del colapso.

Sin embargo el efecto desfavorable del concreto presforzado referente a su baja capacidad de amortiguamiento que se traduce en desplazamientos mayores, se contrarresta en parte por el hecho de que las estructuras de concreto presforzado debido a sus menores escuadrias que en el concreto reforzado, requieren una reducción en la demanda de ductilidad (8).

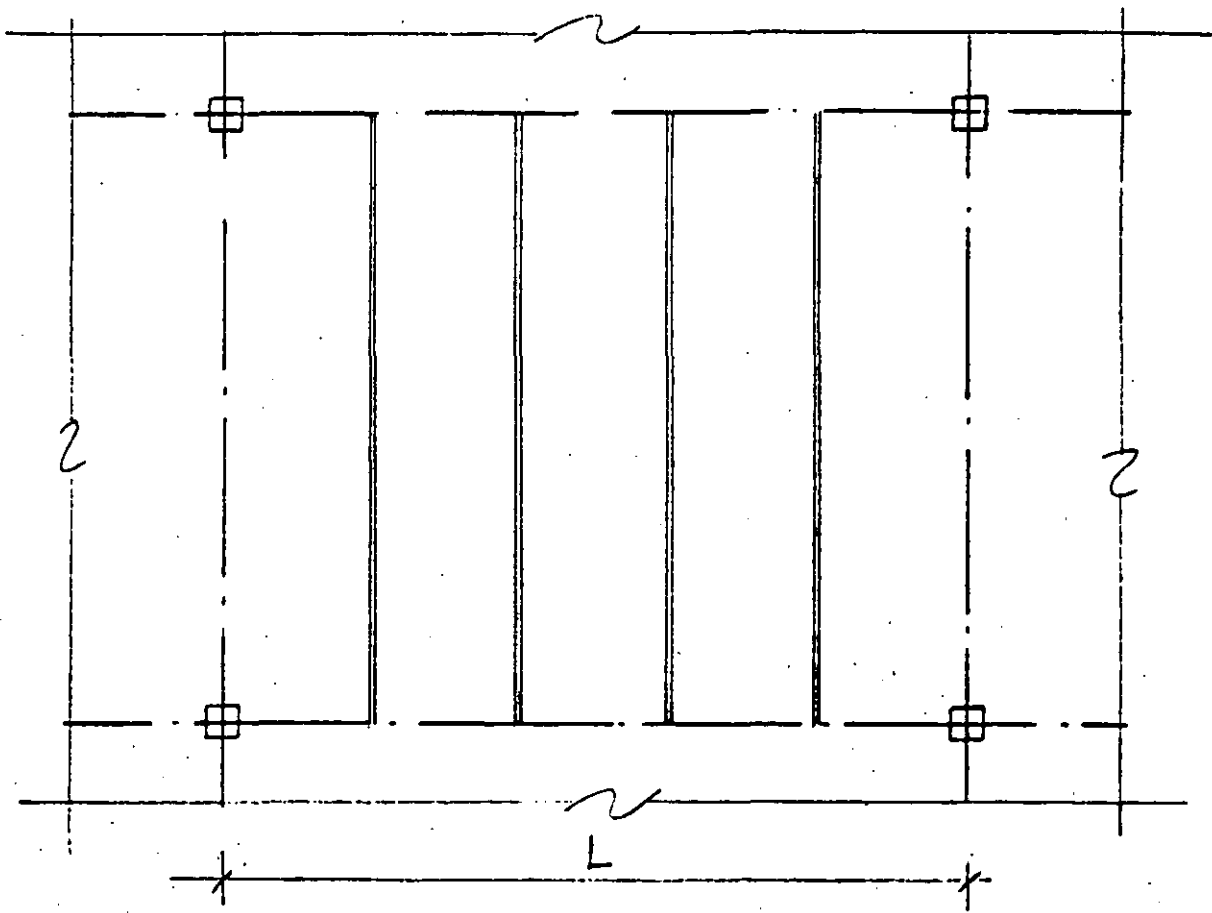
REFERENCIAS.

1. Lin, T.Y. "Design of Prestressed Concrete Buildings for Earthquake Resistance", Journal of the PCI, Vol. 9, No.6, Dic. 1964, pp. 15-31.
2. Rosenblueth, E. Discusión del artículo de T.Y. Lin "Design of Prestressed Concrete Building for Earthquake Resistance", Journal of the Structural División, American Society of Civil Engineers, Vol. 92 Feb. 1966.
3. Despeyroux, J. "L'utilisation du béton précontraint dans la construction parasismique "Travaux", No. 375, 1966.
4. Blakeley, R.W.G. "Ductility of Prestressed Concrete Frames Under Seismic Loading", University de Canterbury, Nueva Zelandia, 1973.
5. Thompson, K.J. "Ductility of Prestressed Concrete Frames Under Seismic Loading". Ph. D. Thesis University of Canterbury, Nueva Zelandia, 1971'
6. Nakano "Experiment on behavior under lateral force of prestressed concrete frames". Reporte del Instituto de la Construcción, Tokyo, julio 1967.
- 7.- Penzien, J. "Damping Characteristics of Prestressed Concrete", ACI Journal, Vol. 61, No. 9.
8. Camba, J. "Edificios altos prefabricados parcialmente presforzados", Conferencia Regional de Edificios Altos, México, D.F., abril 1973.
9. Dowrick, D.F. "Earthquake resistant Design" John Wiley and Sons, New York, 1977.

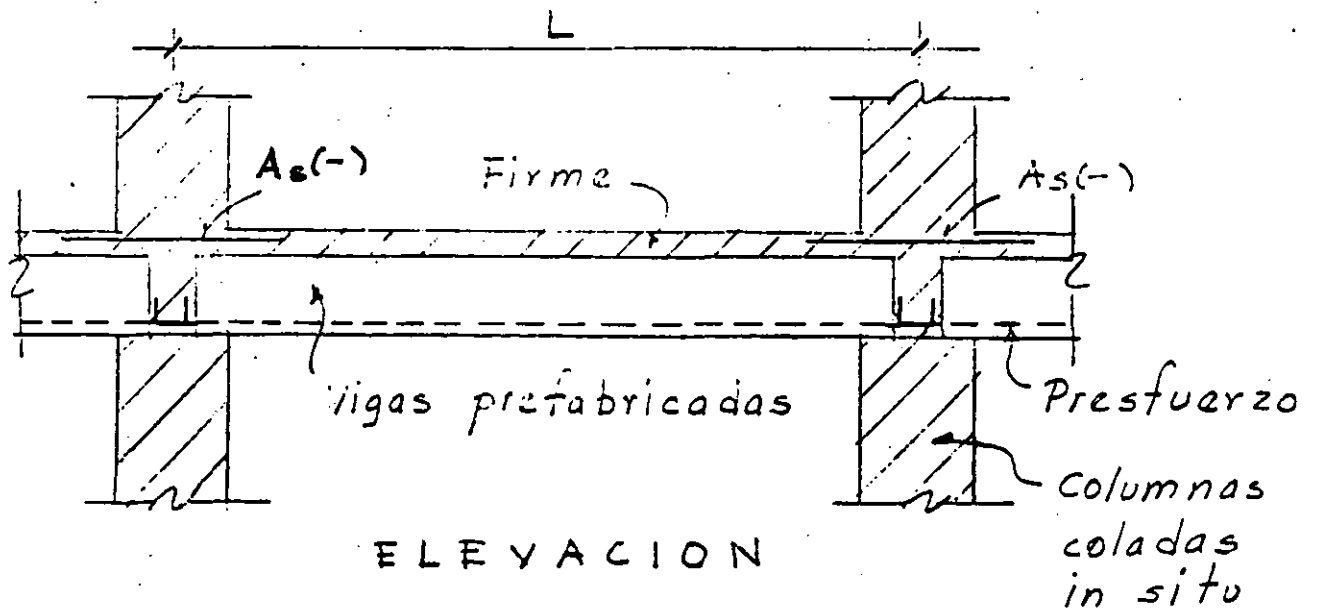
4.- CONEXIONES TIPO DE MIEMBROS PRESFORZADOS.

4.1.- Estructuraciones pretensadas.

4.2.- Estructuraciones postensadas.

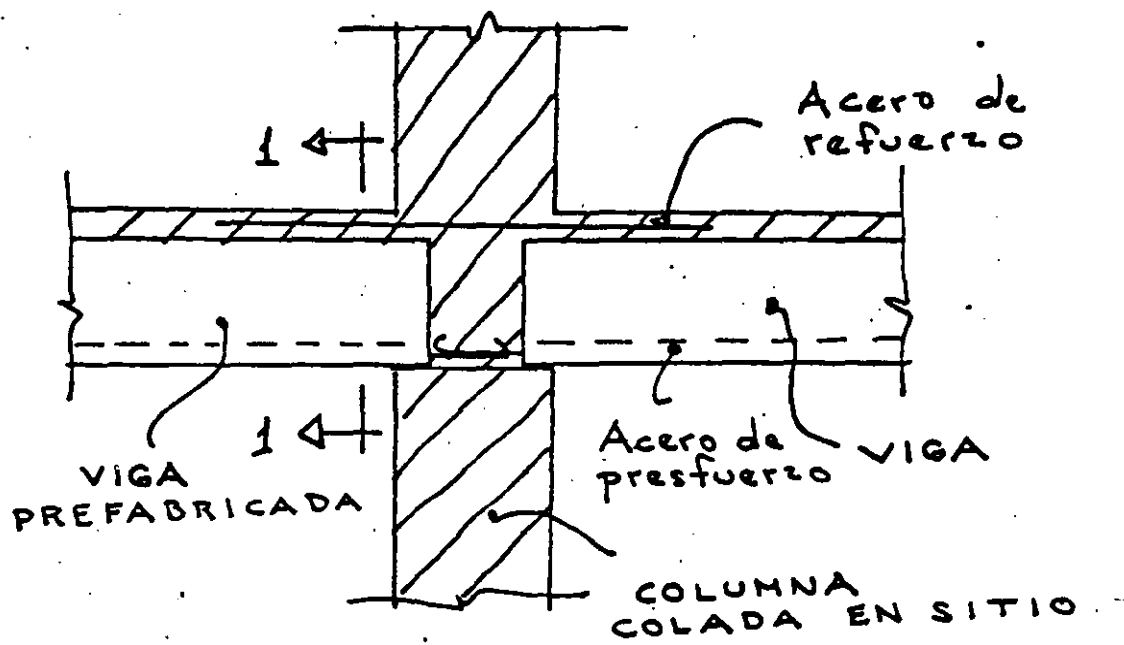


PLANTA

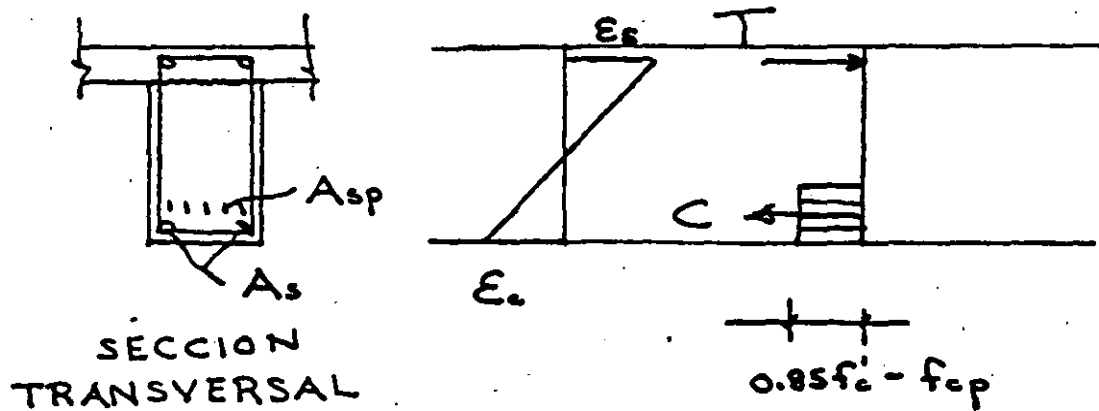


ELEVACION

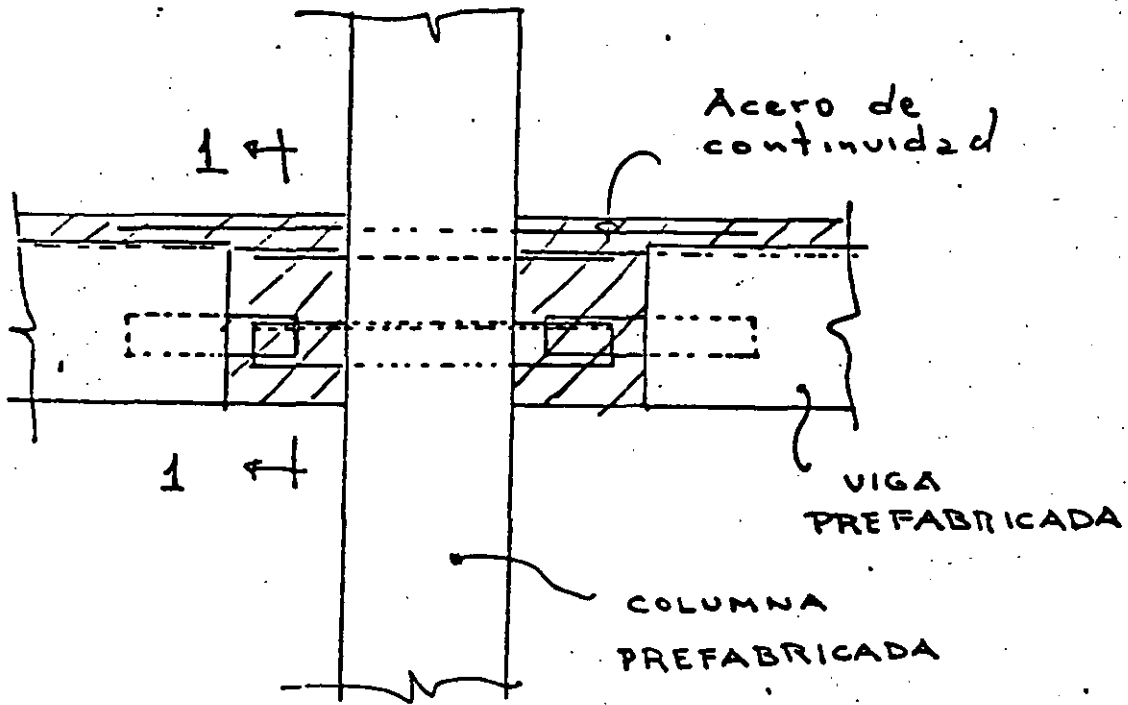
ESTRUCTURACION PRETENSADA



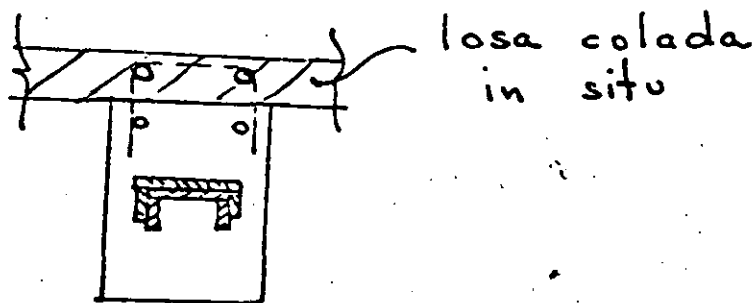
ELEVACION



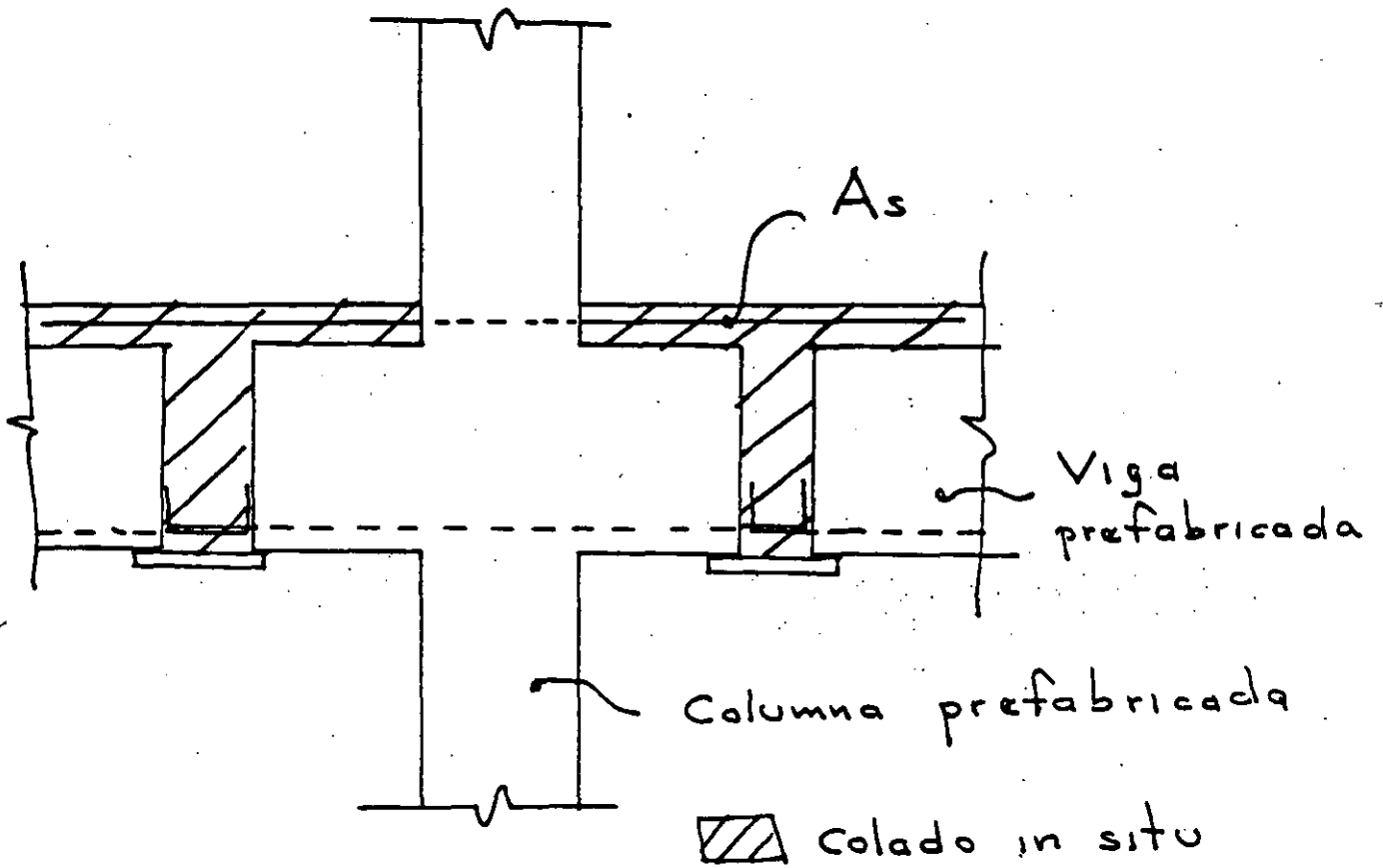
CORTE I-I



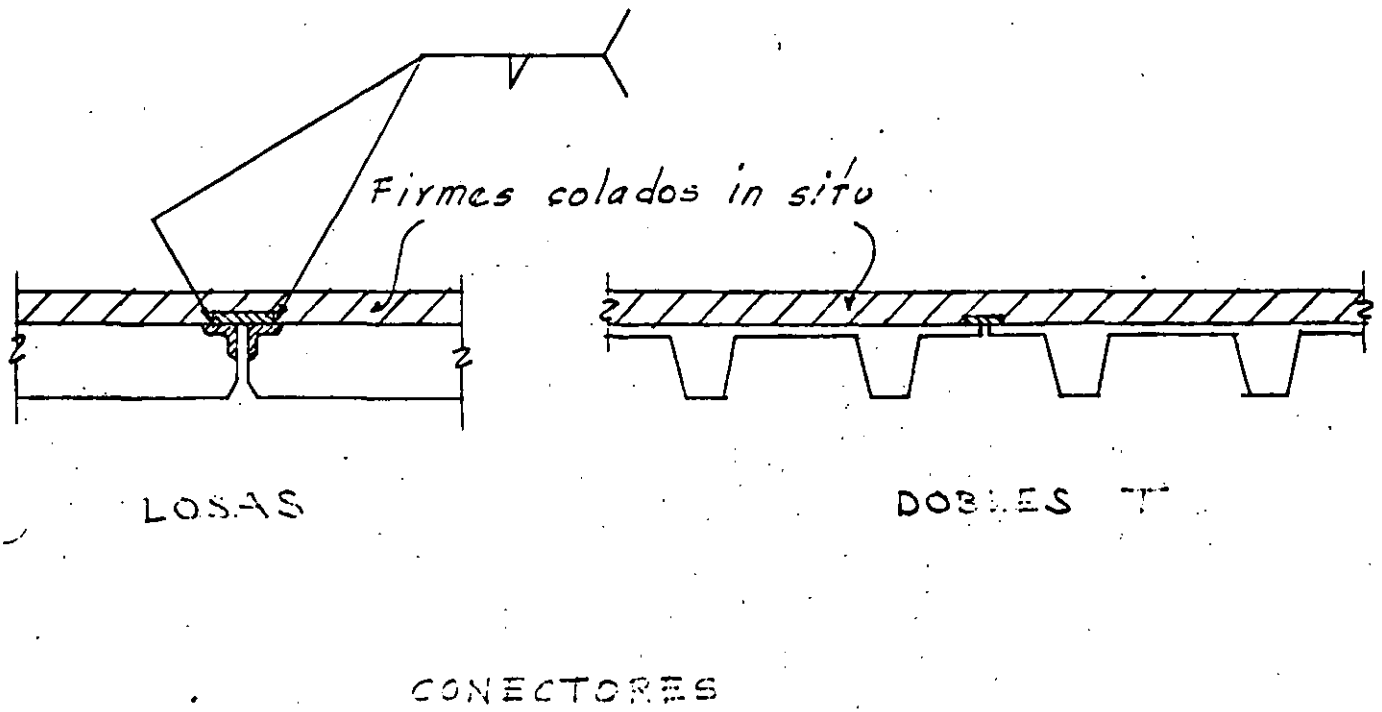
ELEVACION



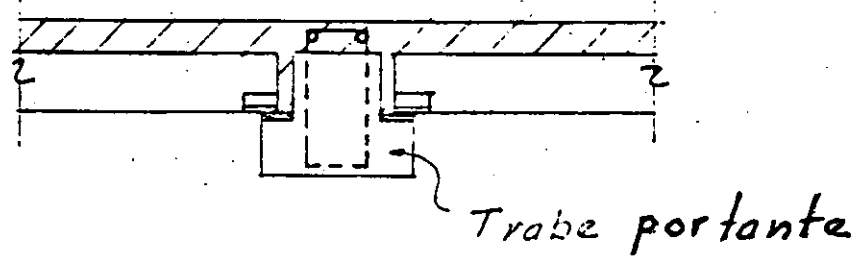
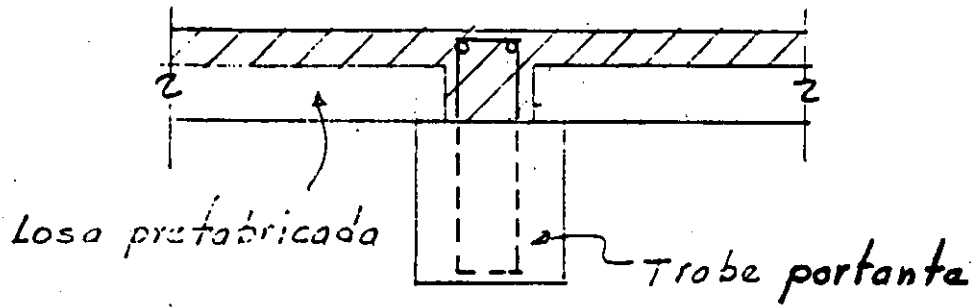
CORTE 1-1



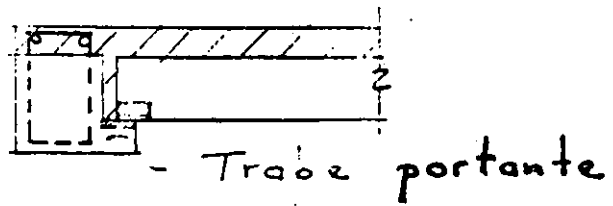
CONEXION PREFABRICADA
FUERA DEL NUDO



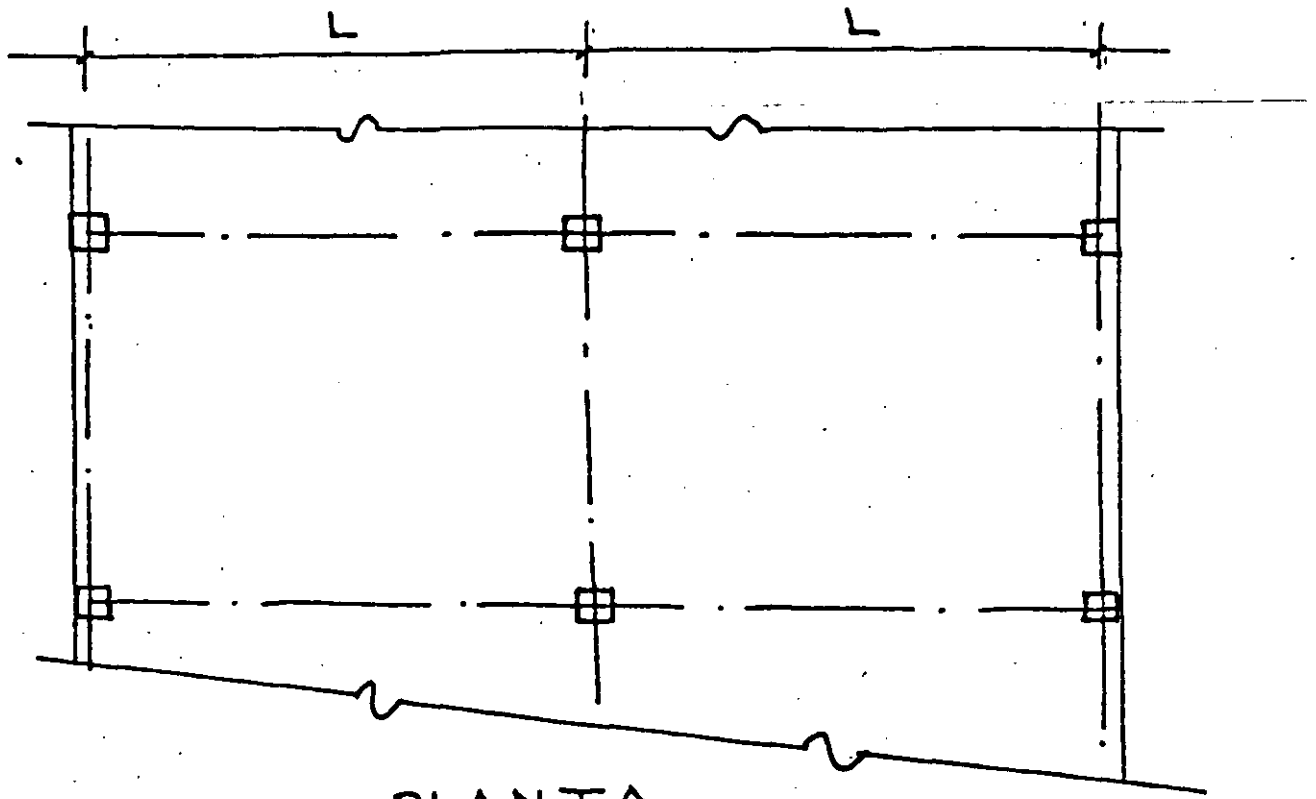
- FIG. 5 -



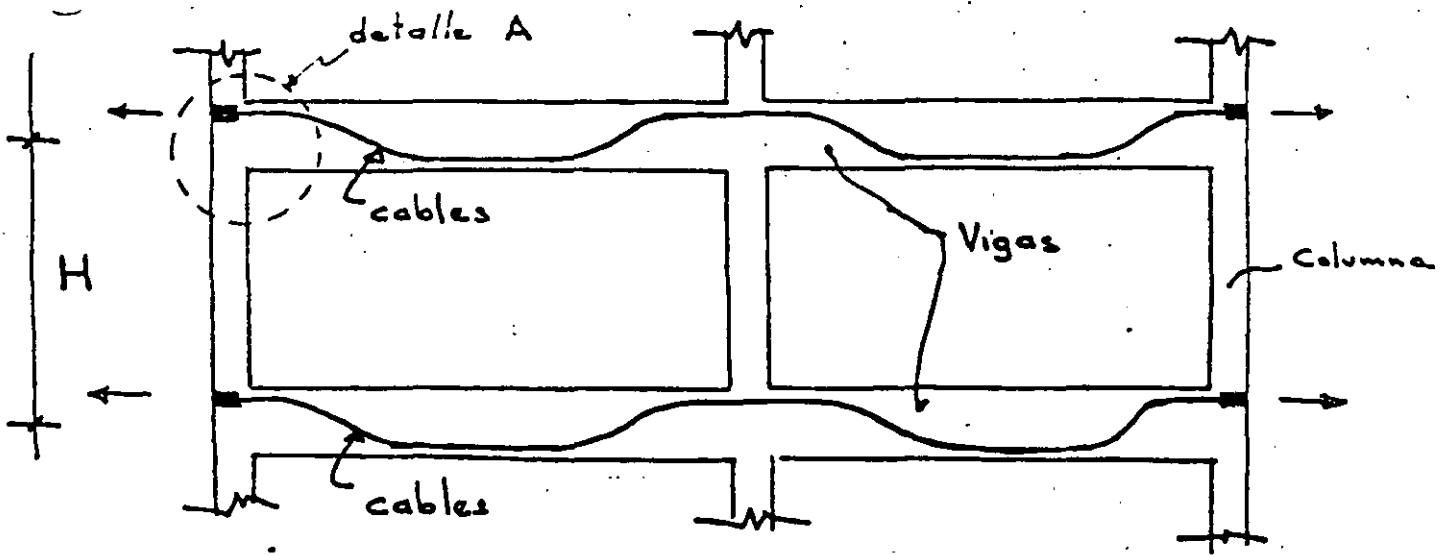
 Colado en el lugar



CONEXION ELEMENTO PREFABRICADO-TRABE PORTANTE

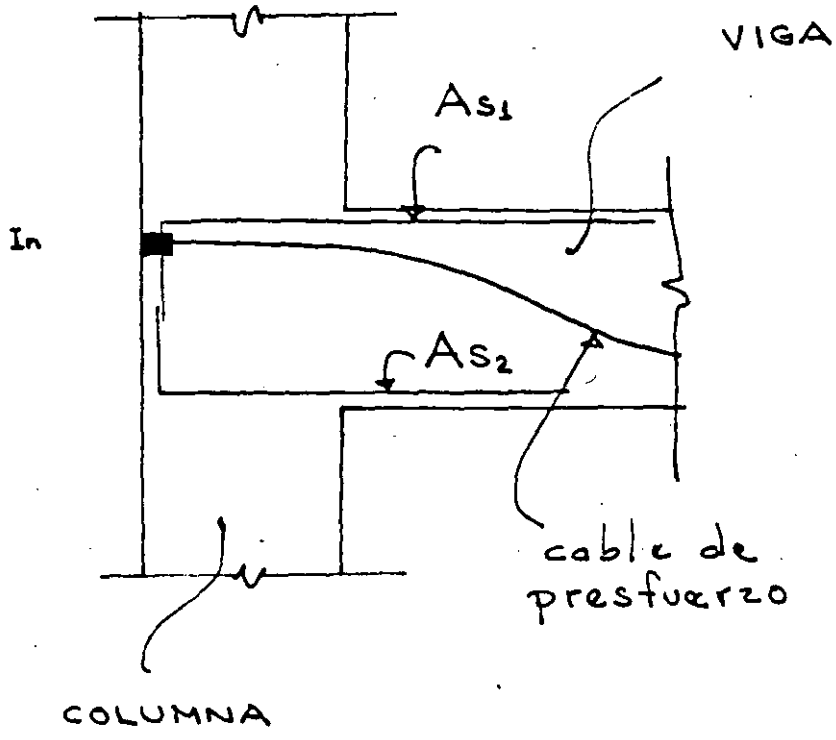


PLANTA



ELEVACION

ESTRUCTURACION POSTENSADA



ELEVACION

DETALLE A

ESTRUCTURACION POSTENSADA

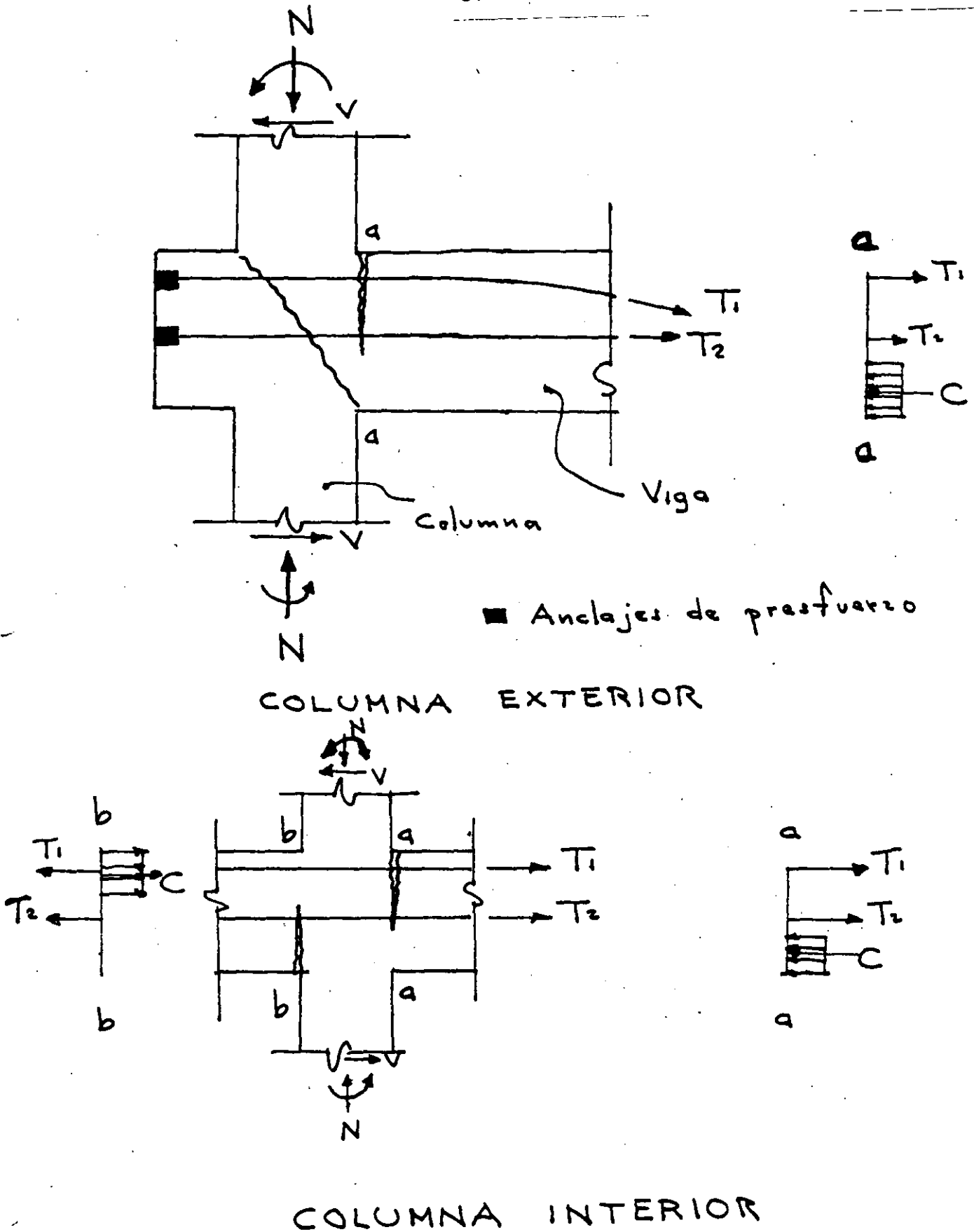


FIG. 9

5.- REGLAMENTOS.

5.1.- Reglamento del Distrito Federal 1987.

5.2.- Reglamento ACI 318 - 83

5.3.- Recomendaciones C.E.B.-FIP.

Los nuevos reglamentos para estructuras de concreto presforzado tienen un enfoque probabilístico empleando la noción de "estado límite", que permiten definir con un alto porcentaje de probabilidad, el punto que correspondería en la gráfica carga-deflexión.

REVISION ESTADOS LIMITE DE

SERVICIO EN CONCRETO

PRESFORZADO

(RDF 1987)

a) Concreto

comp. $f_c = 0.60 f'_{ci}$

tensión $f_t = \sqrt{f'_{ci}}$



Después de la tranferencia

comp. $f_c = 0.45 f'c$

tensión $f_t = 1.6 \sqrt{f'c}$



En servicio

(nota sobre $f_t = 3.2 \sqrt{f'c}$)

b) Acero de presfuerzo

0.80 f_{sr}

al tensar

0.70 f_{sr}

en servicio

(valores \approx para presfuerzo total y parcial)

c) Por Aplastamiento

$f_b = 0.8 f'_{ci} \sqrt{\frac{A_2}{A_1} - 0.2}$

1.25 f'_{ci} ; al tensar

$f_b = 0.6 f'c \sqrt{\frac{A_2}{A_1}} \leq f'c$

INDICE DE PRESFUERZO (RDF 1987)

A) Presfuerzo total

$$I_p \begin{cases} 1.0 \\ 0.9 \end{cases}$$

B) Presfuerzo parcial

$$I_p \begin{cases} 0.9 \\ 0.6 \end{cases}$$

C) "Sin" presfuerzo

$$I_p < 0.6$$

$$I_p = \frac{MR_p}{MR_r + MR_p}$$

$$I_p = \frac{Asp \ fsp}{Asp \ fsp + Asfy}$$

L I M I T E S D E R E F U E R Z O

E N F L E X I O N (RDF 1987)

A) SECCION CON PRESFUERZO TOTAL

Asmín \rightarrow MR = 1.2 M. agrietamiento

B) SECCION CON PRESFUERZO PARCIAL

As \rightarrow MR = (1.5 - 0.31 p) M. agrietamiento

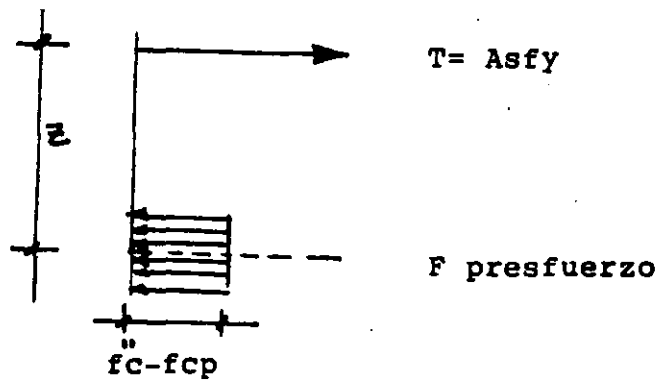
C) REFUERZO MAXIMO

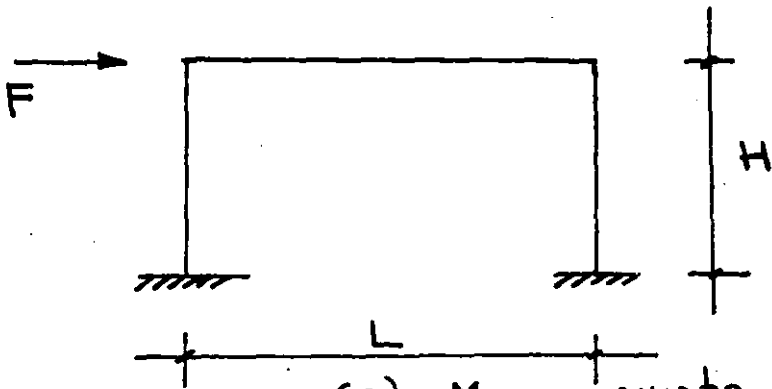
$$\epsilon_{sp} \geq \frac{\epsilon_{y.p}}{0.75}$$

($\epsilon_{y.p} \approx 0.01$)

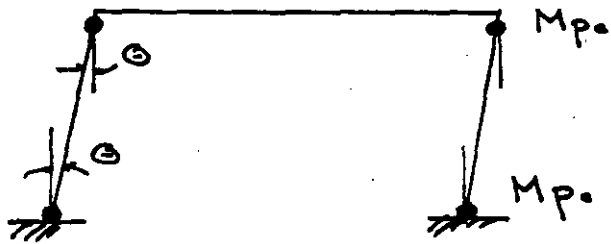
C O N C R E T O P R E F A B R I C A D O (RDF 1987)

- 1) Resistencia conexiones ≥ 1.3 Valor acción interna
- 2) $Q = 2$ (salvo demostración de requisitos, $Q=3$)
- 3) En conexiones, la resistencia $f'c > \begin{matrix} f'c \text{ losa } \delta \\ f'c \text{ viga} \end{matrix}$
- 4) Acero en conexiones $\leq 4,200 \text{ Kg/cm}^2$
- 5) Superficies acabado rugoso 5mm de espesor
- 6) Al revisar vigas prefabricadas tomar en cuenta reducción de capacidad del concreto debido al presfuerzo.

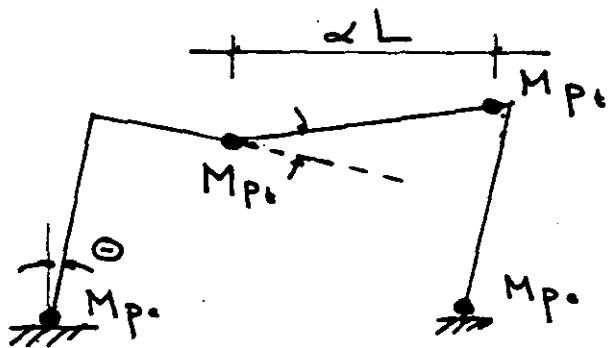




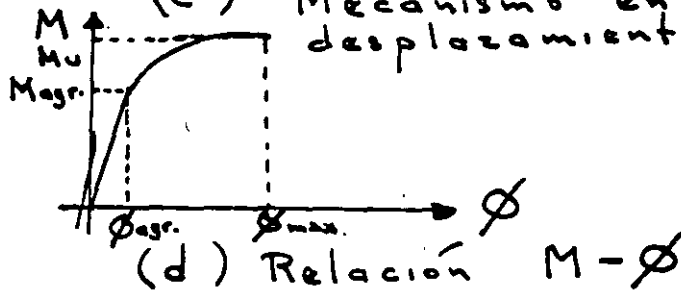
(a) Marco sujeto a fuerza sísmica

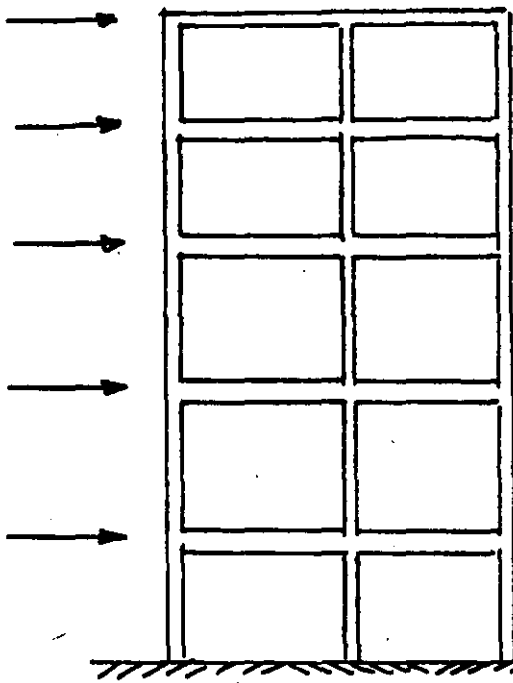


(b) Mecanismo de columnas



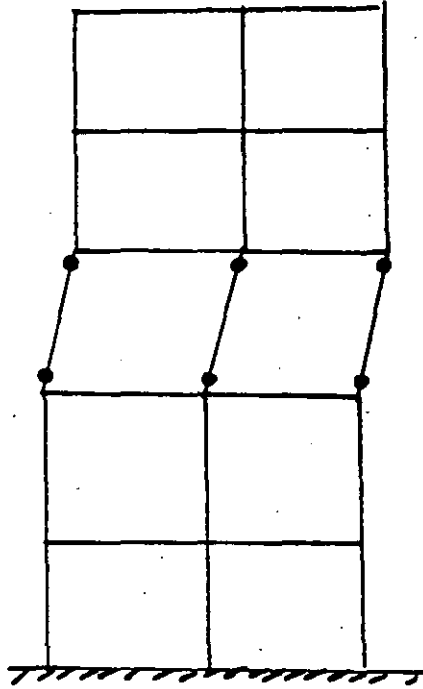
(c) Mecanismo en traves con desplazamiento





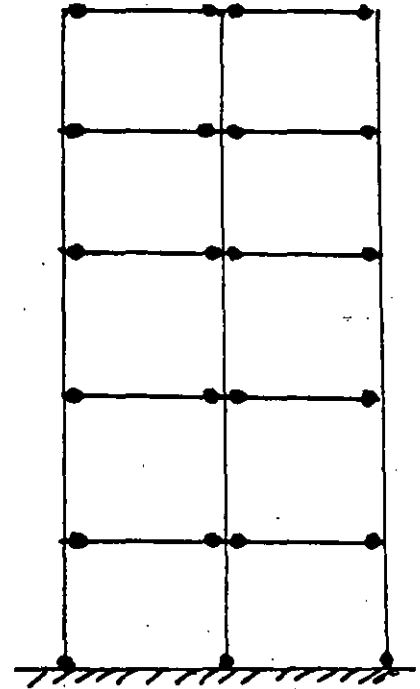
(a)

Marcos
Rígidos



(b)

Mecanismo de
columnas



(c)

Mecanismo
de trabes

MECANISMOS DE COLAPSO BAJO
FUERZAS SISMICAS

REGLAMENTO ACI 318 - 83

Zonas alta, baja y moderada sismicidad.

Requerimientos con base en la disipación de energía en el rango no lineal de respuesta.

Resistencia a flexión de cables adheridos y no adheridos.

Límites de refuerzo en flexión.

1) Acero presforzado únicamente.

$$\omega_p = \frac{e_{pfps}}{f'_c} \leq 0.36 \beta_1 ; e_p = \frac{A_{sp}}{bd_r}$$

2) Acero presforzado y no presforzado.

$$\omega_p + \frac{d}{d_p} (w-w') \leq 0.36 \beta_1$$
$$\omega = \frac{e f_y}{f'_c} ; \omega' = \frac{e' f_y}{f'_c}$$
$$\rho = \frac{A_s}{bd} \quad \text{y} \quad \rho' = \frac{A's}{bd}$$

Redistribución de momentos

$$20 \left(1 - \frac{\frac{d}{d_p} (w_p - w')}{0.36 \beta_1} \right) \quad \text{9.}$$

RECOMENDACIONES DE LA FIP PARA EL DISEÑO SISMICO DE ESTRUCTURAS.

Se presentan a continuación un resumen de las principales recomendaciones.

1) Se considerarán dos estados límite de sismo: moderado y severo. En sismos severos la estructura no debe fallar, debiendo formarse un número significativo de articulaciones plásticas capaces de disipar energía.

2) Son válidos los análisis estático o dinámico para determinar las fuerzas sísmicas y las estructuras deberán analizarse en dos direcciones principales.

3) La ductilidad por flexión debe asegurarse mediante la posición de articulaciones plásticas bajo sismos severos. En esas articulaciones el eje neutro debe estar a $0.25h$ en puntos donde ocurran inversión de momentos y el momento último deberá ser como mínimo 1.3 el momento de ruptura.

4) En las articulaciones plásticas, todo el cortante deberá ser tomado con estribos.

5) De preferencia los cables deberán lechadearse.

6) Los anclajes de presfuerzo deberán colocarse en zonas - alejadas a las de máximos esfuerzos como lo son las articulaciones plásticas.

7) Las uniones trabe-columna deberán diseñarse en tal forma que aseguren que la falla por cortante no ocurre en el núcleo de la unión.

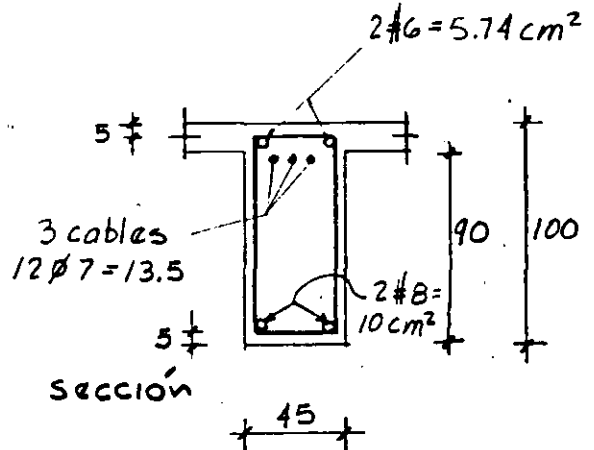
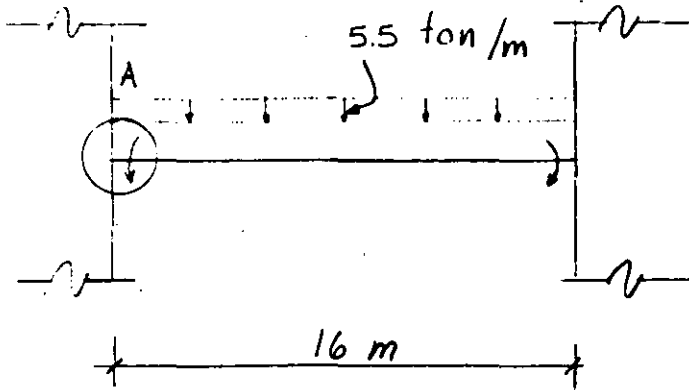
Una consideración importante en las Recomendaciones de Nueva Zelanda para estructuras presforzadas en zonas sísmicas es - la de tomar un coeficiente de 20% mayor que las de concreto reforzado. Como un intento que permita incrementar la respuesta en estructuras presforzadas (5).

6.- EJEMPLOS

6.1.- Trabe postensada.

6.2.- Trabe pretensada.

EJEMPLO 1.- Verificar si la sección propuesta en concreto prestozado cumple los requisitos del reglamento del D.F. Los elementos mecánicos son los de servicio.

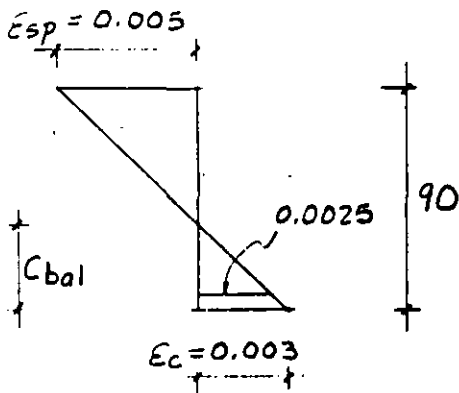


C.M
 $M + C.V. = -75 \text{ tm}$
 $M \text{ sismo} = -50 \text{ tm}$

Características de materiales:
 $f'_c = 300 \text{ Kg/cm}^2$
 $f_{sp} = 13,000 \text{ Kg/cm}^2$
 $f_y = 4,000 \text{ Kg/cm}^2$

SOLUCION .-

a) Verificación de limitación de acero



$$C_{bal} = \frac{90 \times 0.003}{0.008} = 33.7 \text{ cm}$$

$$\therefore A_{bal} = 0.8 \times 33.7 = 27 \text{ cm}$$

Calculo de resistencias reducidas:

$$f^*_c = 0.8 \times 300 = 240 \text{ Kg/cm}^2$$

$$f''_c = 0.8 f^*_c = 192 \text{ Kg/cm}^2$$

La fuerza de compresión valdrá:

$$\begin{aligned} C_{bal} &= 45 \times 27 \times 192 + 10 \times 4000 \\ &= 233\,280 + 40\,000 = 273\,280 \text{ Kg} \end{aligned}$$

$$\therefore T_{bal} = 273.3 \text{ ton}$$

De acuerdo con el reglamento del D.F.

$$T_{m\acute{a}x.} = 0.75 T_{bal} = 0.75 \times 273.3 = 204 \text{ ton}$$

En la sección propuesta, suponiendo la fluencia del acero de pretensado.

$$\begin{aligned} T &= A_{sp} f_{yp} + A_s f_y \\ &= 13.5 \times 13\,000 + 5.74 \times 4\,000 \\ &= 175\,500 + 22\,960 = 198.4 \text{ ton} \end{aligned}$$

$$\therefore T \leq T_{m\acute{a}x.} \quad \text{o.k.}$$

b) Cálculo del momento resistente

Suponiendo la fluencia del acero de prestuerzo:

Por equilibrio de fuerzas:

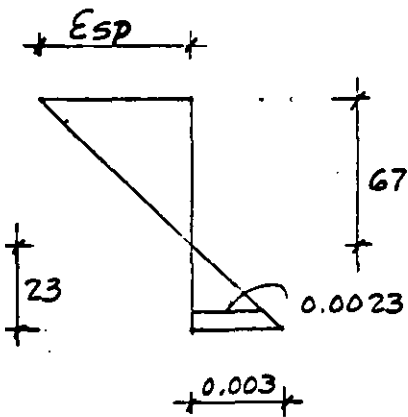
$$C = 45 \times 192 \times a + 10 \times 4000$$

$$T = 175.5 + 22.9 = 198.4$$

$$a = \frac{158,400}{8640} = 18.3 \text{ cm}$$

$$c = \frac{18.3}{0.8} = 23 \text{ cm}$$

Verificando el tipo de falla



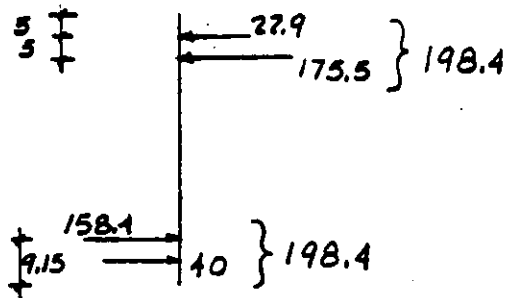
$$E_{sp} = \frac{6.7}{23} \times 0.003 = 0.0087$$

$$E_{sp \text{ total}} = 0.005 + 0.0087 = 0.0137$$

$$E_{sp} > E_y$$

∴ El acero de prestuerzo fluye y la suposición es correcta.

El momento resistente valdrá:



$$z = 100 - 8.31 - 9.42 = 82.2 \text{ cm}$$

$$M_{\text{resist.}} = \phi C_z = \phi T_z$$

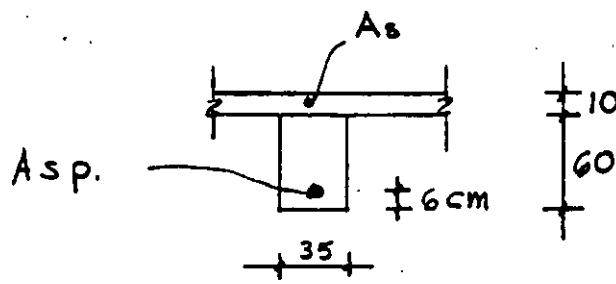
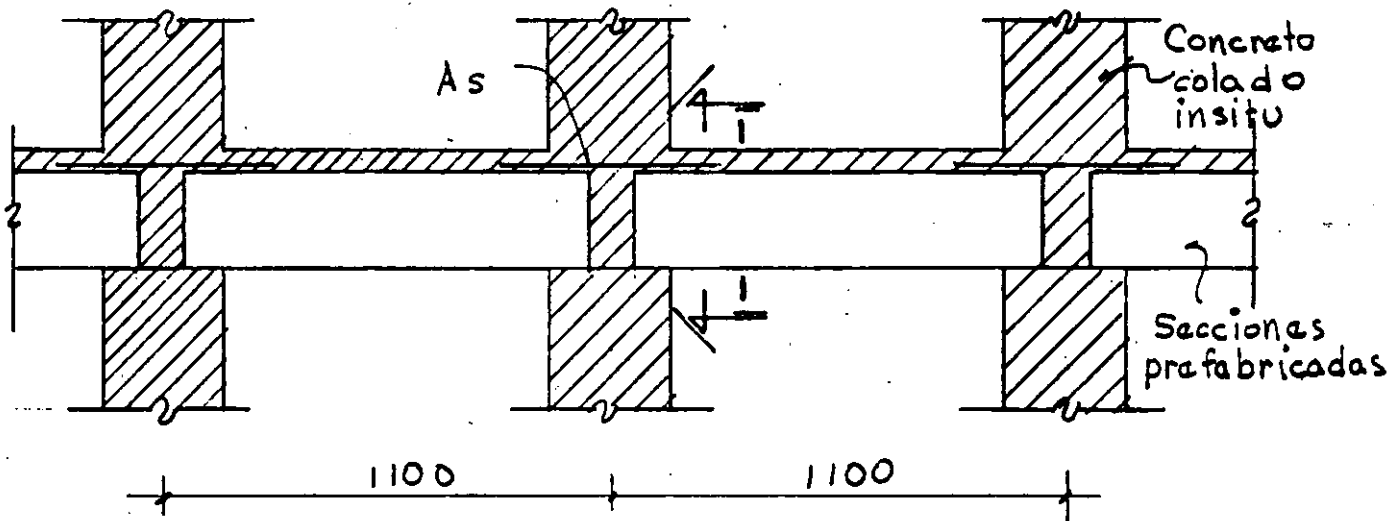
$$\begin{aligned} M_{\text{resist.}} &= 0.9 \times 198.4 \times 0.82 \\ &= 146.4 \text{ tm} \end{aligned}$$

$$M_{\text{actuante}} = (75 + 50) 1.1 = 137 \text{ tm}$$

$$M_{\text{resist.}} > M_{\text{actuante}}$$

∴ La sección y armado propuestos sí cumplen los requisitos del reglamento del D. F. en flexión.

EJEMPLO 2.- Calcular el área de acero de refuerzo en la viga pretensada de la figura para momento negativo debido a carga viva y sismo.



CORTE 1-1

$$M_{c.v.} = -10 \text{ tm}$$

$$M_{\text{sismo}} = -16 \text{ tm}$$

$$f'_c = 350 \text{ Kg/cm}^2$$

$$f_y = 4000 \text{ Kg/cm}^2$$

$$f_{sp} = 15,000 \text{ Kg/cm}^2$$

$$A_{sp} = 6 \text{ torones } 1/2'$$

SOLUCION

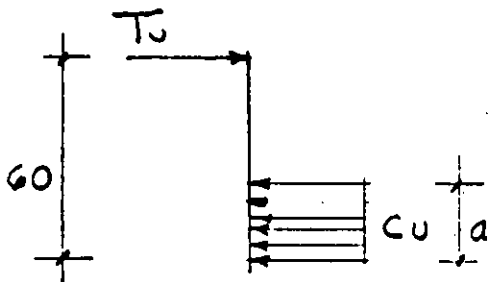
1) Cálculo del área acero para momento negativo.

$$M_u (-) = (10 + 16) \cdot 1.1 = 28.6 \text{ t m}$$

$$A_s \approx \frac{M_u}{0.9 \times 0.85 d \times f_y} = \frac{28.6 \times 10^5}{0.9 \times 0.85 \times 65 \times 1000} = 145 \text{ cm}^2$$

Se pondrán 2#8 + 2#6 \rightarrow A_s 15.7 cm².

Estableciendo el equilibrio en el apoyo:



$$C_u = T_u$$

$$C_u = (224 - f_{cp}) \cdot 35 \cdot a$$

$$T_u = 15.7 \times 4000$$

$$T_u = 62,800 \text{ Kg.}$$

$f_c'' - f_{cp}$
 compresión
 debida al prefuerzo

Suponiendo una compresión debida al prefuerzo de 100 Kg/cm².

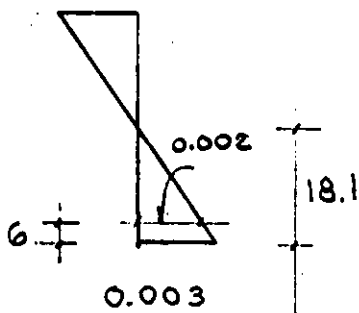
$$a = \frac{62800}{124 \times 35} = 14.5 \text{ cm}$$

$$\therefore c = \frac{14.5}{0.8} = 18.1 \text{ cm} \quad ; \text{ verificando la}$$

falla se confirma la fluencia del acero A_s

verificando ahora la compresión
supuesta en el concreto:

Del diagrama de deformaciones obtenido



$$\epsilon_{sp} = 0.002$$

La deformación del acero
al tensarse se supuso de
0.005

$$\epsilon_{sp} = 0.005 - 0.002 = 0.003$$

$$f_{sp} = \epsilon_{sp} \times E_s = 0.003 \times 2 \times 10^6$$

$$= 6,000 \text{ Kg/cm}^2$$

La fuerza de prestuerzo valdrá:

$$F = 6000 \times 0.93 \times 6 = 33480 \text{ Kg}$$

y la compresión en el concreto debida al prestuerzo será:

$$f_{cp} = \frac{33480}{35 \times 14.1} = 67 \text{ Kg/cm}^2$$

$$67 \neq 100 \text{ Kg/cm}^2 \text{ supuestos}$$

Haciendo un segundo tanteo con el promedio de los dos: 80 Kg/cm^2 y repitiendo el proceso anterior, se tendrá:

$$a = \frac{62800}{144 \times 35} = 12.5 \text{ cm}$$

$$c = 15.6 \text{ cm}$$

$$Esp = 0.0018$$

$$\therefore Esp \text{ final} = \underbrace{0.005}_{\text{al tensar}} - 0.0018 = 0.0032$$

$$Esp = 0.0032 \times 2 \times 10^6 = 6400 \text{ Kg/cm}^2$$

$$F = 6400 \times 0.93 \times 6 = 35712 \text{ Kg}$$

$$f_{cp} = \frac{35712}{35 \times 12.5} = 81 \text{ Kg/cm}^2$$

$$80 \approx 81 \text{ Kg/cm}^2 \quad \text{O.K.}$$

El momento resistente valdrá:

$$M_{resist} = \phi T_v z$$

$$= 0.9 \times 62\,800 \left(60 - \frac{12.5}{2} \right)$$

$$= 30.4 \text{ tm} > 28.6 \text{ tm}$$

Nota.- La condición de $T < T_{bal}$ se cumple con amplio margen, ya que el valor de T_{bal} es de 108.86 ton.



**FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA**

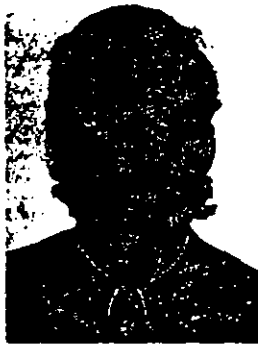
XX CURSO INTERNACIONAL DE INGENIERIA SISMICA

MODULO III: DISEÑO SISMICO DE EDIFICIOS

**CASE STUDY OF THE PERFORMANCE OF PRESTRESSED CONCRETE BUILDINGS
DURING THE 1985 MEXICO EARTHQUAKE**

DR. JOSE LUIS CAMBA

Case Study of the Performance of Prestressed Concrete Buildings During the 1985 Mexico Earthquake



José Luis Camba, Dr. Sc.

Professor
Division of Graduate Studies
School of Engineering
National Autonomous University
of Mexico
Mexico City, Mexico



Roberto Meli, Ph.D.

Research Professor
Institute of Engineering
National Autonomous University
of Mexico
Mexico City, Mexico

The overall effects of the 1985 Mexico earthquake on buildings are summarized, with specific consideration of the performance of prestressed concrete buildings. Then, for five typical prestressed concrete buildings, results of analyses of the dynamic response, with due consideration of the soil-structure interaction, are presented. In general, the computed response of the buildings under the effect of a ground motion simulating the 1985 earthquake, corresponded reasonably well with their observed performance. Nevertheless, in some cases the analyses indicated that the buildings should have experienced a greater nonlinear behavior than the ones perceived from their level of damage. Some reasons for these differences are discussed. Recommendations on earthquake-resistant design of prestressed concrete buildings are given. The importance of providing lateral stiffness by shear walls or bracing, and of achieving ductility and continuity through mild steel reinforcement, is emphasized.

Scarce evidence is available on the performance of prestressed concrete buildings subjected to severe earthquakes. The few well-documented cases of failures are related to gross errors in the conceptual design of the structural system and, mainly, to poor connections between precast concrete members.¹ Specifically, there are very few known cases of detailed analyses of prestressed concrete buildings in which their observed behavior under severe earthquakes was compared to that com-

puted according to well-established principles regarding the seismic response of buildings.

The 1985 earthquake in Mexico City constituted a severe test in the ability of building structures to withstand seismic forces. Therefore, it offered a unique opportunity to evaluate current design practice and construction methods. Although not many multistory prestressed concrete structures existed in Mexico City, a few dozen buildings in the range from 4 to 12 stories had prestressed frame struc-

tures. Indeed, some of these buildings were located in the most severely affected part of the city and were subjected to very intense ground shaking.

The object of this paper is to first present an overview of the performance of prestressed concrete construction in Mexico City during the September 19, 1985, earthquake, and then to show the results of a case study of five buildings whose structural drawings could be obtained. Although none of these buildings fully complied with modern code requirements for earthquake resistance, they survived the earthquake with minor or no damage. Several practical recommendations, regarding different aspects of the earthquake-resistant design of prestressed concrete structures, are drawn from these evaluations.

ASSESSMENT OF EARTHQUAKE DAMAGE

The earthquake of September 19, 1985, with a magnitude $M_s = 8.1$ (Richter Scale), originated near the Pacific Coast of Mexico and was felt with extraordinarily large intensities in some parts of the Valley of Mexico, approximately 400 km (250 miles) from the epicenter, causing the collapse or severe damage of many buildings.

The intensity of the ground motion varied considerably throughout the Mexico City area. Peak ground accelerations were less than $0.04g$ in sites of firm soil, while they reached $0.20g$ in some parts of the bed of an old lake which contains very deformable clay deposits. Unfortunately, this is also where the most populated part of the city is located.

A description of the main structural aspects of this earthquake can be found elsewhere.² Briefly, the long duration ground motion with prevailing long periods mostly affected multi-story flexible buildings, whereas low-rise stiff buildings, even those apparently rather weak, suffered very little damage.

Reinforced concrete frame buildings of more than five stories were the most damaged structures. They had been typically designed for a base shear coefficient of 0.06 and, in most cases, the reinforcement in members

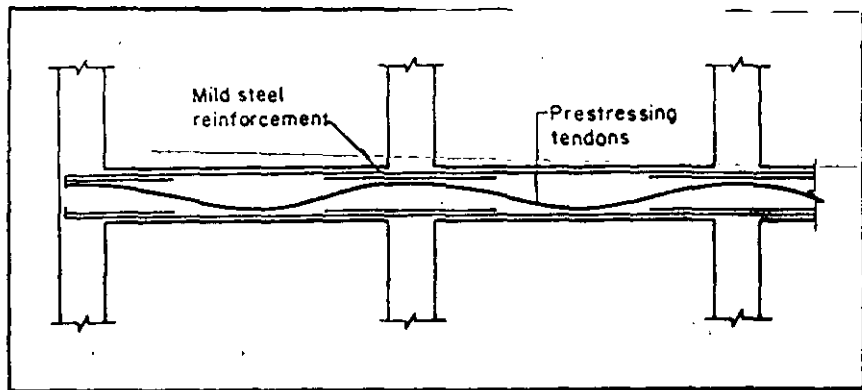


Fig. 1. Cast-in-place frames with post-tensioned concrete beams.

and joints had not been detailed with the current strict code requirements for ductile frames.

Failures were mainly due to shear or eccentric compression in columns and to bond or shear in joints. Irregularities in the structural scheme, such as lack of in-plane symmetry and discontinuity or sharp changes in stiffness of structural members, frequently contributed to the failures. Hammering with adjacent buildings and excessive rocking of the foundations were other sources of damage and collapse.

As a result of the damage evaluation following the earthquake, design forces for seismic resistance have been significantly increased in the new Mexico Building Code, which also imposes stringent requirements for ductility in concrete structures.

PERFORMANCE OF PRESTRESSED CONCRETE BUILDINGS

Detailed evaluations of the performance of prestressed concrete build-

ings were published a few months after the earthquake.^{3,4} Additional comments given here will augment the earlier reports.

Within the large variety of construction systems, including prestressed concrete members, that have been used for buildings in Mexico City, two major types can be distinguished:

1. Cast-in-place concrete frame structures, with beams that are post-tensioned in at least one direction, (those with largest spans) — Continuity is provided by mild reinforcing steel and by draped prestressing tendons (see Fig. 1). As a variation of this system, flat plate or waffle slab floor systems are post-tensioned in a similar way.

2. Structures with cast-in-place concrete columns and precast, prestressed concrete beams of different shapes — Joint continuity is provided by a cast-in-place concrete topping with mild steel reinforcement (see Fig. 2). Frequently, long span prestressed concrete beams in one direction are combined with non-prestressed reinforced

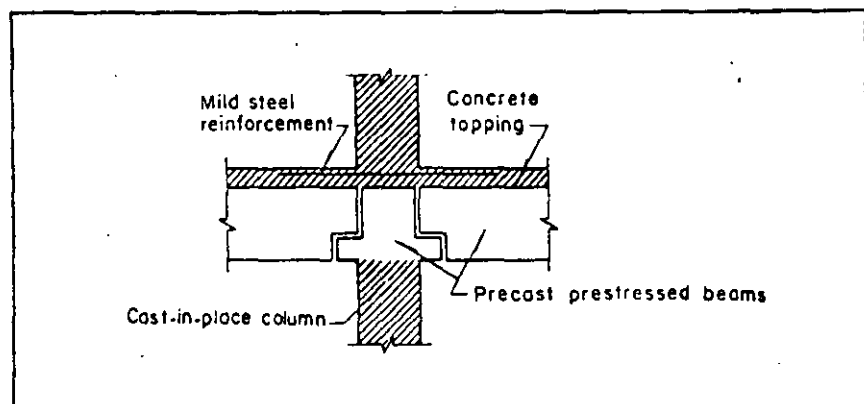


Fig. 2. Continuity for negative moments in precast, prestressed concrete frames.

concrete beams, of shorter span, in the other direction.

Most prestressed concrete buildings were of mid-rise construction, between four and eight stories. In some cases, the buildings were stiffened by shear walls, but more often frames were required to resist the total lateral force.

Some of the collapsed or severely damaged buildings contained precast structural elements. In most cases, the precast concrete members were part of the floor slab supported by cast-in-place reinforced concrete beams on column lines. Therefore, monolithic reinforced concrete frames constituted the main lateral load-resisting system. A rather thin reinforced concrete topping was typically cast over the precast floor to provide for in-plane continuity. Quite often, this type of floor showed signs of in-plane distortion, indicating that an effective diaphragm action was not achieved.

Efforts were made to retrieve the structural drawings of the five prestressed concrete buildings which, according to Fintel's evaluation,³ had suffered severe damage or collapse. Only for one of these buildings could some information about the structural design be obtained.

This building was a six-story hospital with cast-in-place columns. The floor system was composed of precast T-beams. The beams on the column lines in both directions had a precast soffit with ducts for straight post-tensioned tendons. Mild steel reinforcement for positive and negative bending was placed inside stirrups protruding from the precast soffit. A practically monolithic frame was obtained in this manner.

The scarcity of available information did not allow a detailed evaluation of the seismic response and safety of this building. Therefore, it could not be included in the case studies. Nevertheless, approximate computations showed that the shear and bending strengths of the columns in the longitudinal direction were clearly insufficient to resist the forces induced by ground motion.

It can be concluded that, in this building — as it was in the large majority of the damaged reinforced concrete structures — the collapse was

due to the weakness of the columns and was not related to the behavior of the precast or prestressed members nor to their connections to the columns. This conclusion is confirmed by the inspection of the remains showing intact beam-to-column connections.³

It can be argued, nevertheless, that the lack of thorough in-plane stiffness of the precast floor could have caused the concentration of shear forces in some of the column lines, thus somehow contributing to the failure.

The remainder of the prestressed concrete buildings did not suffer any significant structural damage, even those located in the most severely affected area. Nevertheless, several of the buildings showed signs of excessive lateral displacements, resulting in non-structural damage such as cracking of partitions and distortion and falling of ceilings. Some very slender buildings, founded on friction piles over very soft clay soil, suffered significant base displacements and rotations, and even some residual tilting.

CASE STUDY OF SPECIFIC BUILDINGS

A search for detailed information on the structural design of prestressed concrete buildings was undertaken to be able to fully evaluate whether their performance during the earthquake could be explained through analytical computations. About 20 prestressed concrete buildings were identified, but only for five of them could complete structural drawings be obtained. These five structures were analyzed in detail and the results are reported here.

Only one of these buildings was located in the area of heaviest damage. Three buildings were founded on soft soil deposits of moderate thickness, in the so-called transition zone, where the intensity of the earthquake was still high but less severe than in the lake area. The last building was located in an area of firm soil where the ground shaking was minor and no damage occurred.

Each building was inspected to detect damage caused by the earthquake, to check its properties against those reported in the drawings and to detect construction defects. The vibrations of

the five buildings under normal conditions were measured to determine their dynamic properties and to calibrate the analytical models used to compute the theoretical response. The technique used for these so-called ambient vibration tests will be described in the next section.

Methodology

The methodology used in this study was similar to that applied to other types of buildings in evaluating the design methods and the required provisions of the building code for earthquake-resistant design. An evaluation of the performance of concrete and of masonry buildings can be found elsewhere (see Refs. 5 and 6, respectively). A detailed presentation of the evaluation of prestressed concrete buildings, summarized in this paper, can be found in the doctoral dissertation of the first author.⁷

Analytical models with different levels of sophistication were used to study the seismic response of the five buildings. Linear response was investigated using a three-dimensional model, with proper consideration for the stiffness of the joints. The computer program SUPERETABS was used for this purpose.

To take into account the relative deformations between the structure and the soft soil where it was founded, an artificial story was added at the bottom of the structure. In this story, the axial and lateral stiffnesses of columns were determined to reproduce those of equivalent springs representing the rotational and translational stiffness of the surrounding soil.⁸ A stiff diaphragm was assumed to connect all the members at each floor.

The buildings were modeled as a frame structure where the contribution of the slab to the lateral stiffness was included in the moment of inertia of the equivalent beam. Proper considerations were made for the effect of masonry infill walls through equivalent diagonal members.

From the linear analyses, the dynamic properties of the building, i.e., vibration periods and modal shapes, were first determined and compared to those measured in the ambient vibration tests. The dynamic response of

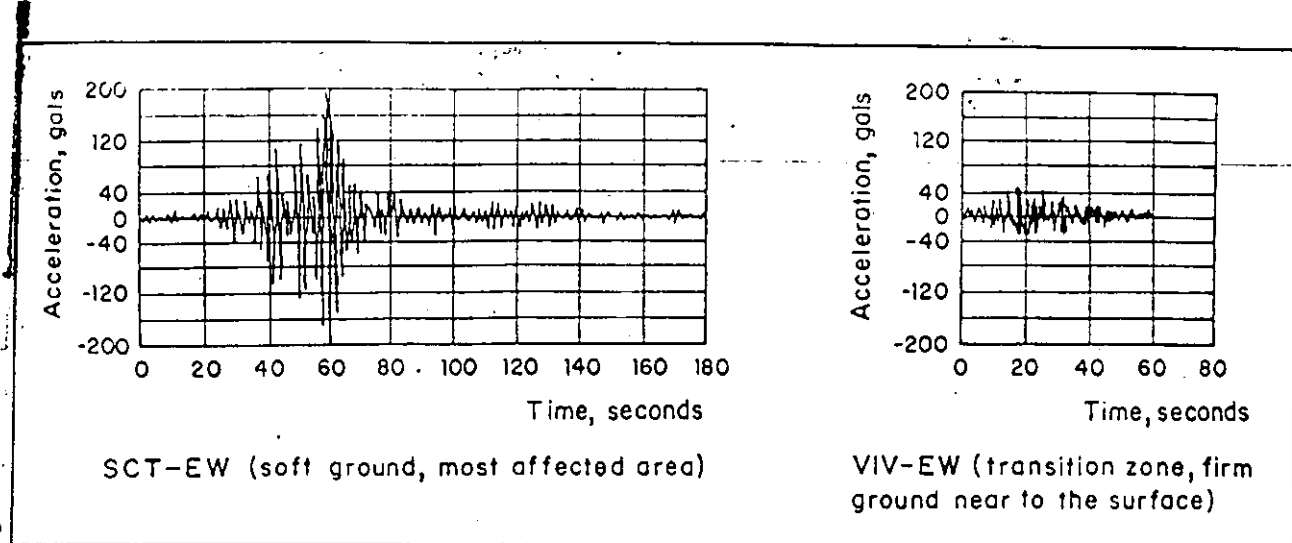


Fig. 3. Ground motion records at two sites of Mexico City for the September 19, 1985 earthquake.

each building to ground motions recorded in the 1985 earthquake for soil conditions similar to those of the sites was computed using a step-by-step dynamic response analysis.

From the available records of the 1985 earthquake, the SCT-EW record was selected as the most representative for the lake bed area and the VIV-EW for zones of firmer soil. Nevertheless, it must be taken into account that the characteristics of the ground motion varied considerably in each zone. Therefore, most buildings were analyzed for more than one ground motion to find bounds for the response. The accelerograms of the two previously mentioned records are shown in Fig. 3. The large differences in maximum amplitude, duration and frequency content between the records can be observed.

Lateral displacements and internal forces induced by the selected ground motions were computed and compared with those that could be resisted by the building. For this type of linear analysis, no specific difference was made between the model typically adopted for a non-prestressed, reinforced concrete frame and that corresponding to a prestressed concrete building.

Despite some evidence indicating that prestressed concrete structures have lower damping ratios than those of non-prestressed, reinforced concrete structures, the same damping ratio was assumed for both cases, i.e., 5 percent. It was assumed that the major source of damping in buildings is the friction between structural and non-structural members; therefore, the difference in damping between pre-

stressed and non-prestressed concrete should not be significant. The validity of this assumption is discussed in the next section, based on the results of the ambient vibration tests.

For buildings in which the linear analyses indicated that the theoretical capacity of some structural members should have been exceeded for the ground motion considered, nonlinear analyses were performed on a planar model to ascertain the amount of inelastic behavior that should have occurred.

Several models were considered to represent the nonlinear behavior of a prestressed concrete member. The classic elasto-plastic model [see Fig. 4(a)] was compared to a stiffness degrading model [see Fig. 4(b)] and to the S-shaped model that has been proposed for prestressed concrete members [see Fig. 4(c)].

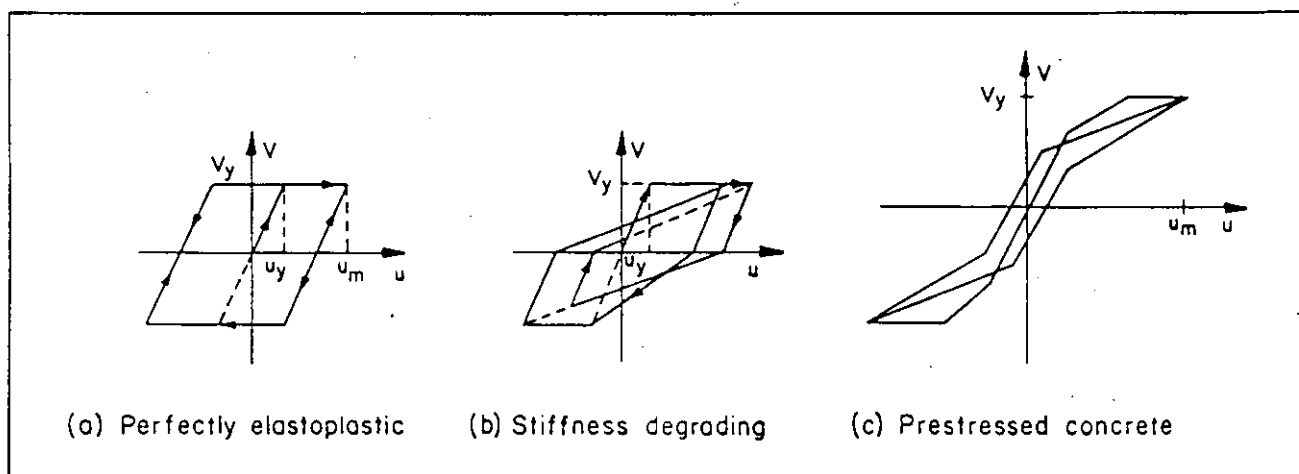


Fig. 4. Model of nonlinear behavior under cyclic loading.

The response of one-degree-of-freedom systems with the three models of nonlinear behavior to different ground motions has been studied. For the El Centro record, the difference in the maximum displacements (and the ductility demand) was negligible between the perfectly elasto-plastic and the stiffness degrading models. The response was significantly larger for the S-shaped model. Nevertheless, for systems with periods in the range between 1 and 1.5 seconds, the difference did not exceed 25 percent.

Analyses performed for the type of ground motion recorded in the soft soil of Mexico City indicated that, for periods larger than 1 second, the difference among the results for the three models was smaller than that obtained for the El Centro record. Since none of the buildings studied had shown significant evidence of inelastic behavior, the nonlinear analyses were intended to provide only an approximation to the theoretical inelastic deformation. Therefore, it was decided to use the elasto-plastic model because it required the least amount of computer time.

Another important simplification in the nonlinear analyses was the use of a planar model, which neglected the three-dimensional behavior of the building. A representative frame was selected for each orthogonal direction. A portion of the total mass of the building was assigned to this frame proportional to its relative stiffness. This simplification allowed the use of the widely known computer program called DRAIN-2D. Since the layout of the buildings was symmetrical, the planar system gave a reasonable estimate of the overall response.

In computing the strength of the members, the usual assumption of compatibility of deformations was used. All partial safety factors were eliminated. For beams, the yielding moment was used, and for columns, the complete interaction diagram for axial force and moment was defined by linear segments connecting three key points. Nominal values for the moduli of elasticity and the gross dimensions of the sections were assumed for the stiffness computation.

In a first stage computation, the nominal strengths of the structural

members selected were those normally used in design practice. In a second stage computation, the expected (average) strengths of structural members were used to estimate the most probable response of the buildings. Therefore, average material strengths and ultimate member capacities were used instead of specified values. Also, the contribution of the slab reinforcement to the flexural strength of the member was considered.

AMBIENT VIBRATION TESTS

The availability of high sensitivity accelerometers has allowed the measurement of very small vibrations experienced by buildings under normal operating conditions. Traffic, wind and micro-seismic activity produce small amplitude vibrations which can be recorded by suitably distributed instruments. Using this technique, the major dynamic properties of buildings, such as periods, shapes for the first modes and damping coefficients, can be determined.

In the lake zone of Mexico City, ambient vibrations are greatly amplified due to the flexibility of the soil; thus, free-noise signals are obtained. The technique has been widely used to determine dynamic properties of structures for different purposes, i.e., to check the validity of theoretical computations, to ascertain the influence of some specific factors such as the soil-structure interaction, or to evaluate the effectiveness of rehabilitation schemes in increasing the lateral stiffness of the building. The signals of one or more sensors are recorded, filtered and amplified, and their power spectra are computed through a spectrum analyzer. Typically, a large sample of measurements is taken and average spectra are used as results.

Measurements were taken in the five prestressed concrete buildings studied. A detailed description of the techniques and results is found in Ref. 9. The main objective of these measurements was to validate the analytical models used in this study. Results are summarized in Table 1. As an example, in Fig. 5 the acceleration spectrum for the vibration in the transverse

direction of the QRO Building is shown. At least three modal frequencies can easily be identified. In Fig. 6, the shapes of the first three modes in the transverse direction are shown for the same building. The translation and rocking of the building at the base can be clearly observed.

A study of the results shown in Table 1 depicts that, in general, the fundamental periods of the buildings are greater than those that would be desirable, at least for the direction with no infill walls. This indicates that the structural system adopted is very flexible and that large lateral displacements can be expected under seismic effects.

A good agreement is found between measured and computed periods, especially when the deformations at the base of the building are taken into account. The average error for the first translational mode is 1 percent and the coefficient of variation is 2 percent. Only for the buildings on soft soil were the vibration periods and the lateral displacements significantly increased due to the deformations (translation and rocking) at the base of the building.

It can be concluded that the modal and the dynamic properties assumed for the analysis were adequate to represent the dynamic responses of the buildings. Nevertheless, it must be appreciated that for larger amplitudes of vibration, as those induced by severe earthquakes, the level of stresses will be greater, the structural stiffness lower and, therefore, the vibration periods longer. This consideration tends to indicate that the model adopted overestimates the actual stiffness of the structure under severe ground motions.

Damping coefficients were computed from vibration records. A significant variation was found in different records for the same buildings. Therefore, for some cases, instead of a single value, a range of variation of the damping coefficients is given in Table 1. The overall range is between 2 and 5 percent, and it is very similar to that obtained from measurements in reinforced concrete buildings.

Since structural damping increases with the amplitude of vibration, it can be concluded that the 5 percent damp-

Table 1. Comparison of computed and measured periods for five prestressed concrete buildings.

Building identification	Type of soil	Number of stories	Type of structure	Direction of measurement*	Computed period (seconds)		Measured period (seconds)	Damping coefficient (percent of critical)
					Fixed	Base displacement		
QRO	Soft	11	Post-tensioned beams (cast-in-place)	T	1.16	1.34	1.39	4-5
				L	0.59	0.78	0.83	
				Θ	0.63	0.64	0.78	
TAM	Transition	10	Post-tensioned flat plate (cast-in-place)	T	0.72	0.77	0.73	3
				L	0.38	0.45	0.45	
				Θ	0.24	0.26	0.30	
TAC	Transition	5	Post-tensioned beams (cast-in-place)	T	0.97	1.00	1.00	—
				L	0.21	0.22	0.21	
				Θ	0.36	0.37	0.44	
IMP	Transition	5	Prestressed columns and beams (precast)	L	0.50	—	0.43	2-3
				T	0.77	—	0.78	
				Θ	0.52	—	0.52	
SMO	Firm	7	Prestressed columns and beams (precast)	T	0.54	—	0.54	2

* T = transverse (short) direction. L = longitudinal direction. Θ = rotational, in-plane vibration.

ing ratio assumed in the analysis is a reasonable estimate of what can be expected for moderate earthquakes — and it is probably conservative for very severe ground motions. On the other hand, the fact that similar damping coefficients are obtained for reinforced and prestressed concrete buildings does not mean that the same result will be obtained for large amplitudes of vibration. It is expected that reinforced concrete structures will show greater damping when subjected to high levels of stresses, due to the energy dissipation provided by opening and closing of flexural cracks and to more stable and fat hysteresis loops for well detailed members.

QRO BUILDING

This is a 10-story building located in the most severely damaged area of the city. Several buildings collapsed in a radius of 200 m (656 ft) from this structure. Its plan is relatively small and elongated, with one bay in the short (transverse) direction and five bays in the longitudinal direction (see Fig. 7).

The structure is cast-in-place with reinforced concrete columns and post-tensioned beams with grouted prestressing tendons. Mild steel reinforcement provides additional continuity at beam-to-column joints. All the bays of

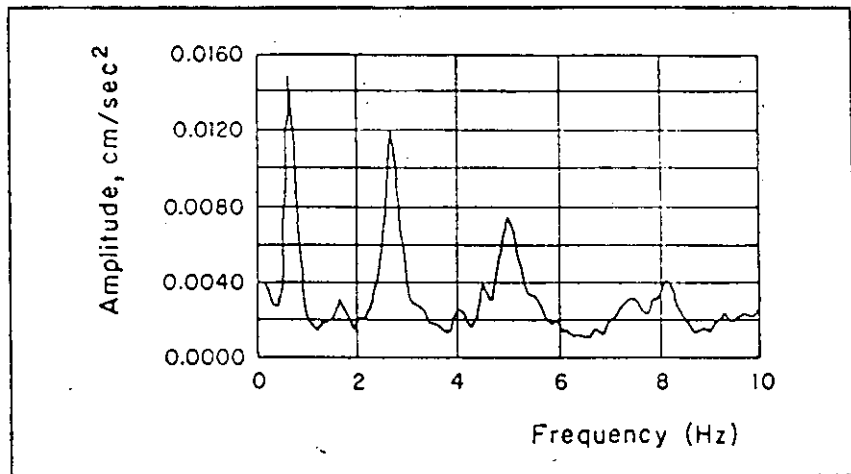


Fig. 5. Power spectrum of the motion at the roof of the QRO Building. Ambient vibration test in the transverse direction.

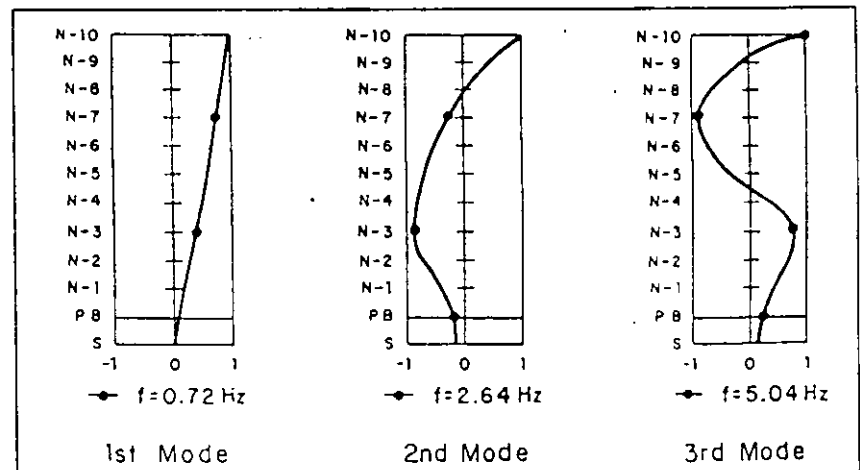


Fig. 6. Modal shapes of the vibration of the QRO Building in the transverse direction.

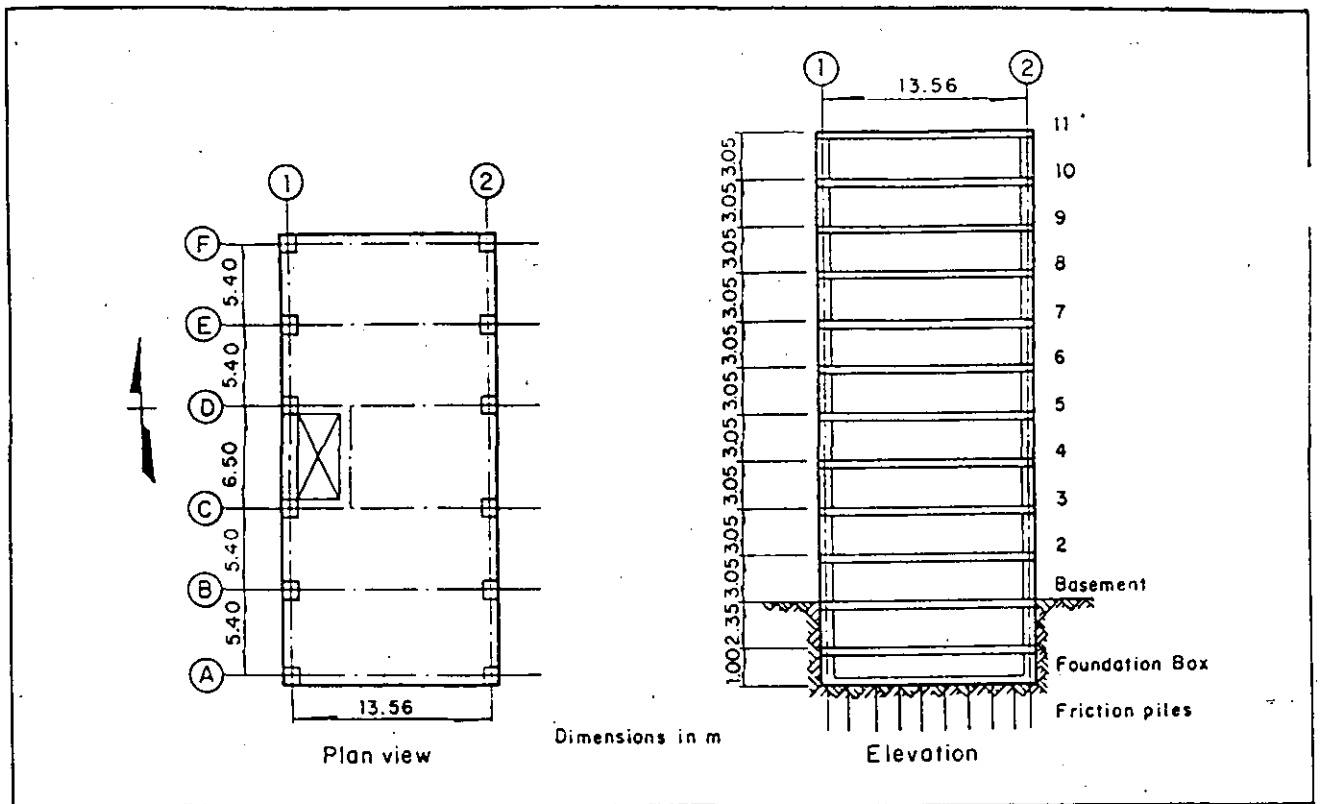


Fig. 7. Plan and elevation of the QRO Building.

the end frames in the longitudinal direction are infilled with brick walls, which provide a significant contribution to the lateral stiffness. Masonry walls also enclose the elevator and

staircase shafts. The building is founded on friction piles beneath a basement and a foundation box. Typical reinforcing details of structural members are shown in Fig. 8.

An inspection of the building after the earthquake revealed extensive cracking in the masonry walls around the elevator shaft and distorti falling of some ceiling panels.

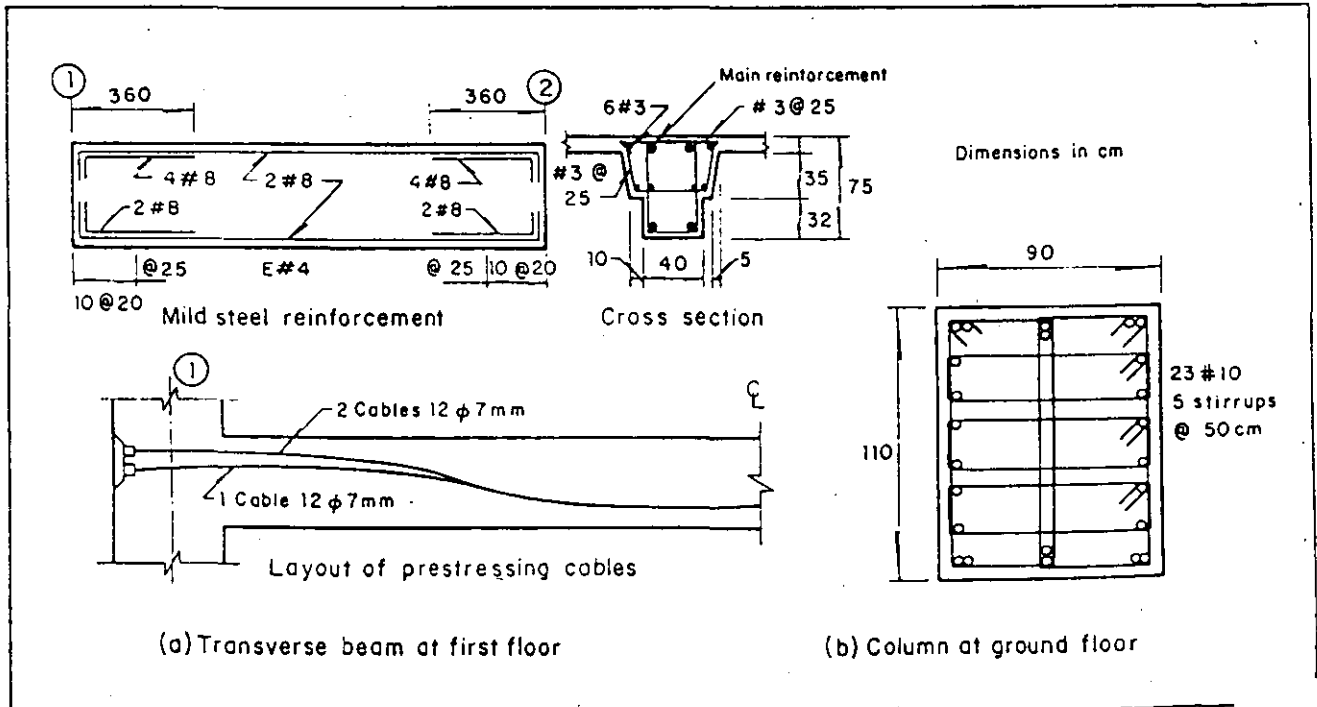


Fig. 8. Reinforcement details of structural members of the QRO Building.

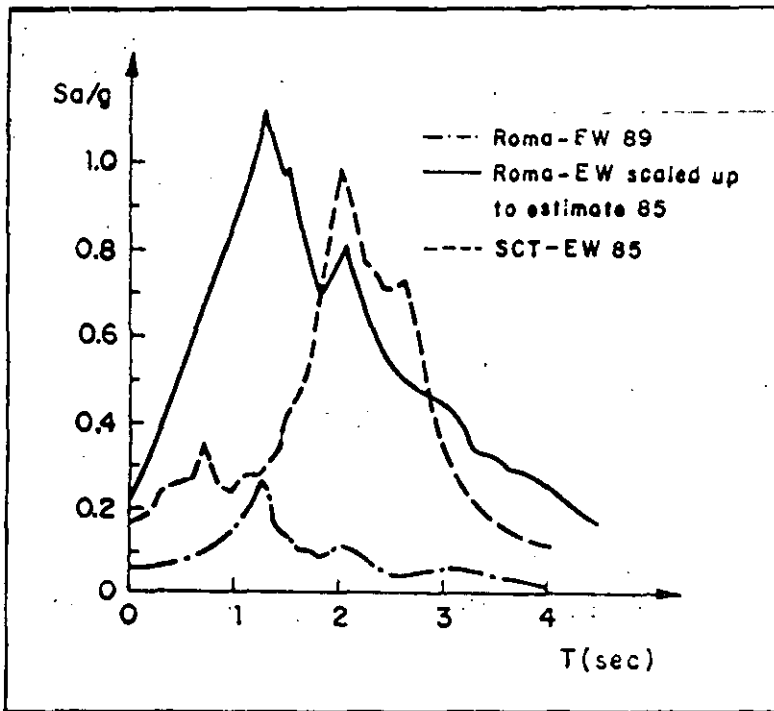


Fig. 9. Response spectra of ground motions used for the analysis of the QRO Building.

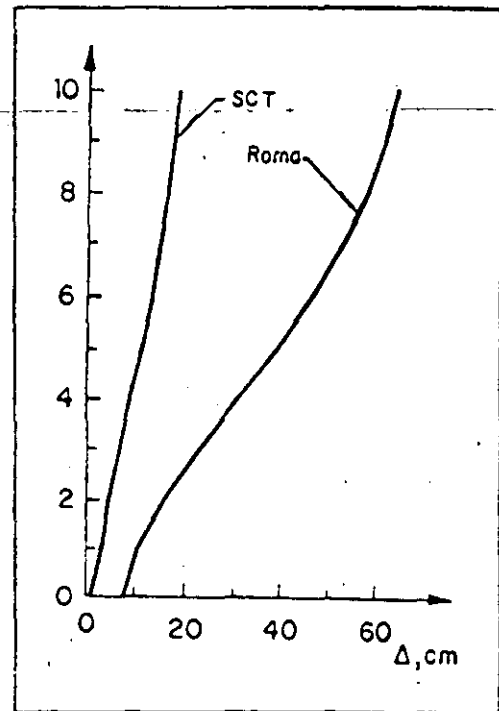


Fig. 10. Maximum lateral displacements using linear analysis for the QRO Building.

cracks were found in the main structural members. The building showed a significant tilting in its short direction (corresponding to about 2 percent of the building height).

It cannot be excluded that some tilting already existed before the earthquake, although it had not been noticed by the tenants. It is assumed that overturning moments, caused by the lateral forces, produced compressive forces on the piles in excess of those that could be transmitted through friction to the soil. Settlement and non-symmetrical vibration of the building were then generated.

The design of the building was checked against the requirements of the building code enforced at the time of the construction. The strength for gravity and lateral forces was found to be adequate; nevertheless, lateral displacements in the transverse direction significantly exceeded allowable limits. The current code includes much stricter requirements which are not satisfied by this building.

For the computation of the linear response of the building to the 1985 earthquake, two ground motions were used. First, the SCT record was chosen because it is the only actual record obtained for the most damaged area

where the building is located. After the earthquake, the network of seismic instruments was greatly enhanced in Mexico City. In particular, one instrument was placed at a distance of about 1000 m (3500 ft) from this building. Records of two moderate earthquakes have been obtained at this station, called ROMA.

For the same event, the amplitudes of the ground motion recorded at ROMA were consistently greater than that at the SCT site. There is convincing evidence that the response of the soil is linear in this area, even for very large earthquakes such as that of 1985, and that the shape of the linear elastic response spectrum remains essentially the same, except for a scale factor which depends on the earthquake intensity.¹⁰ Therefore, an estimate of the ground motion experienced at the ROMA site in 1985 can be made by multiplying the spectrum obtained in 1989 at this site by a scale factor obtained from other stations where both motions had been recorded.

In Fig. 9, the scaled-up ROMA 1989 spectrum is shown. This is significantly more severe than the SCT 1985 spectrum. This finding is consistent with the greater damage observed around the ROMA site with respect to

that at the SCT area. The factored (scaled-up) ROMA record was, therefore, also used to estimate the response of the QRO Building.

Only the response of the building to the ground motion in the transverse direction will be discussed. The effects in the other direction were significantly smaller, the response remaining essentially in the elastic range. The maximum lateral displacements at each floor level are shown in Fig. 10 for both ground motions. Fig. 11 compares the maximum bending moments induced at the beam ends with the resisting moments computed considering expected (average) material properties. At the left end of the beams, the comparison is made for the SCT record, and at the right end, for the factored ROMA record.

From the analytical results, it can be observed, firstly, that the factored ROMA motion produced a response exceeding that of the SCT motion by a factor of approximately 3. The difference is explained by the observation of the response spectra of the two records. For a period of 1.3 seconds, corresponding to the fundamental period of the QRO Building, the ratio of the spectral ordinates of the two records is 3.7. The fact that the ratio of

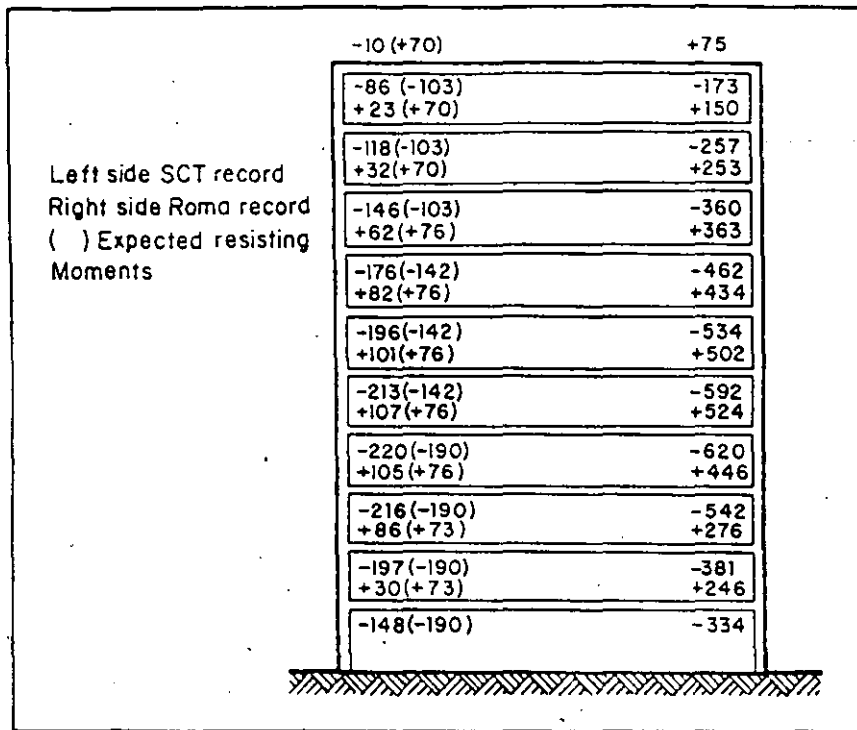


Fig. 11. Bending moments (ton-m) at beam end of the QRO Building.

the responses is similar to the ratio of spectral ordinates means that the structure responded essentially in the first vibration mode.

Secondly, the computed lateral displacements were extremely large. The maximum interstory drift was 0.7 percent for the SCT record and 2.5 per-

cent for the ROMA record. Lateral displacements of this order of magnitude should have caused significant structural damage.

Finally, the bending moments that should have been induced by the ground motions in the building, if the response remained linear elastic during

the earthquake, exceeded the flexural strength of the beams by a factor up to 15 percent for the SCT record and up to 240 percent for the ROMA record. The base shear force corresponding to a linear response is 0.30 and 0.55 of the total building weight, for the SCT and ROMA records, respectively.

The results of the nonlinear analysis for the SCT record indicated the formation of plastic hinges for positive and negative moments, as shown in Fig. 12, with a maximum ductility demand of 3. Under the effect of the factored ROMA record, the plastification was more widespread and the ductility demand much larger.

From the analysis, it is apparent that the observed response did not correspond to that predicted, since the lack of structural damage indicates that the structure remained linearly elastic. It cannot be excluded that some cracks formed during the vibration and then closed, leaving no visible evidence; nevertheless, strains in the steel and concrete could not reach the values indicated by the analysis.

It is assumed that the shaking actually induced in the building was much smaller than that which corresponded to the factored ROMA record and was probably also smaller than that of the SCT record. The reason for this can be attributed to the energy dissipation, associated with the loss of friction between the piles and soil, that took place at the base of the building.

Another possible reason for the difference is that the actual strength of the structural members significantly exceeded that computed by conventional design methods. Some additional comments on this issue will be made in the final section of this paper.

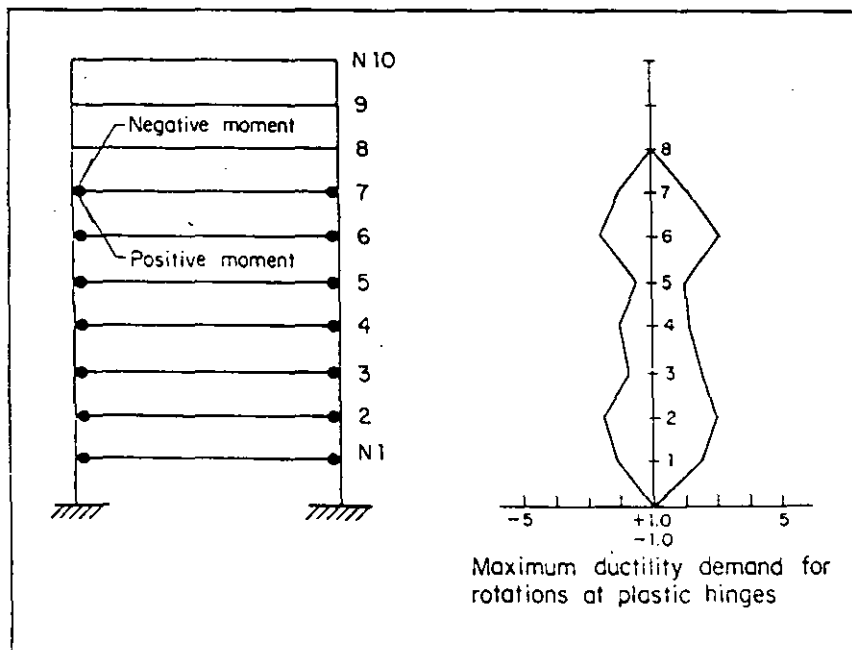


Fig. 12. Distribution of plastic hinges and maximum ductility demand for the SCT accelerogram in the QRO Building.

TAM BUILDING

This eight-story office building is located at the boundary of the lake bed area, where the depth of the soft clay deposits is about two-thirds of that at the QRO Building. In 1985, the damage in the area was moderate, indicating that the amplitude of the shaking was significantly less than that in the most damaged zone. The building has a cast-in-place concrete waffle slab supported by reinforced concrete columns.

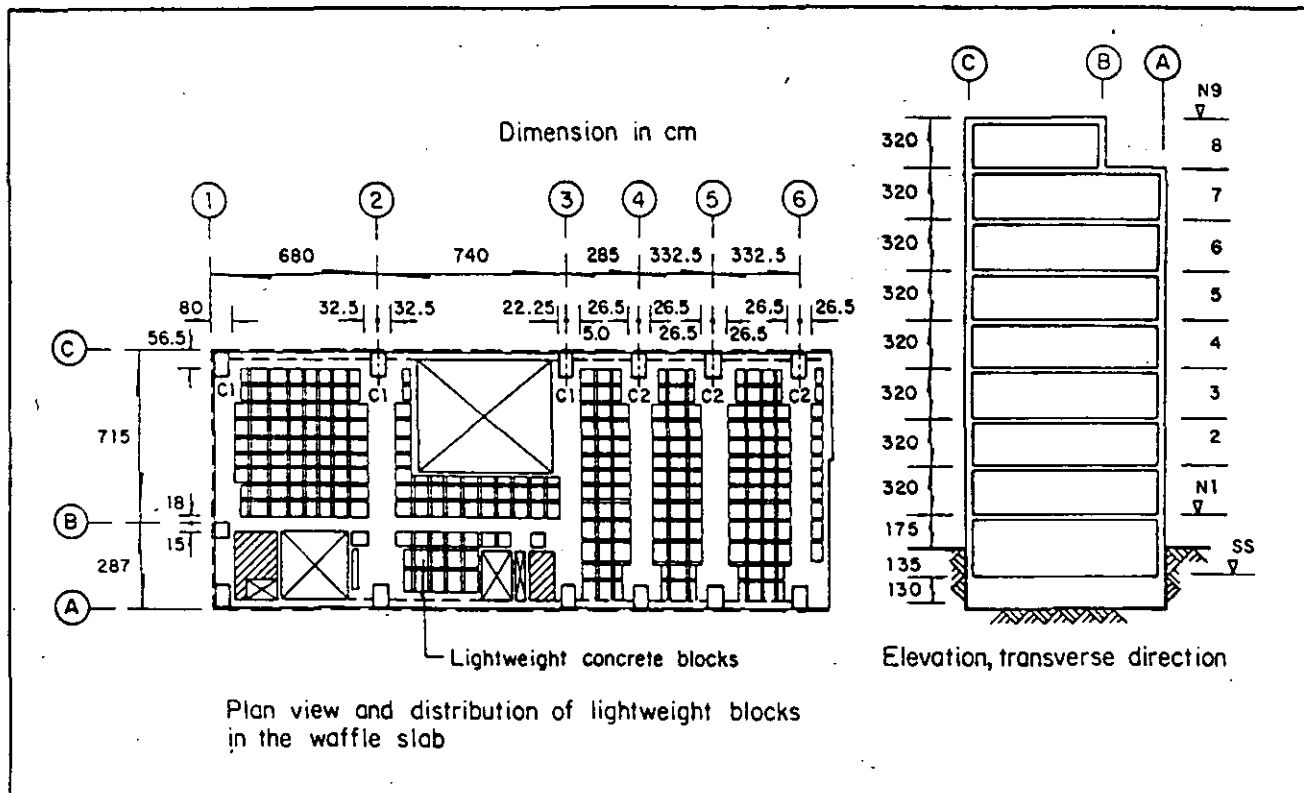


Fig. 13. Plan and elevation of the TAM Building.

The ribs of the waffle slab on the column lines are post-tensioned. Mild steel reinforcement in the ribs is very light, particularly for positive moments. Additional mild steel reinforcement is located at the solid zones

around the columns, in both directions and in both faces. Thus, a sharp reduction in bending strength developed at the perimeter of the solid zone.

The end bays in the longitudinal direction are filled with masonry walls.

Interior partitions are of flexible materials. The foundation is through point bearing concrete piles. A sketch of the structure is shown in Fig. 13 and the reinforcement of principal members is shown in Fig. 14. No evidence of

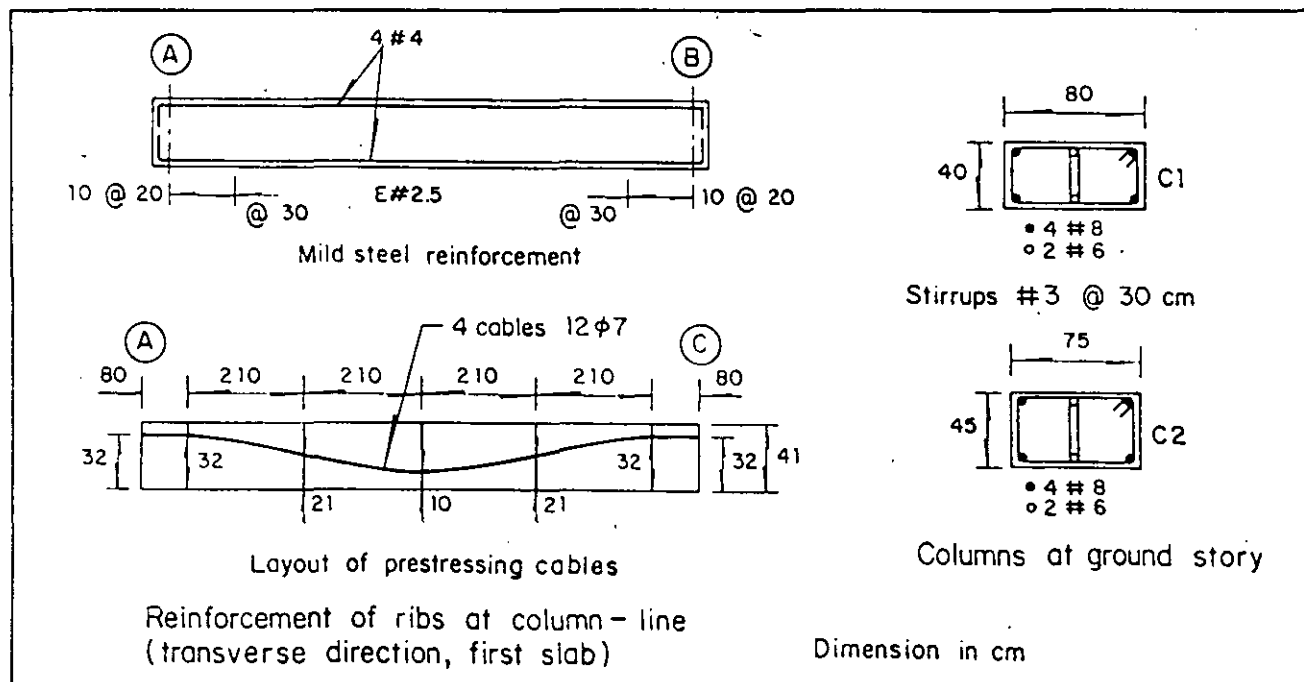


Fig. 14. Typical reinforcing details of structural members of the TAM Building.

damage was found when the building was inspected. Tenants mentioned that large lateral displacements were felt and that light non-structural damage was caused by the earthquake.

The study of the dynamic properties of the analytical model showed that the effect of the soil-structure interaction was small for this building, as can be deduced from the small difference between the fundamental periods computed for the model fixed at the foundation and the one considering deformation at the base (see Table 1).

Since the building was located at the boundary of the lake zone, it was analyzed both for the effect of the SCT and VIV ground motions. Maximum lateral displacements are shown in Fig. 15. For the SCT records, interstory drifts in some stories reached values that are commonly associated with structural damage. Bending moments in the beams at column faces exceeded resisting values.

The situation was particularly critical for positive moments at the perimeter of the solid zone, where, due to the very low amount of reinforcement, a very limited flexural strength was available once seismic moments exceeded the effects of verti-

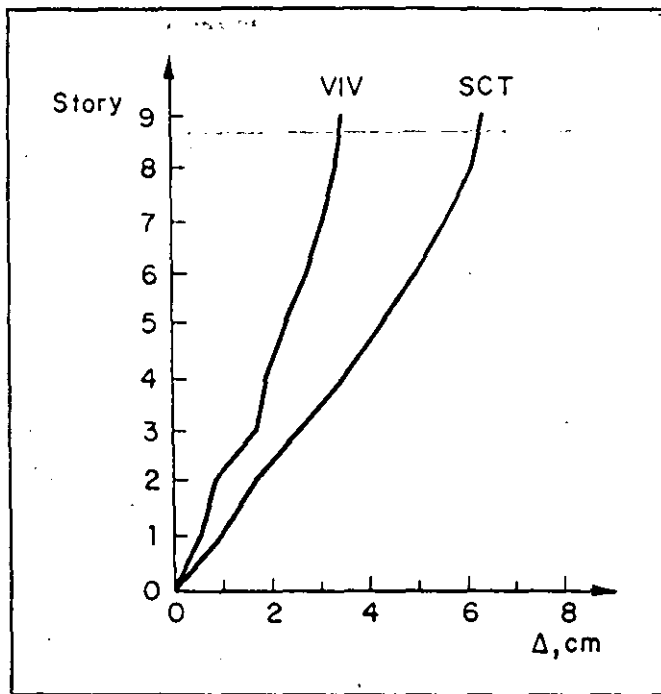


Fig. 15. Maximum lateral-displacements in the TAM Building.

cal loads. Ductility demands at some sections exceeded 10.

Under the VIV record, the displacements were moderate and the internal forces did not exceed the resisting values. The base shear force induced by the SCT record corresponded to 21 percent of the building's weight, compared to 10 percent for the VIV record.

It is assumed that the ground motion at the site of this building was much lower than in the most affected area, being closer to the VIV record than to the SCT record. The building is rather weak and flexible in the

transverse direction and would have been significantly affected by the earthquake if situated in the most critical zone.

OTHER BUILDINGS

The three other buildings under study are located in areas where the seismic effects were smaller, and none of them experienced any damage. They will be described briefly. Further details on their properties and on the analytical results can be found in Ref. 7.

- The building labeled as TAC is a four-story structure which is used for the storage of furniture. Its story height [6.8 m (22.3 ft)] is greater than usual, giving rise to a total height of 27.2 m (89.2 ft), roughly corresponding to a typical eight-story building. It is located at the foot of the hills on the west side of the city, where the area of firm soil begins. There are only a few meters of soft soil over the solid strata.

The structural system is composed of cast-in-place concrete frames with rather long spans (10 and 11.7 m (32.8 and 38.4 ft)). Beams are post-tensioned with draped tendons. Mild steel reinforcement at the ends of beams is small. The

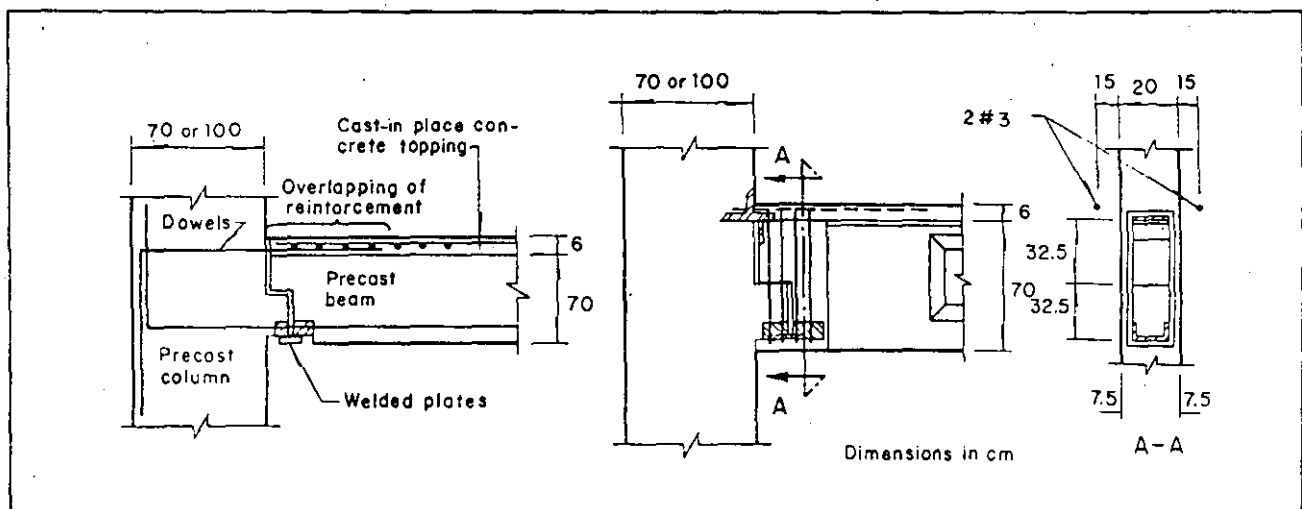


Fig. 16. Details of beam-to-column joint in the IMP Building.

very similar to those that have been determined in non-prestressed, reinforced concrete buildings. It must be emphasized that ambient vibration tests correspond to very low stress levels in the structural members, and that for larger vibrations, as those induced by severe earthquakes, both the damping and period increase. Then, the damping coefficient of 5 percent, which is generally assumed for seismic design, appears reasonable.

Since there were no instruments to measure the responses of the buildings or the motions induced at their bases, no quantitative comparison can be made between the actual and the computed responses to the 1985 earthquake. Furthermore, significant variations in ground motions originated by the same earthquake, even between nearby sites, make it difficult to estimate the shaking experienced by a particular building. For these reasons, only very general conclusions can be drawn.

Three of the five buildings were located in areas where the amplitude of the ground shaking in 1985 was moderate. Therefore, the analyses showed that the response should have remained in the linear elastic range of behavior, which is in agreement with the lack of damage experienced by the buildings.

Another building (TAM), with a post-tensioned flat plate system, was particularly flexible and weak in one direction. The analyses showed that it should have undergone large inelastic deformations if it were affected by the ground motion measured in the most damaged area. It is assumed that its good behavior is partially due to a structural capacity in excess of that computed by analytical methods, and mainly to the fact that the ground shaking at this particular site was weaker than in the critical area.

The most interesting case is that of the QRO Building, which is located in an area where the ground motion was

particularly strong. The lack of severe damage in this building can probably be explained by the fact that the energy induced by the shaking was mainly dissipated by the nonlinear deformations between the foundation and the soil, rather than by inelastic behavior in the structure.

CONCLUSIONS AND RECOMMENDATIONS

It is important to emphasize that the five prestressed concrete frame structures showed good behavior under a severe earthquake, without any sign of distress in the joints or elsewhere. This suggests that, by following the much stricter code practice now accepted for this type of structure, an adequate safety level can be obtained for even the most severe seismic conditions.

On the other hand, particular care must be given to some structural design features which were common to the buildings under study, as well as to most prestressed concrete buildings in Mexico. These features must be significantly improved in order to attain an adequate seismic safety level.

The structural system must be laterally stiffer and stronger than that provided by the rather slender frame members typically used in the buildings under consideration. This can be attained by using more robust columns and beams, but, preferably, by adding stiffening members such as shear walls or braces. The advantage of having stiff structures is particularly important for buildings located on soft soil, where the long periods prevailing in the ground motion particularly affect flexible structures.

Flexural capacity at beam-to-column joints must be increased, especially with regard to positive moments. The concept of partial prestressing, in which the capacity to resist seismic effects is mainly assigned to mild steel reinforcement, must be favored because of the greater ductility and continuity that can

be obtained from this method as compared with full prestressing.

Reinforcement detailing in beams, columns and joints must be improved to attain larger ductilities. In particular, the confinement of concrete and longitudinal steel in sections of possible formation of plastic hinges, must be achieved using closely spaced transverse reinforcement.

When precast concrete elements are used in floor slabs, measures must be taken to ensure that they constitute a stiff horizontal diaphragm — for example, by casting a thick reinforced concrete topping. Otherwise, in-plane distortion of the slabs and a concentration of lateral forces in some frames could occur.

The importance of instrumenting prestressed concrete buildings to record their responses to seismic effects must be emphasized. Only in this way could the analyses and design methods discussed be fully validated. The frequent seismic activity in the Mexico City Valley and the large variety of types of structures existing in the area make it a particularly convenient site for seismic instrumentation of buildings.

ACKNOWLEDGMENT

This paper is based on the work performed by the first author for his doctoral dissertation at the Ecole Nationale des Ponts et Chaussées (Paris) under the supervision of Professor Bernard Halphen. The ambient vibration tests of the five buildings were performed at the Institute of Engineering at UNAM, under the direction of David Muría-Vilá, and with sponsorship of the Mexican Association of Prestressed and Prefabricated Concrete Producers. The assistance of Jorge Avila, of the Institute of Engineering, in the analyses of the buildings is also greatly appreciated, as well as the careful revision of the manuscript by Sergio Alcocer.

REFERENCES

1. Blakeley, P., "Prestressed Concrete Seismic Design," *Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering*, V. 6, No. 1, 1973, pp. 2-21.
2. Rosenblueth, E., and Meli, R., "The 1985 Earthquake: Causes and Effects in Mexico City," *Concrete International*, V. 5, No. 6, May 1986, pp. 23-34.
3. Fintel, M., "Performance of Precast and Prestressed Concrete in the Mexico Earthquake," *PCI JOURNAL*, V. 31, No. 1, January-February 1986, pp. 18-42.
4. Camba, J. L., "Comportamiento de las Estructuras de Concreto Presforzado en la Ciudad de México Durante el Sismo de 1985" (Behavior of Prestressed Concrete Structures in Mexico City During the 1985 Earthquake), *IMCYC Review*, No. 186, Mexico, November 1986.
5. Meli, R., and Avila, J. A., "The Mexico Earthquake of September 19, 1985, Analysis of Building Response," *Earthquake Spectra*, V. 5, No. 1, February 1989, pp. 1-18.
6. Meli, R., "Seismic Design of Masonry Buildings — The Mexican Practice," *Proceedings, Fifth North American Masonry Conference*, V. 1, Urbana, IL, June 1990, pp. 1-12.
7. Camba, J. L., "Comportement Face aux Seismes de Cinq Batiments en Béton Précontraint Situés dans la Ville de Mexico" (Seismic Behavior of Five Prestressed Concrete Buildings Situated in Mexico City), Doctoral Dissertation, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, France, October 1991.
8. Dowrick, D. J., *Earthquake Resistant Design*, Second Edition, John Wiley & Sons, New York, NY, 1987.
9. Muriá-Vilá, D., "Características Dinámicas de Tres Edificios de Concreto Presforzado en la Ciudad de México" (Dynamic Characteristics of Three Prestressed Concrete Buildings in Mexico City), Institute of Engineering, UNAM, Interim Report No. 9711, August 1989.
10. Singh, S. K., Lermo, J., Domínguez, T., Ordaz, M., Espinoza, J. M., Mena, E., and Quas, R., "A Study of Amplification of Seismic Waves in the Valley of Mexico with Respect to a Hill Zone Site," *Earthquake Spectra*, V. 4, No. 4, November 1988, pp. 653-674.



**FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA**

XX CURSO INTERNACIONAL DE INGENIERIA SISMICA

MODULO III: DISEÑO SISMICO DE EDIFICIOS

REFUERZOS DE ESTRUCTURAS

ING. OSCAR DE LA TORRE RANGEL

EVALUACION Y REPARACION ESTRUCTURAL DE EDIFICIOS

Ing. Oscar de la Torre Rangel.
Gerente General - Proyecto Estructural, S.A. México, D.F. (1994)

A). EVALUACION ESTRUCTURAL

A.1 RECONOCIMIENTO Y EVALUACION DEL COMPORTAMIENTO GENERAL.

- A.1.1 Reconocer hundimientos y desplomes generales, referenciando aristas de fachadas con las edificaciones vecinas, y observando grietas, ondulaciones o corrimientos en banquetas, calles y posibles movimientos relativos en las juntas con colindantes.
- A.1.2 Identificar el sitio con respecto a la zonificación del Reglamento de Construcciones.
- A.1.3 Identificar presencia de edificaciones o de instalaciones importantes cercanas, como metro, lumbreras, drenaje profundo, subestaciones, pozos profundos, torres de transmisión, edificios altos dentro de la manzana con posibles pilotes de punta.
- A.1.4 Ubicándose en la azotea del inmueble, reconocer posibles movimientos en las juntas con colindantes, rotura de tapajuntas, golpes entre edificios, materiales atrapados entre edificaciones vecinas.
- A.1.5 Verificar el uso del área útil de cada piso, el tipo de cancelería, así como sus movimientos, fractura de vidrios, fractura de recubrimientos, corrimientos en plafones, falla de instalaciones hidráulicas y sanitarias, y funcionamiento de elevadores o montacargas.
- A.1.6 Verificar en el cubo de escaleras fisuras o fracturas de recubrimientos, muros y rampas.
- A.1.7 Verificar el interior del cubo de elevadores y muros del sótano, para reconocer fracturas, desplomes, deformaciones de guías mecánicas y fugas de agua.
- A.1.8 Investigar el tipo de documentación disponible y propósito futuro de propietario en cuanto al uso del inmueble y posibilidades de adecuación al nuevo reglamento:

PROPOSITOS Y OBJETIVOS EN ESTA ETAPA

- 1). Definir la categoría del inmueble (A) ó (B), así como la posibilidad de una nueva imagen arquitectónica y cambio de uso de áreas.
- 2). Conocer la documentación disponible.
- 3). Establecer y programar los estudios y trabajos siguientes:

3). Establecer y programar los estudios y trabajos siguientes:

- 3.a. Levantamiento geométrico estructural, plomos y niveles.
- 3.b. Levantamiento de fisuras y daños estructurales y de recubrimientos.
- 3.c. Sondeos y calas para conocer selectivamente armados y calidad de materiales.
- 3.d. Sondeos y calas para conocer el tipo de cimentación.
- 3.e. Exploración del subsuelo.
- 3.f. Sondeos y calas para identificar el tipo de "empaque" entre muros y estructura.
- 3.g. Sondeos y calas retirando recubrimientos, para detectar fisuras de losas en especial en las cercanías con elementos de rigidez (cubos de elevadores y escaleras y colindancias), para establecer si el trabajo como diafragma horizontal las hubiera provocado. Ver tabla anexa y comentarios sobre el tamaño de fisuras y grietas. (hojas 9 y 10)

4). Definir si las deformaciones generales de la estructura, durante eventos sísmicos provocaron los daños visibles en recubrimientos, acabados y grietas estructurales, así como en muros de relleno o de rigidez. El propietario debe conocer las deformaciones límites que establece el reglamento, y se decidirá de común acuerdo la estrategia y posibilidades de reparación local y/o reestructuración.

Si no hubiera daños visibles, y las fisuras no son debidas a movimientos sísmicos, debe plantearse la conveniencia de preparar documentación suficiente, que deje constancia de la capacidad estructural, para futuras acciones sísmicas.

A.2 EVALUACION DE LA CAPACIDAD ESTRUCTURAL BAJO ACCIONES SISMICAS

A.2.1. Edificaciones con muros de carga.

Si la edificación tiene menos de 13 metros de altura cabe la posibilidad de que cumpla o pueda fácilmente adecuarse, para que cumpla con las condiciones de aplicabilidad del método simplificado de análisis, previsto en el reglamento, en cuyo caso, no es necesario verificar la seguridad contra el volteo, ni calcular deformaciones horizontales, ni tomar en cuenta efectos de torsión.

Sólo tiene que verificarse que la suma de resistencias de muros en cada piso sea igual o mayor que la carga actuante sísmica factorizada en cada dirección principal.

A.2.2 Evaluación simplificada de estructuras de concreto.

Para edificaciones de mediana altura se ha desarrollado en Japón un procedimiento para evaluación de la capacidad sísmica de edificios existentes de concreto reforzado, y que ha sido adaptado para su uso en México por la UAM Azcapotzalco.

El resultado estimado para un edificio, no representa el nivel o rango de comportamiento sísmico, pero sí un índice que representa la potencial capacidad contra una intensidad sísmica en forma cualitativa.

Básicamente este procedimiento originado en Japón, se ha estado aplicando para edificios de 6 pisos o menos, con un sistema estructural a base de marcos con columnas o traves de concreto con o sin muros de cortante.

Para edificios de más de 30 años, con deterioro severo, con exposición eventual a fuego, con concretos de muy baja resistencia o con un sistema estructural híbrido o sin definición clara, el procedimiento o norma Japonesa no es aplicable.

El procedimiento de evaluación desarrollado en la UAM Azcapotzalco y derivado de la norma japonesa, consiste en definir el coeficiente sísmico reducido por ductilidad correspondiente a la condición de falla, denominado coeficiente de resistencia " k_i " y expresado como sigue:

$$k_i = \frac{(V_R)_i}{(V_A)_i} S$$

en donde:

- $(V_R)_i$ es la fuerza cortante resistente en el entrepiso i
- $(V_A)_i$ es la fuerza cortante actuante en el mismo entrepiso i
- S factor correctivo

Suponiendo que la falla de entrepiso, se localiza en los elementos verticales de sustentación, la fuerza cortante resistente se calcula mediante la combinación de su resistencia proporcionalmente a sus rigideces, (Iglesias, UAM 1987)

Recientemente los mismos estudios en la UAM han tratado de simplificar las evaluaciones, de tal forma que para un edificio típico de mediana altura con materiales comunes en nuestro medio $(V_R)_i$ se calcula multiplicando las áreas transversales de los elementos estructurales verticales del entrepiso, por el esfuerzo cortante resistente promedio para cada una de las piezas estructurales de que se trate.

La fuerza cortante actuante $(V_A)_i$ para el mismo entrepiso i estudiado, se calcula con el método estático del reglamento de construcciones, aplicando el factor de carga que le corresponda, según la categoría de la edificación.

$$(V_A)_i = (F.C.) \frac{\sum_{j=i}^n \omega_j h_j}{\sum_{j=1}^n \omega_j h_j} W_{TOR}$$

- n = número de pisos
- ω_j = peso del piso j

h_j = altura del piso j desde el nivel del terreno

(F.C.) = Factor de carga (1.1)

W_{TOT} = peso total de la estructura

El factor correctivo (S), toma en cuenta la influencia que sobre la resistencia tienen las irregularidades geométricas, problemas de cimentación, afectaciones de estructuras colindantes y el deterioro propio de la estructura.

Este procedimiento ha sido empleado en un número importante de edificaciones para el D.F., y reducido a 162 casos para fines de zonificación sísmica en el D.F., y ha sido calibrado satisfactoriamente con evaluaciones detalladas.

Recientemente en la misma UAM, se han hecho estudios complementarios mediante los cuales se pueden estimar también en forma aproximada los desplazamiento y el período fundamental de las estructuras típicas del D.F.

En el proceso de evaluación simplificada, aparece una clasificación de daños causados por sismo, que es básica también en la norma japonesa, y que puede dar una buena idea y ayudar al ingeniero estructurista para tomar su desición final ó dictámen de una edificación, por lo que se reproduce a continuación:

TIPO DE DAÑO	DESCRIPCION
0 No estructural	Daños unicamente en elementos no estructurales.
1 Estructural ligero	Grietas de menos de 0.5 mm, de ancho en elemntos de concreto. Grietas de menos de 3.0 mm de ancho en muros de mampostería.
2 Estructural fuerte	Grietas de 0.5 a 1.0 mm de ancho en elementos de concreto. Grietas de 3 mm a 10 mm de ancho en muros de mampostería.
3 Estructural grave	Grietas de más de 1 mm de ancho en elementos de concreto. Aberturas en muros de mampostería. Desprendimiento del recubrimiento en columnas. Aplastamiento del concreto, rotura de estribos y pandeo del refuerzo en vigas, columnas y muros de concreto. Agrietamiento de capiteles. Desplomes en columnas. Desplomes del edificio en más del 1% de su altura. Hundimiento o emersión de más de 20 cms.

Si el menor de los valores k_i , corresponde sensiblemente al coeficiente sísmico reducido por ductilidad de acuerdo al reglamento, deberá identificarse en ese piso (i), el grado de daños existentes en la edificación, ya que este valor representa un índice de las condiciones de falla.

Las conclusiones que el ingeniero estructurista, y el director responsable de obra puedan dar al propietario, deben apegarse al Reglamento de Construcciones, para poder tomar la decisión y responsabilidad compartida que cada uno de los casos amerita.

A.2.3 Evaluación detallada

Es cada vez más fácil, con programas para computadoras P.C. realizar el análisis estructural de la edificación, en forma espacial, más confiable a medida que los datos recabados geométrico-elásticos lo sean.

Los resultados de deformaciones entre pisos consecutivos, así como los elementos mecánicos de trabes, columnas, muros y acciones sobre la cimentación, serán correlacionados con los daños observados para un coeficiente sísmico dado por el reglamento en vigor y servirán al ingeniero estructurista para proponer al propietario la acción a tomar, ya sea de reparación local, demolición o reestructuración.

Personalmente estimo "razonable", atender a la respuesta de deformación, más que a la capacidad estructural de trabes, columnas y muros para decidir la mejor forma de reestructuración, pero el "arte" de cada estructurista puede variar según el caso a tratar. A continuación se presentan conceptos generales de reestructuración y detalles constructivos que he tratado de agrupar y precisar cada vez más, esperando aportaciones y comentarios de colegas.

B) REFUERZO DE ESTRUCTURAS

B-1). INTRODUCCION

Los conceptos, estudios y trabajos siguientes, pueden confundirse, pero tratan de conseguir una respuesta aceptable de una estructura existente ante la acción de fuerzas horizontales sísmicas.

B.1.1 REHABILITACION	(RETROFITTING)
B.1.2 REPARACION	(REPAIR)
B.1.3 REFORZAMIENTO	(STRENGTHENING)
B.1.4 RIGIDIZACION	(STIFFENING)

Estos estudios y trabajos representan un arte personal o de grupo, que rápidamente se están convirtiendo en una ciencia, debidamente apoyada por:

- INVESTIGACION Y ENSAYES.
- PROCEDIMIENTOS CONSTRUCTIVOS EFICIENTES Y REALIZABLES.
- VERIFICACION DEL COMPORTAMIENTO POST SISMOS.

A medida que crece el apoyo técnico y variedad de soluciones, así como materiales nuevos, se pueden idear mejores y más numerosas soluciones para lograr el objetivo final que es el comportamiento o respuesta aceptable de la estructura.

B.2). OBJETIVO

Lograr un mejor comportamiento o respuesta estructural, ante futuras acciones sísmicas.

El concepto del comportamiento o respuesta estructural debe definirlo el estructurista de común acuerdo con el propietario y/o usuarios, para establecer o definir la solución de refuerzo o rehabilitación.

La respuesta de una estructura puede modificarse, para cubrir diferentes requerimientos, desde la seguridad de vidas humanas, hasta el control riguroso de daños en la propia estructura y sus elementos, accesorios o contenidos.

Por lo anterior, no existe la solución "óptima" o "única" que logre el objetivo establecido, pero al confrontar diversas experiencias y resultados, se pueden establecer los siguientes conceptos:

- B.2.1 Diferentes criterios de comportamiento, llevan a diferentes conceptos de refuerzo.
- B.2.2 Las condiciones del sitio pueden obligar a un tipo de soluciones.
- B.2.3 Para estructuras de pocos pisos, pueden existir diferentes soluciones que llevan a comportamientos comparables.
- B.2.4 Para estructuras de alturas mayores (no edificios altos) en suelos poco compresibles, el uso de muros de rigidez puede representar mejor solución que contraventeos diagonales, especialmente contra colapso.
- B.2.5 El uso de elementos de rigidez como muros de concreto o mampostería enmarcados, no es compatible con el uso de contraventeo diagonal metálico en una misma estructura, ya que el trabajo eficiente de estos últimos, opera después que un elemento de rigidez ha sufrido daño.

B.3 PROCEDIMIENTOS PARA REFUERZO.

- B.3.1 Sin cambiar el sistema resistente a fuerzas laterales.
 - B.3.1.1 Reforzando las losas para que su efecto como diafragma horizontal sea más eficiente, especialmente si sufrieron agrietamiento.
 - B.3.1.2 Reforzando trabes, columnas y/o muros existentes, para garantizar que su sección transversal, participe con toda su área e inercia, además de que resistan los elementos mecánicos que les correspondan.
 - B.3.1.3 Mejorando o rehaciendo la unión entre elementos estructurales existentes, para garantizar su trabajo de conjunto previsto en el diseño original o en la revisión.
 - B.3.1.4 Recimentando para reducir la amplificación de efectos, por volteo del conjunto o por desplazamiento excesivo de la cimentación.

B.3.2 Cambiando el sistema resistente a fuerzas laterales.

B.3.2.1 Introduciendo nuevos elementos a la estructura original, como muros de rigidez, contraventeos diagonales, columnas y travesaños nuevas.

B.3.2.2 Eliminando piezas estructurales del proyecto y construcción originales como muros, contraventeos, etc., de modo que no participen más para resistir fuerzas laterales.

B.3.2.3 Recimentando, para modificar las condiciones de apoyo de columnas, muros ó contraventeos así como para reducir las características de volteo y/ó desplazamiento del conjunto.

En cualquiera de los dos procedimientos, el trabajo simultáneo entre diferentes piezas debe ser garantizado, a menos que se pretenda aprovechar las características de ductilidad de algunos elementos, cuya participación completa y eficiente, sucede después de que otras piezas o elementos han sufrido daño parcial "aceptable".

En general creo que es válido generalizar, que además de evitar colapso y salvar vidas humanas debe procurarse que el comportamiento estructural garantice la continuidad de funcionamiento en operación del inmueble, este concepto no es fácil asociarlo al aprovechamiento de ductilidad como se dijo en el párrafo anterior.

En todos los casos la "integración" o "incorporación" total y completa de nuevos elementos estructurales debe garantizarse, de tal modo que la estructura reforzada responda como si estas nuevas piezas hubieran estado presentes desde la construcción original.

Los siguientes croquis, esquemas, detalles y recomendaciones han sido propuestos por el autor, y construidos en diversas edificaciones, algunos de ellos sin respaldo suficiente de pruebas o investigaciones como pudieran desearlo otros estructuristas, y siempre serán objeto de adecuación y optimización para cada proyecto de refuerzo y ojalá en el futuro cercano, este arte llegue a convertirse en ciencia que aprovechemos todos.

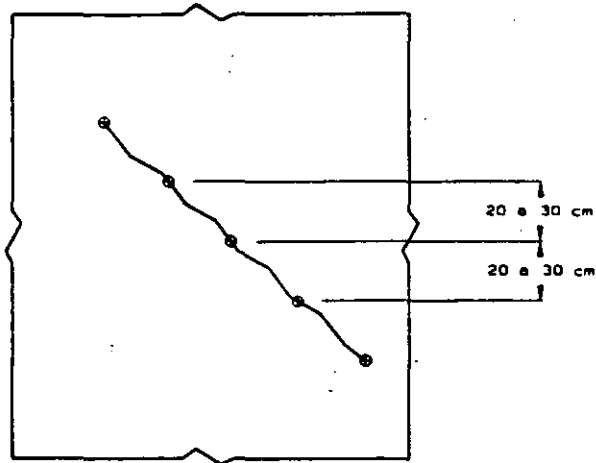
FISURAS Y GRIETAS

ANCHOS TOLERABLES EN FISURAS O GRIETAS EN CONCRETO ARMADO (A.C.I)

CONDICIONES EXTERNAS (EXPOSICION)	ANCHO TOLERABLE mm
AIRE SECO O MEMBRANA PROTECTORA	0.40
HUMEDAD - AIRE SECO SUELO (TIERRA)	0.30
PRODUCTOS QUIMICOS PARA DESHIELO	0.20
AGUA MARINA - BRIZA MARINA HUMEDECIDO - SECADO	0.15
MUROS DE CISTERNA O RETENEDORES DE AGUA	0.10

NOTAS SOBRE RELLENADO DE FISURAS O GRIETAS

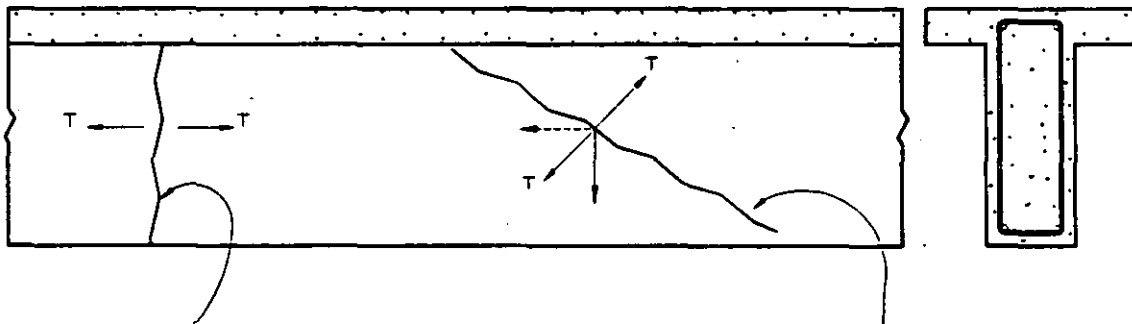
- 1.-) El rellenar fisuras de 0.5 mm y mayores, con resina epóxica, produce mayor seguridad sobre la suposición teórica de área completa e Inercia efectiva en la sección transversal.
- 2.-) El proceso de rellenado debe hacerlo personal especializado, con calafateo previo, para decidir inyección simple o a presión.
- 3.-) Después de efectuar un primer proceso de rellenado, es muy conveniente verificarlo, ya sea con ultrasonido o con extracción de muestras.



4.-) El proceso de rellenado de una fisura se hace de abajo hacia arriba, para evitar aire atrapado, calafateando previamente el tramo por inyectar.

Se inicia el relleno inyectándolo por el taladro 1, hasta que la resina se manifieste, escurriendo por el taladro 2.

Se repite el proceso para el rellenado del tramo 2 3 inyectándolo por el taladro 2, y así en tramos superiores hasta completar todo el desarrollo de la fisura.

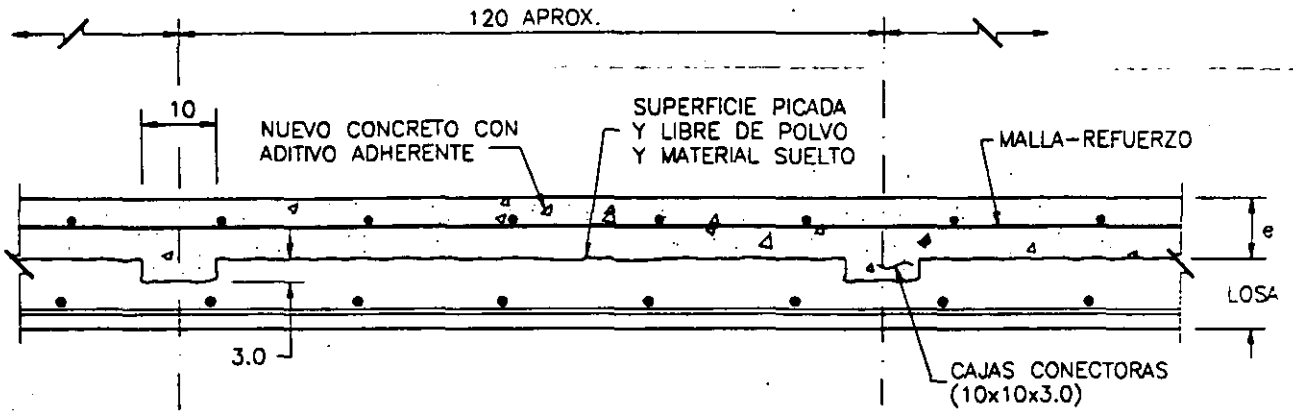


Grieta o fisura debida a contracción volumétrica; y es muy probable que se presenten durante el proceso de fraguado del concreto, por defecto de curado.

Generalmente no pasan a la losa y coinciden con la posición de los estribos.

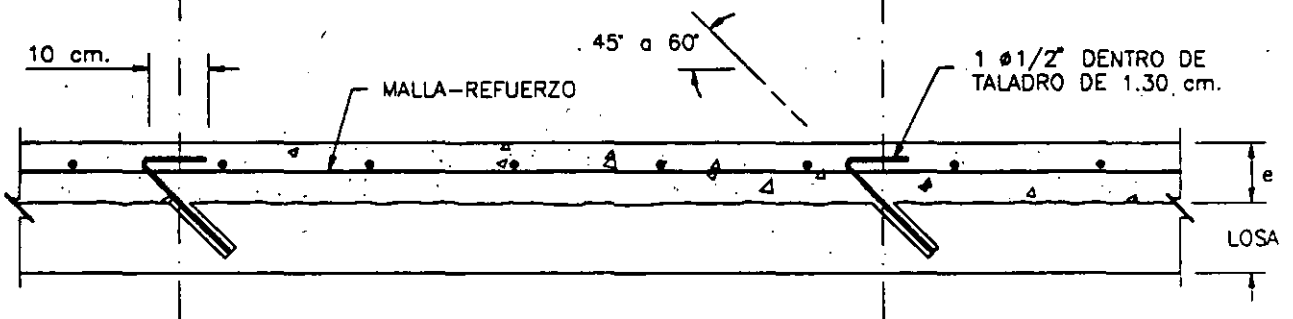
Grieta o fisura debida a una tensión diagonal que es la combinación de una fuerza de corte (vertical) y otra de contracción volumétrica y/o fuerza horizontal de trabajo bajo carga, especialmente por descimbrado prematuro.

Se presentan en las cercanías del apoyo de la trabe, y si aparecen después del proceso constructivo, por defecto de estribos y/o baja calidad del concreto, generalmente se prolongan a la losa.



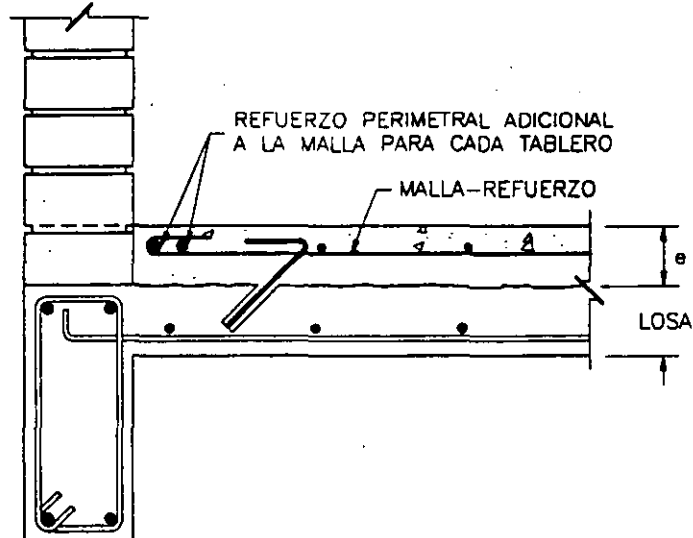
REFUERZO DE LOSA

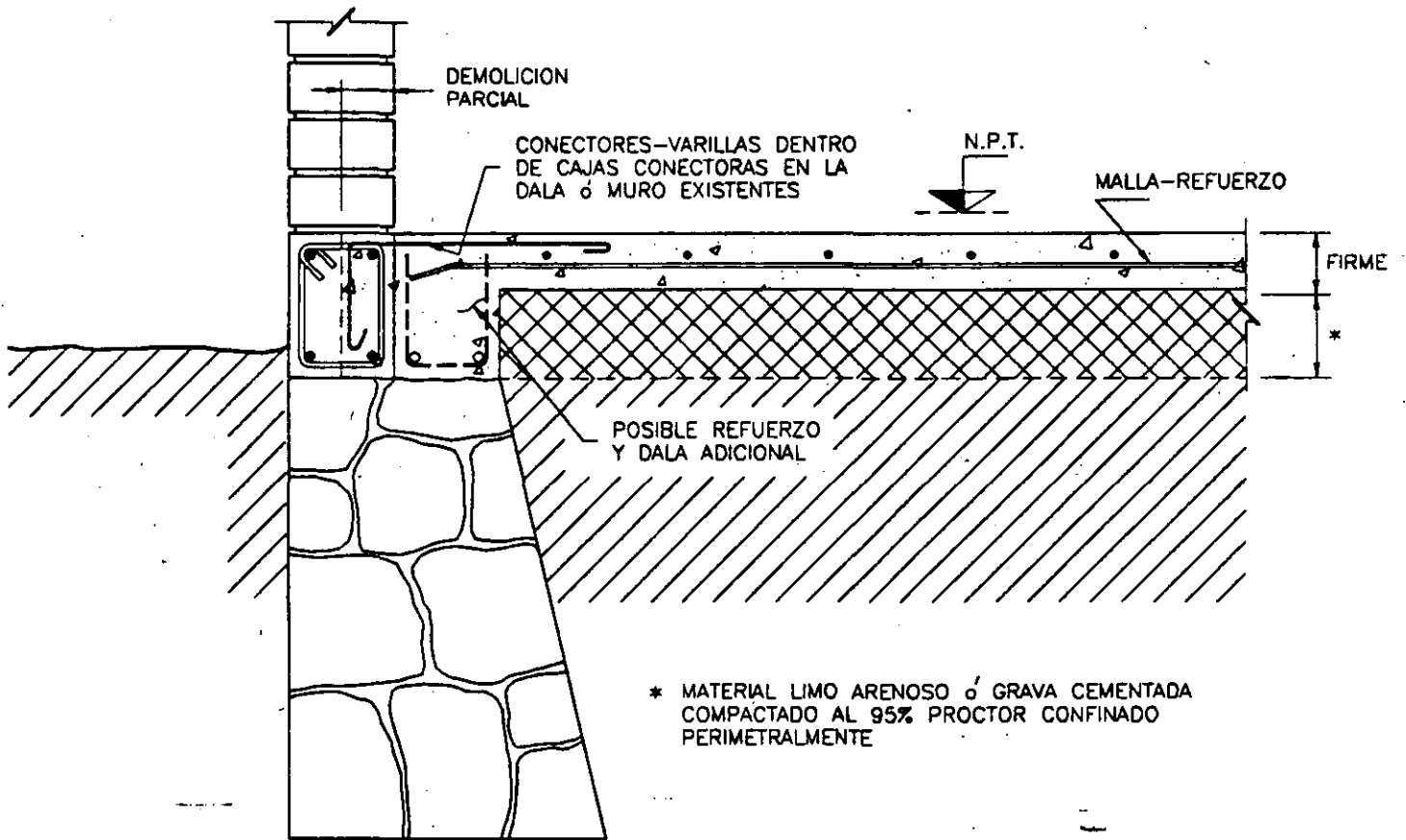
- 1).- PARA MEJORAR EL EFECTO DE DIAFRAGMA DE LA LOSA COMO ELEMENTO DE UNION ENTRE MARCOS Y MUROS.
- 2).- PARA MAYOR CAPACIDAD A FLEXION.



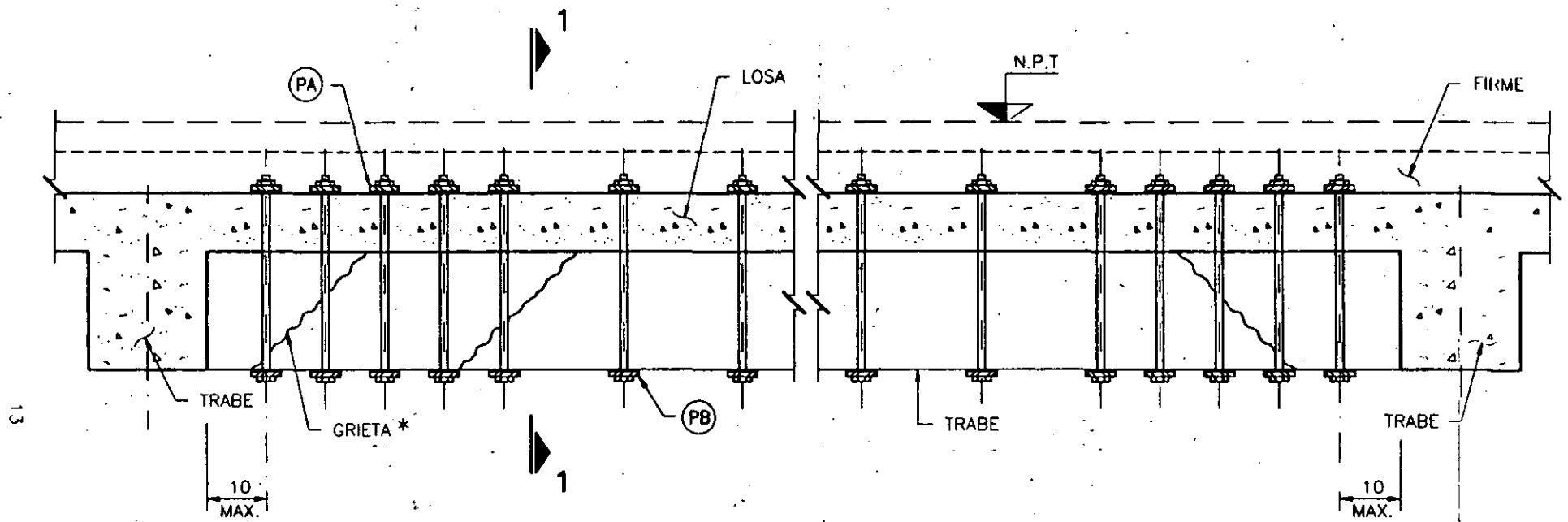
REFUERZO DE LOSA

CON CONECTORES METALICOS DOBLADOS ANTES O DESPUES DE COLOCAR LA MALLA-REFUERZO, EN LUGAR DE CAJAS CONECTORAS



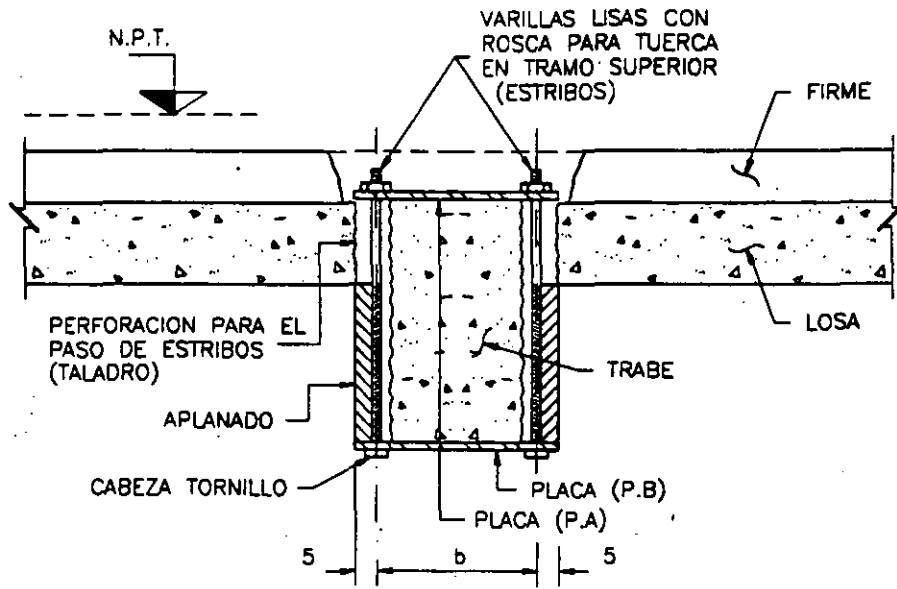


LOSA FIRME
REFUERZO A LA CIMENTACION



* GRIETAS DE 0.5 mm. Y MAYORES, RELLENARLOS CON RESINA EPOXICA (INYECCIONES POR TRAMOS DE 10 o 20 cm. DE ABAJO HACIA ARRIBA, PREVIO CALAFATEO)

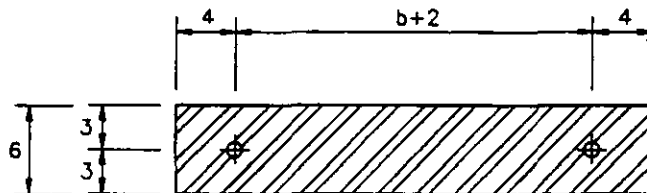
VISTA LATERAL
ELEVACION
REFUERZO DE TRABE - ESTRIBOS EXTERIORES



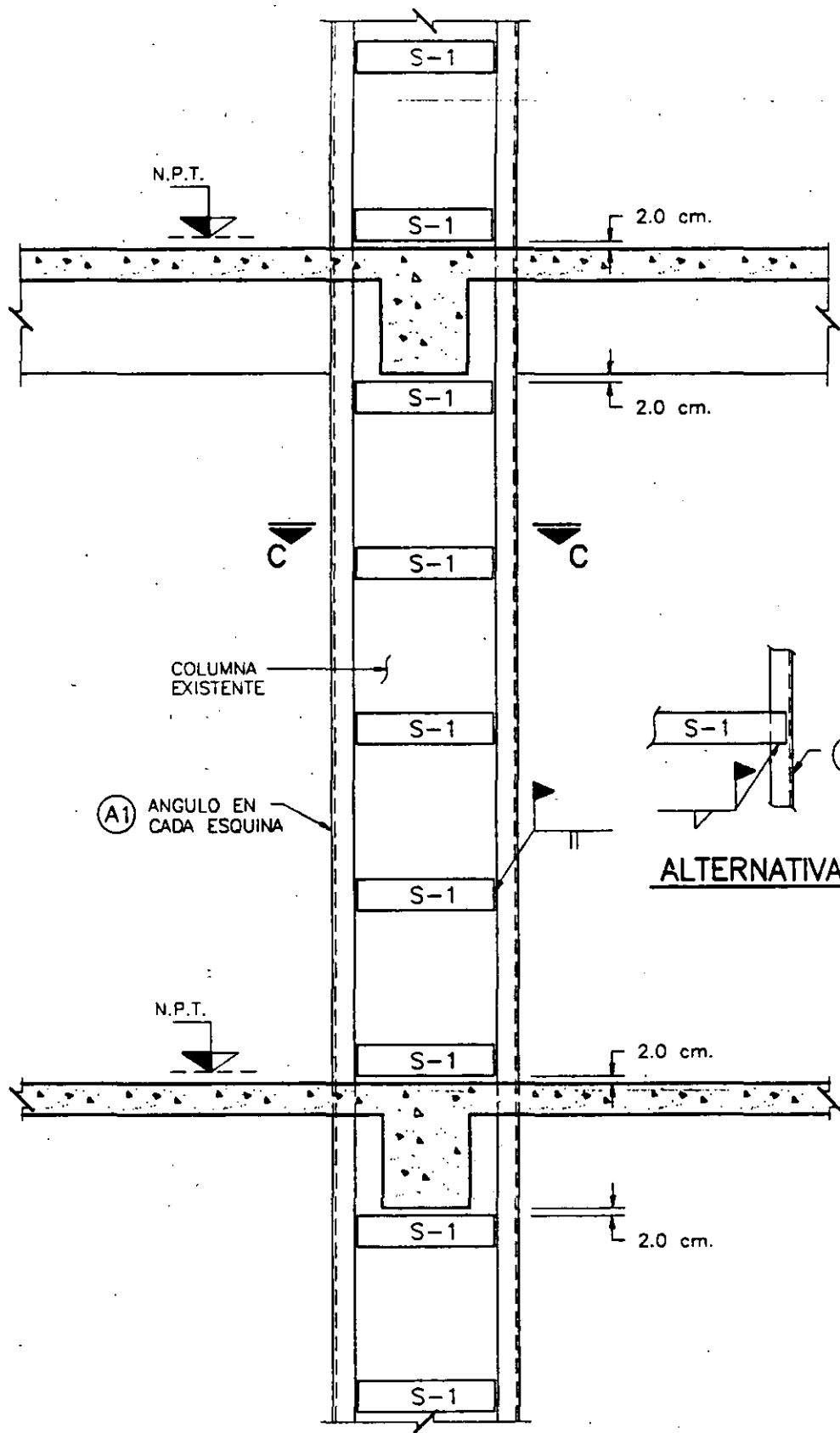
C O R T E 1 - 1
REFUERZO DE TRABE

PROCEDIMIENTO PARA LA COLOCACION DE ESTRIBOS EXTERIORES EN FALLAS POR TENSION DIAGONAL

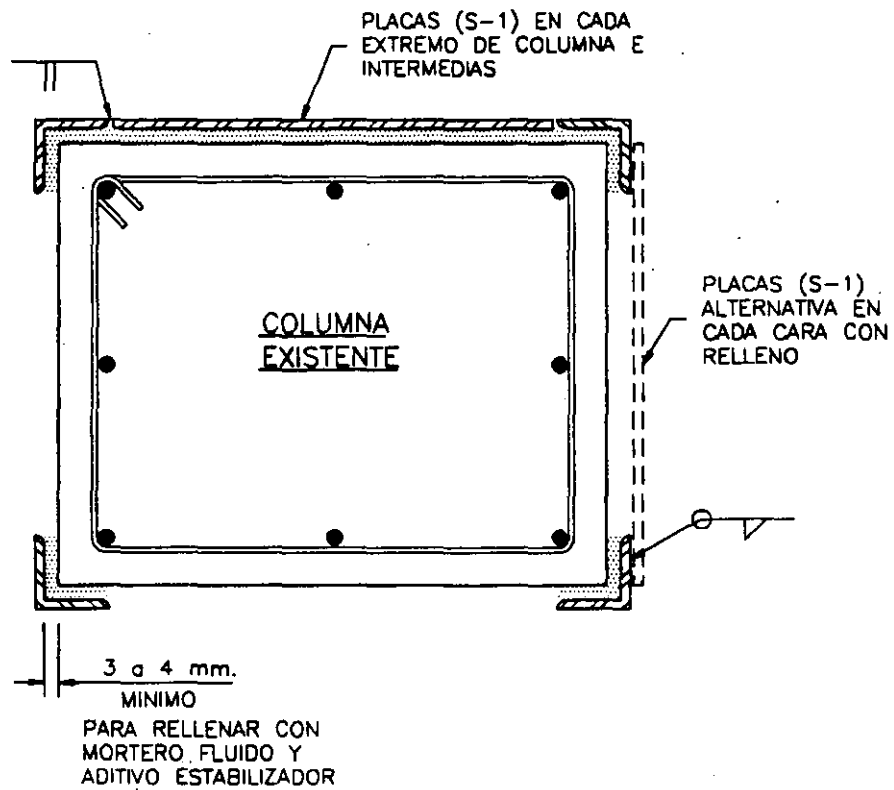
- 1.- DEMOLER EL PISO PARA DESCUBRIR LA LOSA.
- 2.- TALADRO PARA EL PASO DE VARILLAS LISAS CON ROSCA EN SUS EXTREMOS SUPERIORES (ESTRIBOS).
- 3.- HABILITACION DE PLACAS (P.A) Y (P.B) PERFORADAS Y DE VARILLAS CON CABEZA DE TORNILLO Y ROSCA PARA TUERCA.
- 4.- COLOCACION DE PLACAS Y VARILLAS LISAS. PINTAR CON PINTURA ANTICORROSIVA (2 MANOS) LAS PLACAS Y VARILLAS PREVIAMENTE.
- 5.- COLOCACION DEL RELLENO DE PERFORACION Y NUEVO N.P.T.
- 6.- APLANAR CON MORTERO LAS CARAS DE LA TRABE HASTA AHOGAR TOTALMENTE LAS VARILLAS LISAS, EN TODA LA EXTENSION QUE OCUPEN LOS ESTRIBOS ADICIONALES, USAR TELA DE GALLINERO PARA REFORZAR ESTE APLANADO.



PLACA (P.A) Y (P.B)
(e=0.6 cm) (1/4") MINIMO



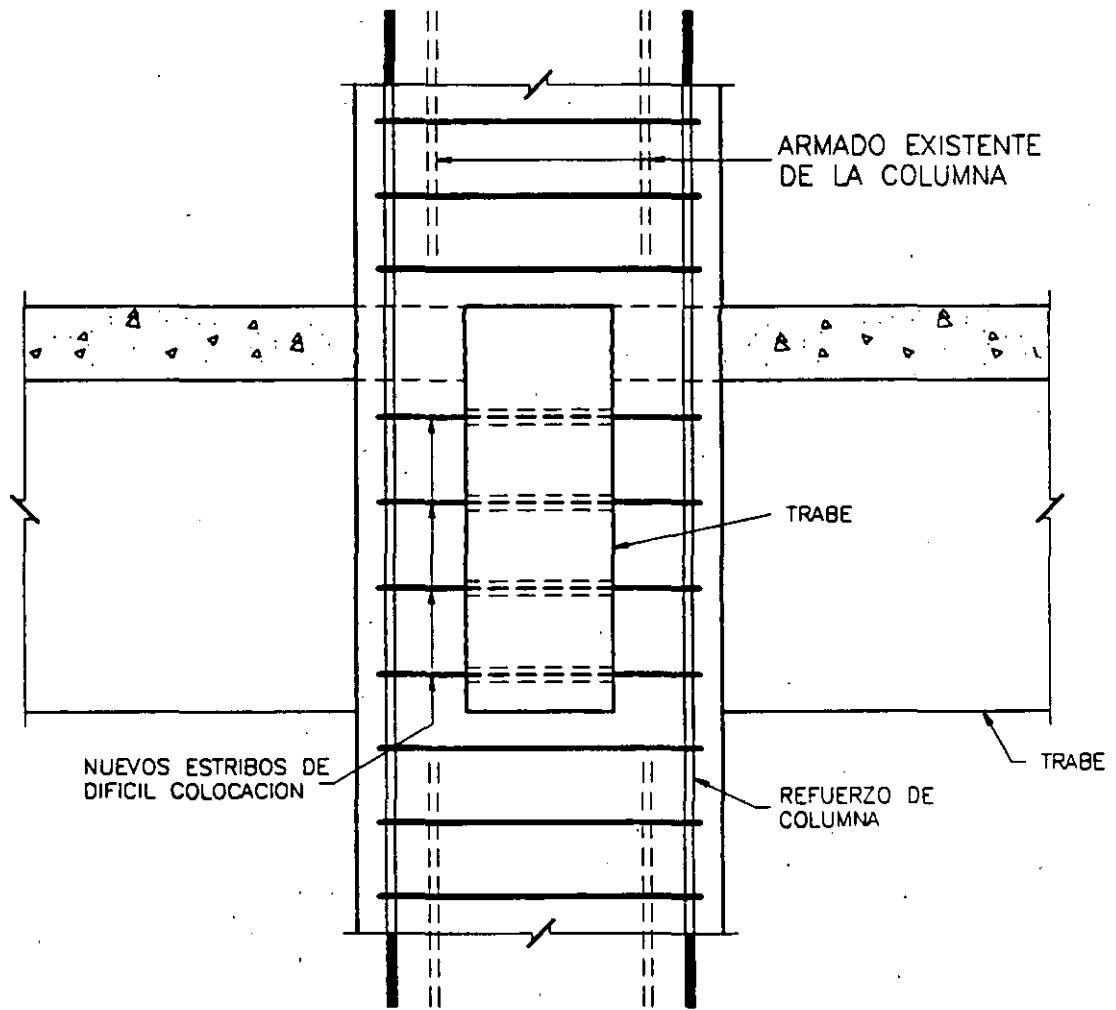
REFUERZO PARA COLUMNA "ENCAMISADO METALICO"
E L E V A C I O N



S E C C I O N C - C
REFUERZO DE COLUMNA

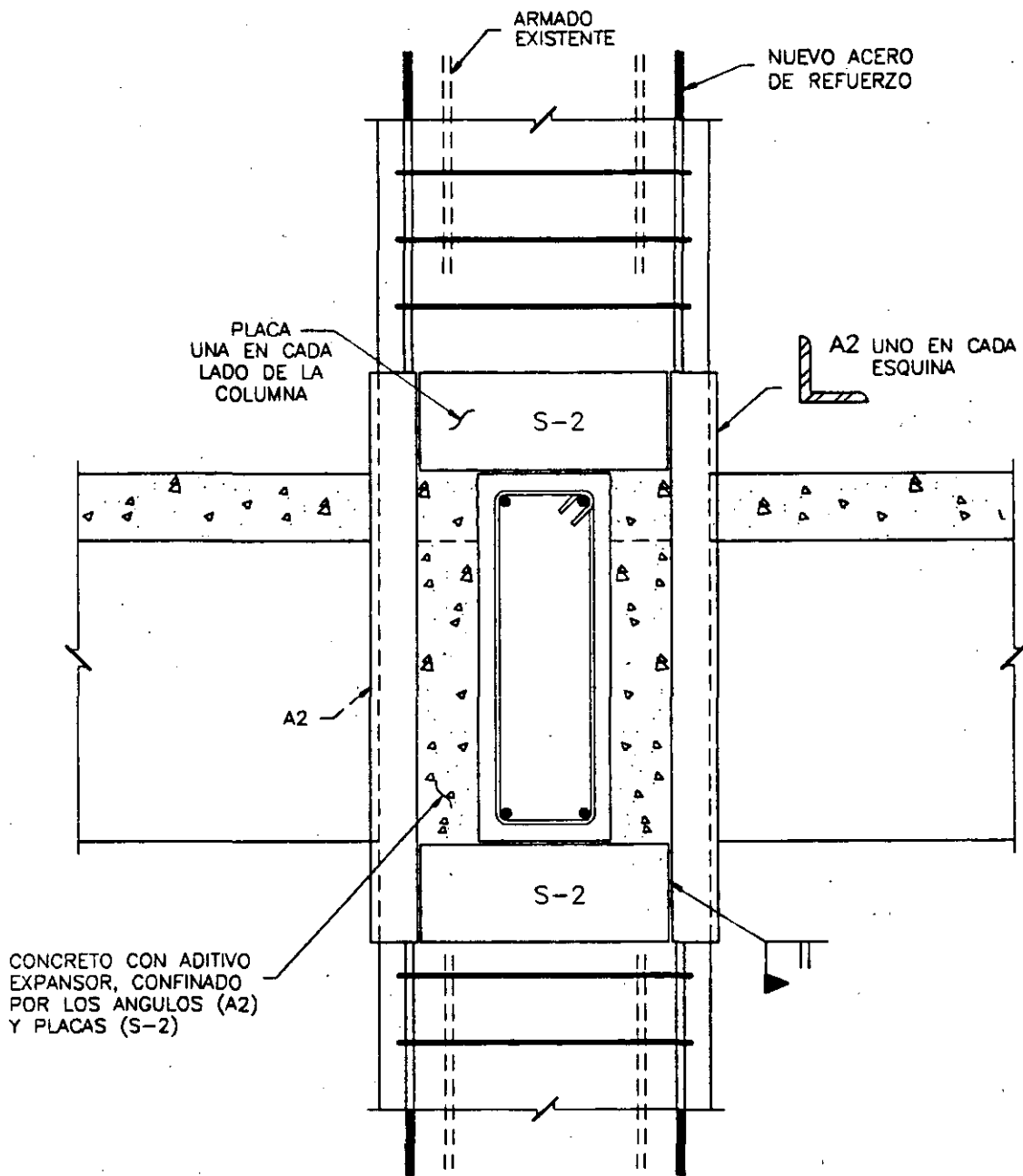
P L A N T A

ANGULOS EN LAS ESQUINAS Y PLACAS EN CELOSIA EN CADA CARA



REFUERZO DE COLUMNA

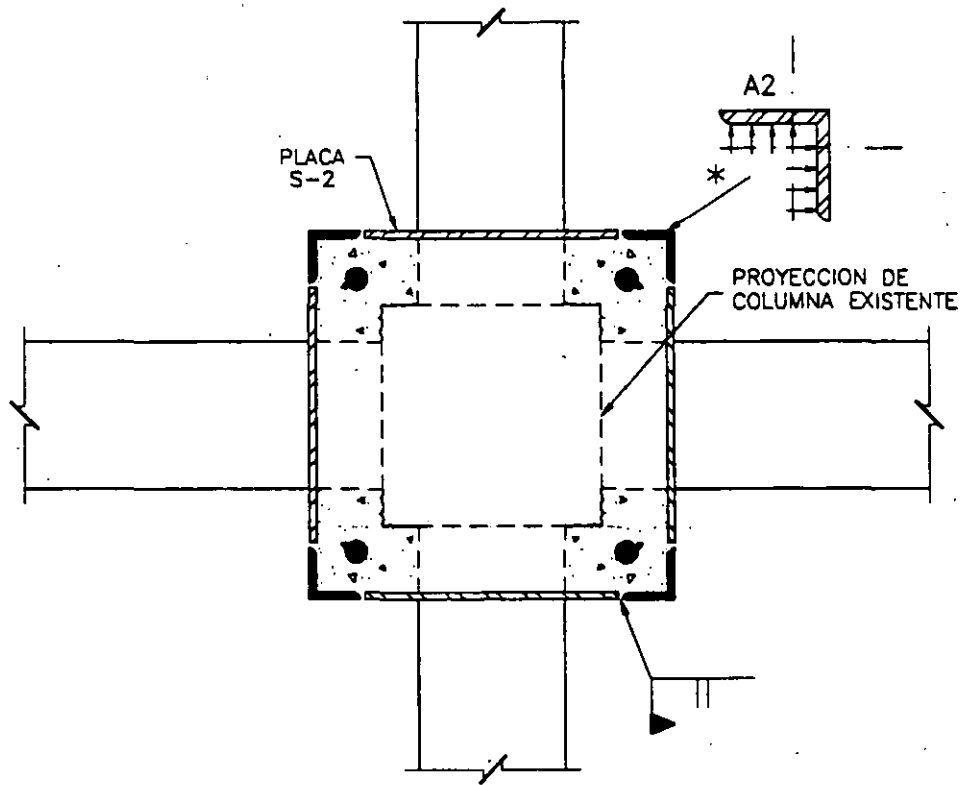
AGREGANDO ARMADO EXTERIOR Y AUMENTANDO SECCION DE CONCRETO



REFUERZO DE COLUMNA

ELEVACION

ELIMINANDO ESTRIBOS EN EL TRAMO DE TRABES

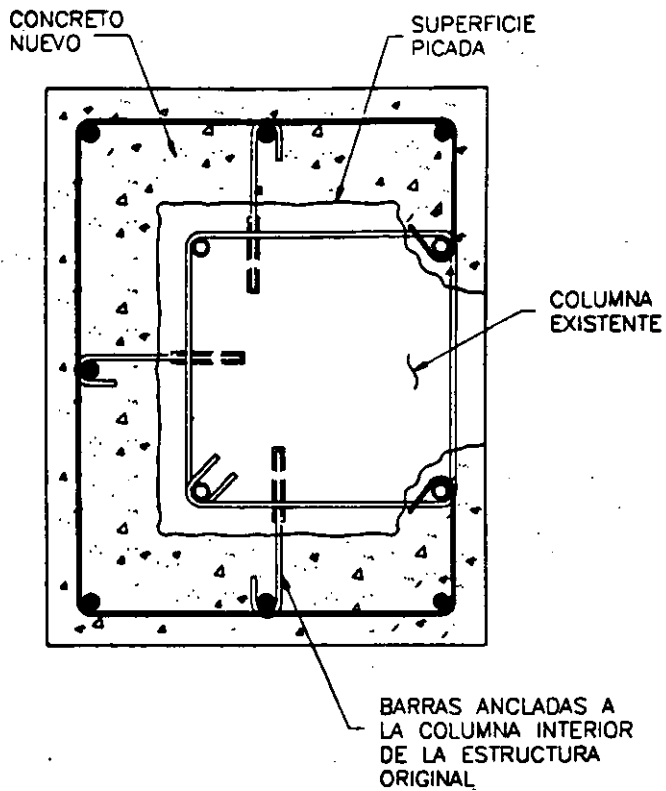


* LA FUERZA DE CONFINAMIENTO QUE TEORICAMENTE PROPORCIONAN
 LOS ESTRIBOS ELIMINADOS, PROVOCA FLEXION EN CADA ANGULO (A2)

REFUERZO DE COLUMNA

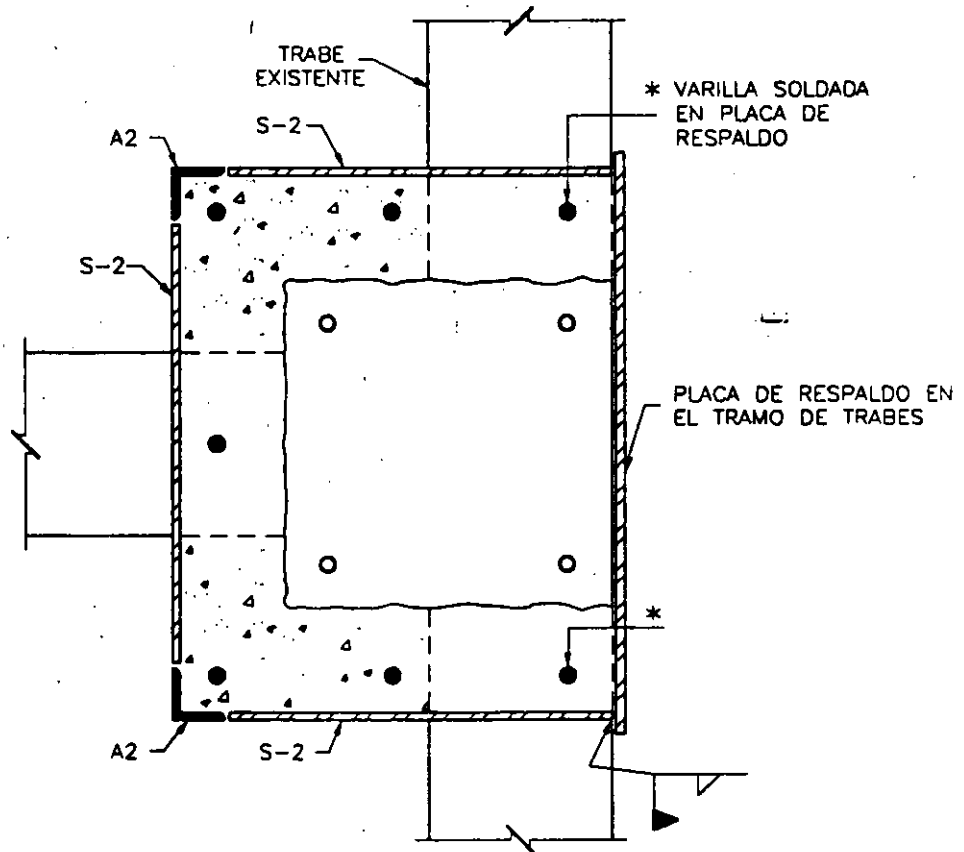
P L A N T A

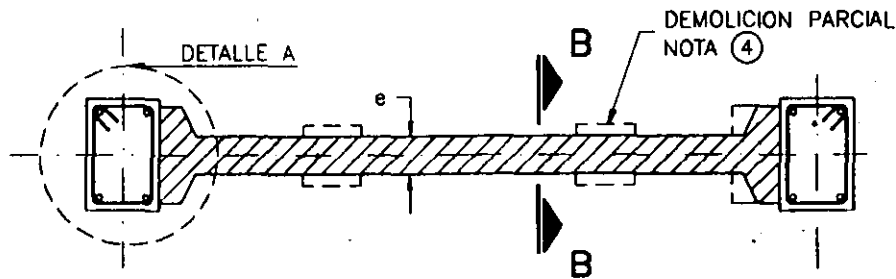
CONFINAMIENTO TRANSVERSAL CON 4 ANGULOS
 Y 8 PLACAS EN LA ZONA DEL NUDO CON TRABES



REFUERZO PARA COLUMNA (COLINDANCIA)

P L A N T A



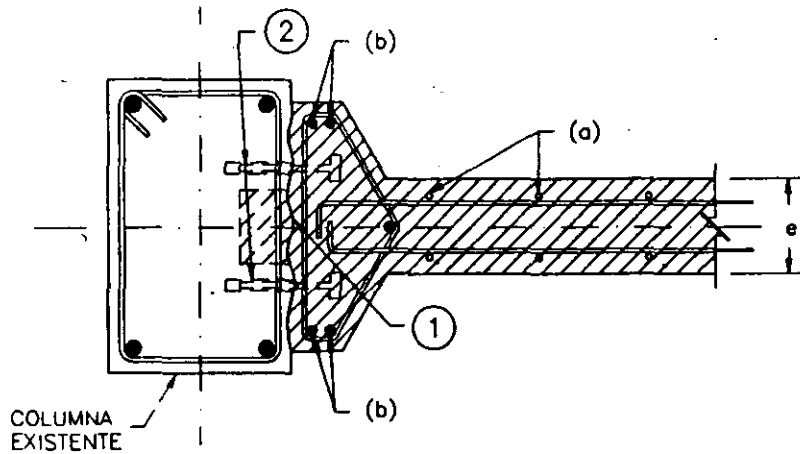


P L A N T A
NUEVO MURO DE CONCRETO - RIGIDEZ ADICIONAL
A LA ESTRUCTURA

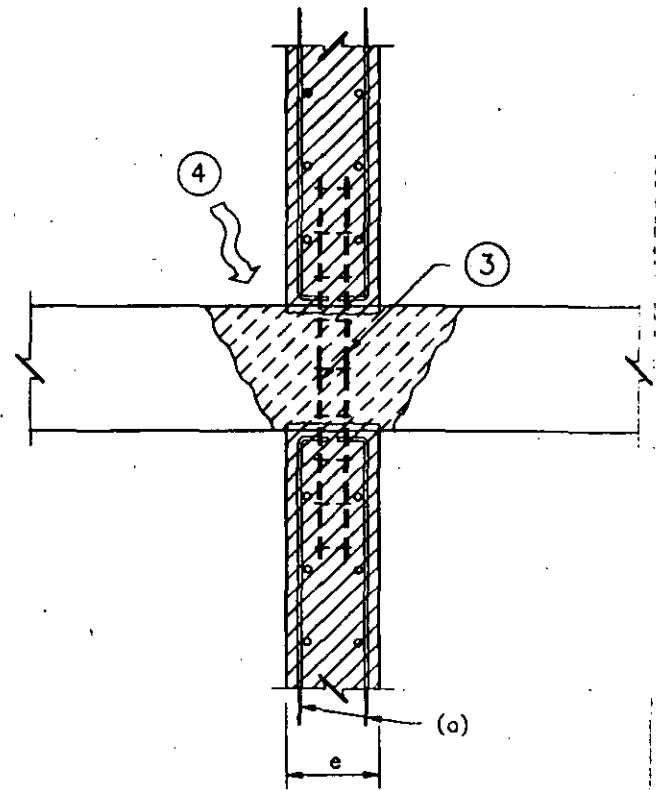
NOTAS

- 1).- SUPERFICIE PICADA Y LIMPIA DE TODO MATERIAL SUELTO Y POLVO. POSIBLE FORMACION DE "CAJAS" EN LA COLUMNA EXISTENTE PARA SER RELLENADAS CON EL NUEVO COLADO.
- 2).- TALADROS PARA COLOCAR PERNOS DENTRO DE TAQUETES, QUE SERVIRAN COMO CONECTORES ENTRE EL NUEVO MURO DE RIGIDEZ Y LA COLUMNA EXISTENTE.
- 3).- ARMADO FORMADO POR 4 VARILLAS EN FORMA DE PEQUEÑO "CASTILLO" COLOCADO EN LA POSICION DE VENTANAS PARA COLADO.
- 4).- COLADO DEL MURO INFERIOR A TRAVES DE VENTANAS QUE SE FORMARAN DEMOLIENDO LA ESTRUCTURA EXISTENTE.

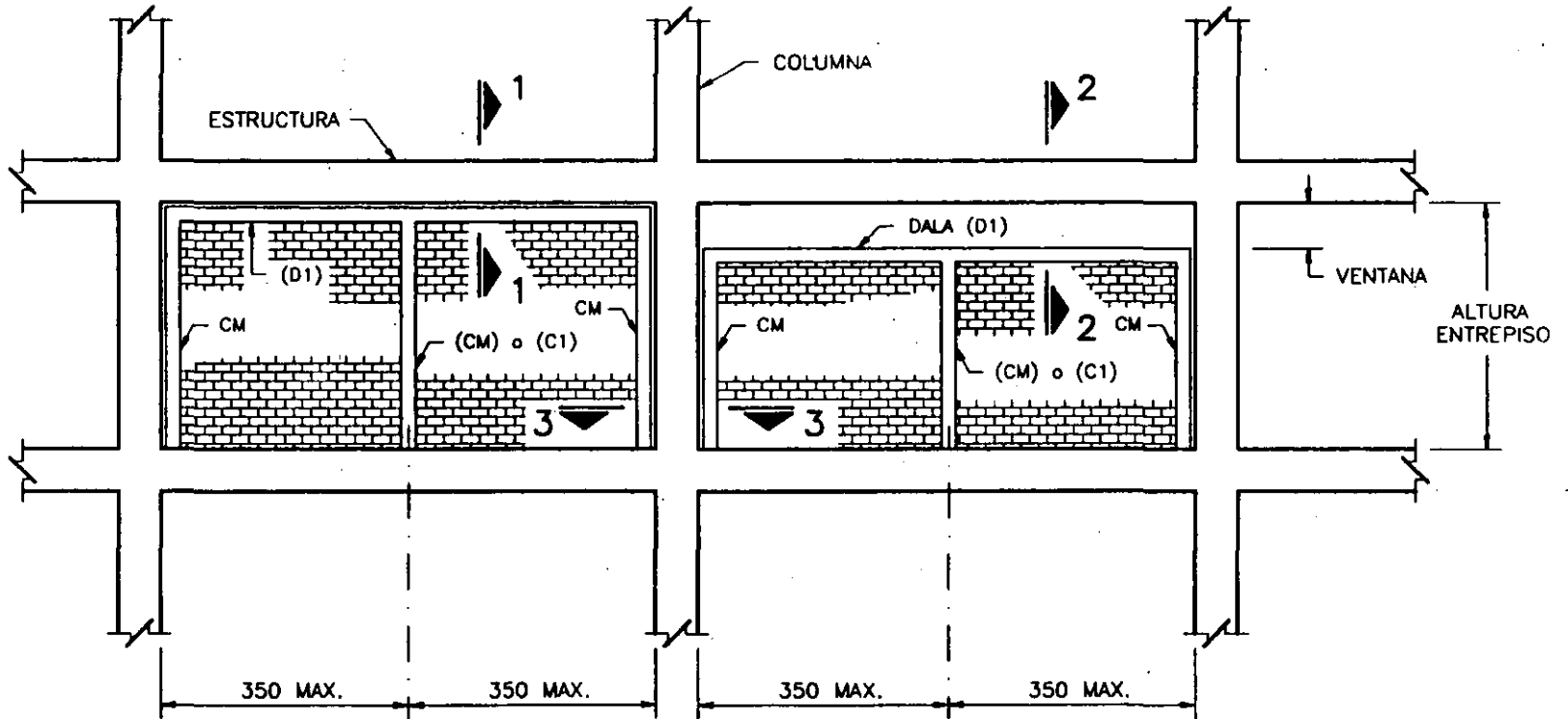
21



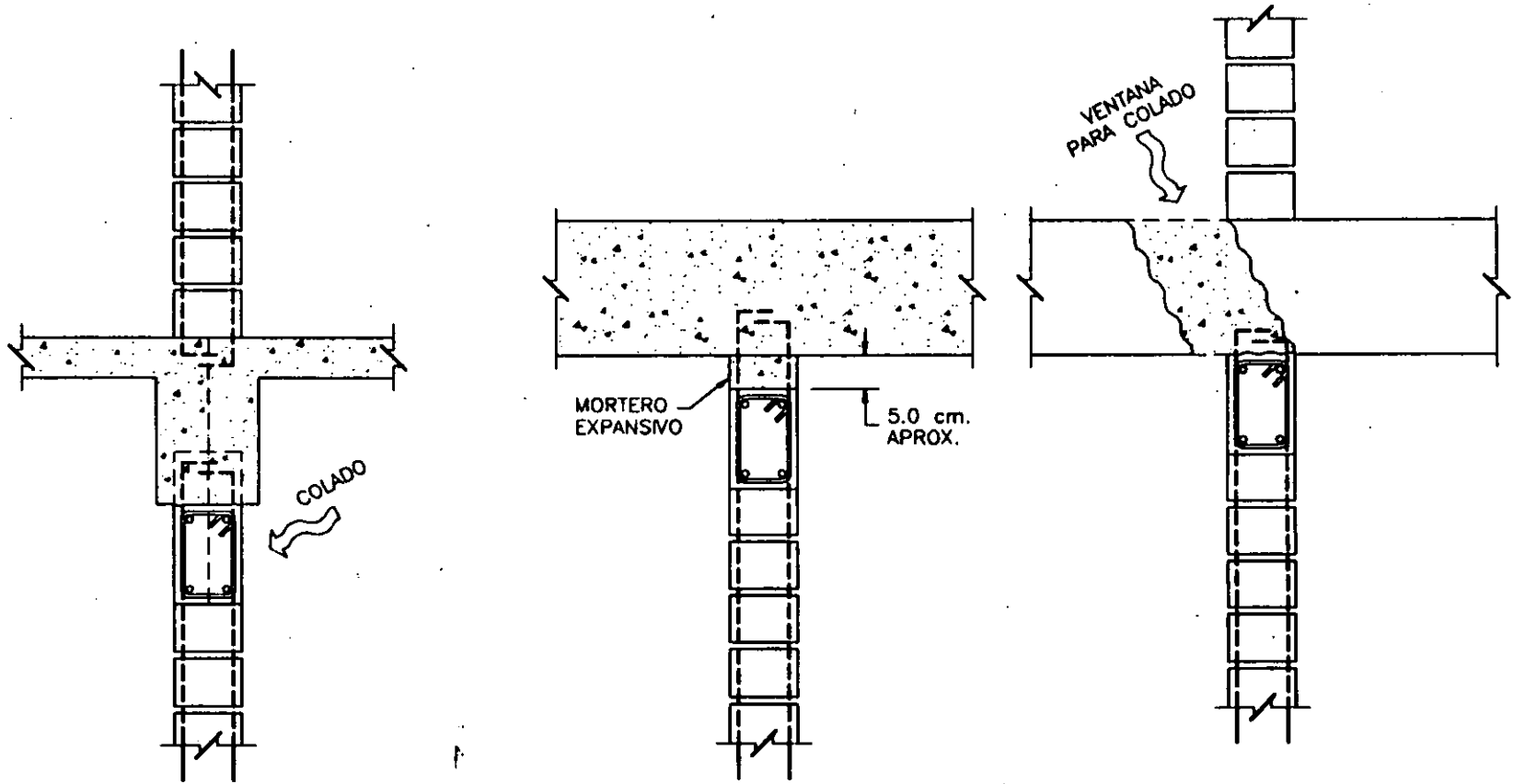
DETALLE A



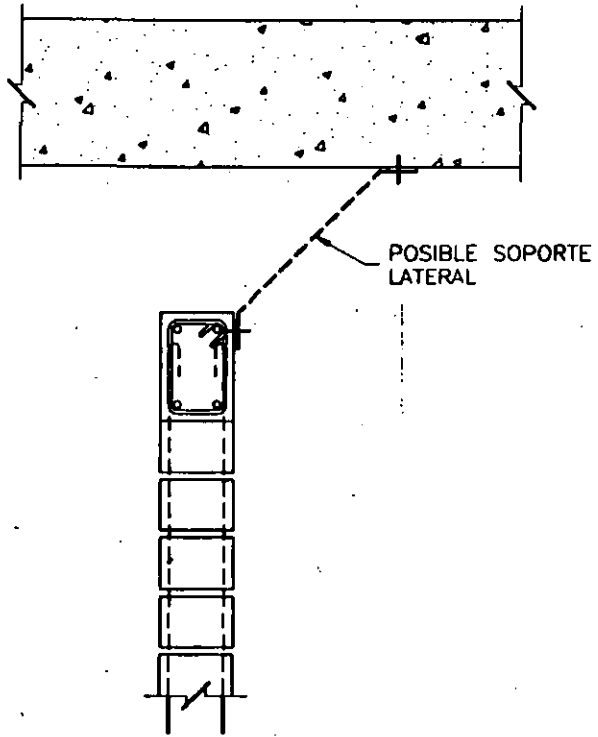
CORTE B - B



MUROS DE MAMPOSTERIA PARA
RELLENO ó RIGIDIZACION
ELEVACION

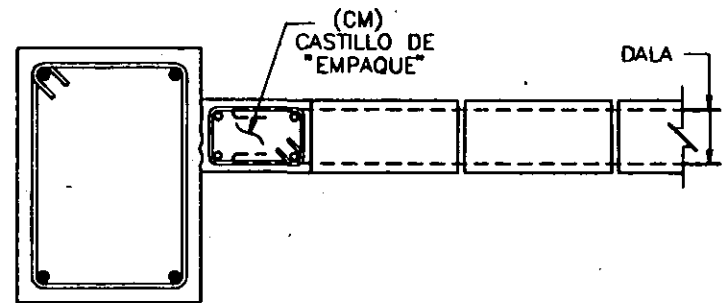


C O R T E 1 - 1
MURO DE RIGIDEZ "EMPACADO"
CONTRA LA ESTRUCTURA EXISTENTE



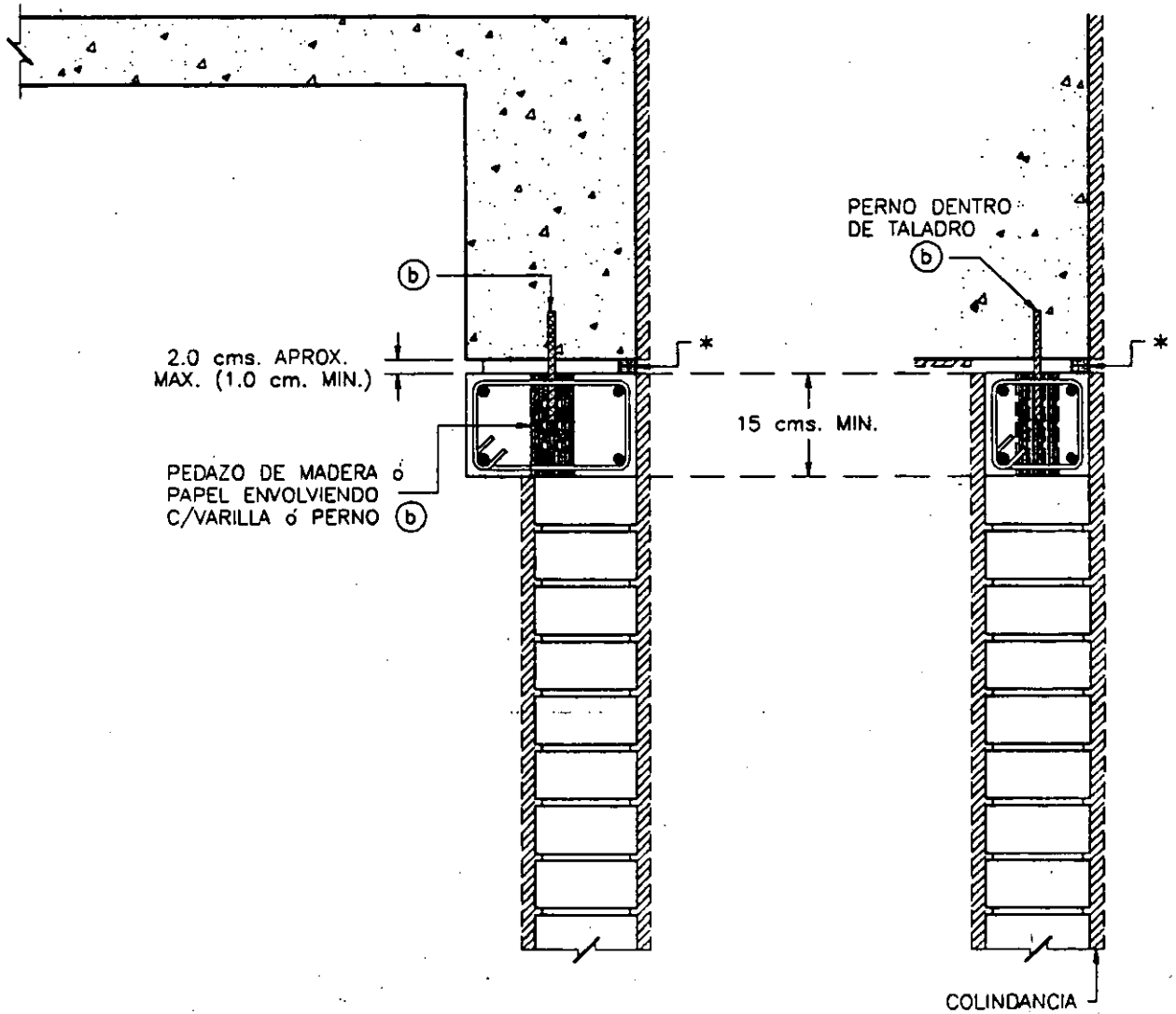
POSIBLE SOPORTE LATERAL

CORTE 2 - 2
ELEVACION
MURO DIVISORIO

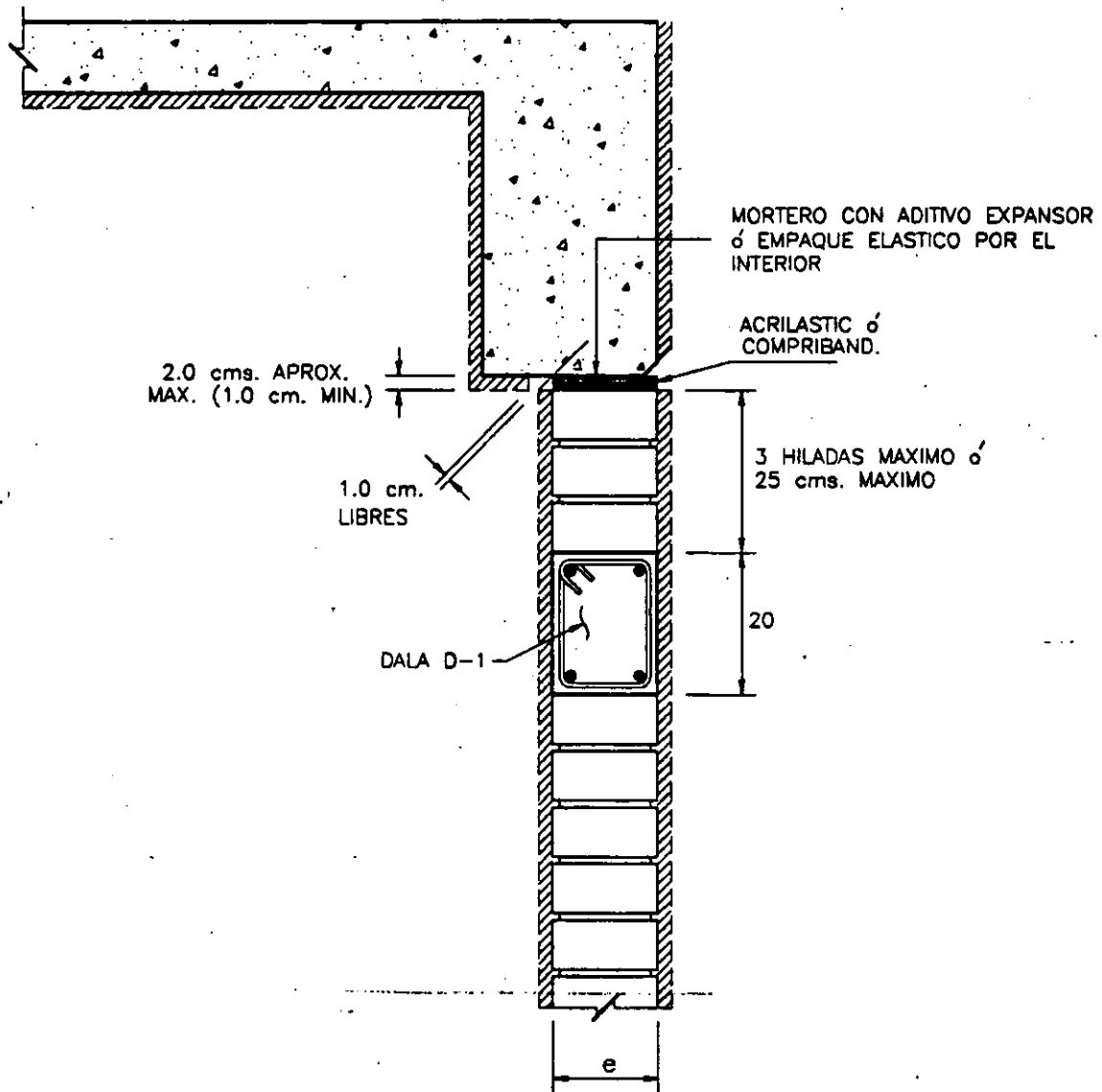


CORTE 3 - 3
PLANTA
PARA MURO DE RIGIDEZ

* SISMOFLEX ó
COMPRIBAND

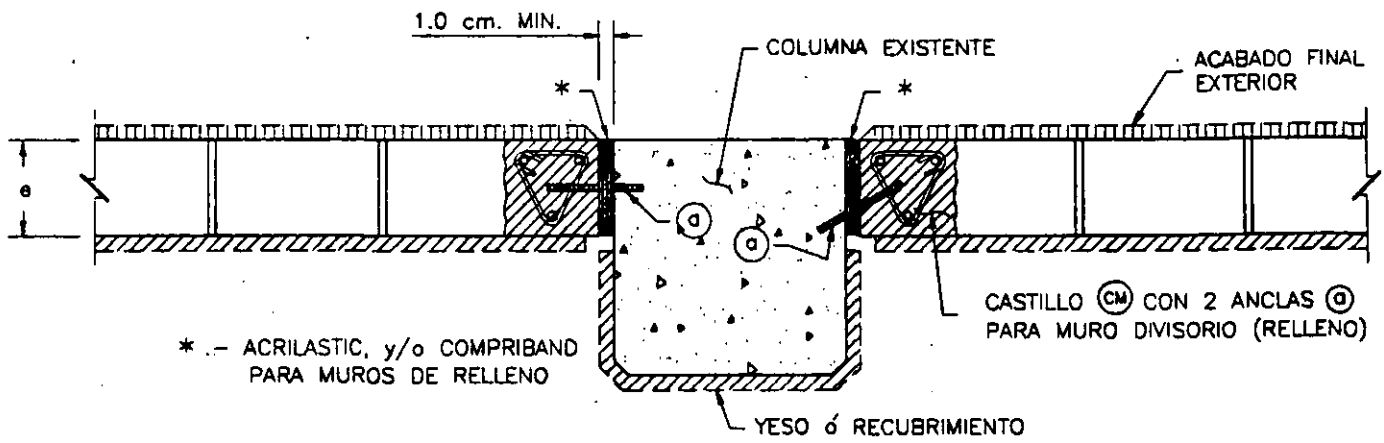


ALTERNATIVA CORTE 1 - 1
MURO DIVISORIO



DALA D-1 ANCLADA 25 cms. MINIMO
EN CASTILLOS EXTREMO (CM)

ALTERNATIVA CORTE 1 - 1



* .- ACRILASTIC, y/o COMPRIBAND
PARA MUROS DE RELLENO

CASTILLO (CM) CON 2 ANCLAS (A)
PARA MURO DIVISORIO (RELLENO)

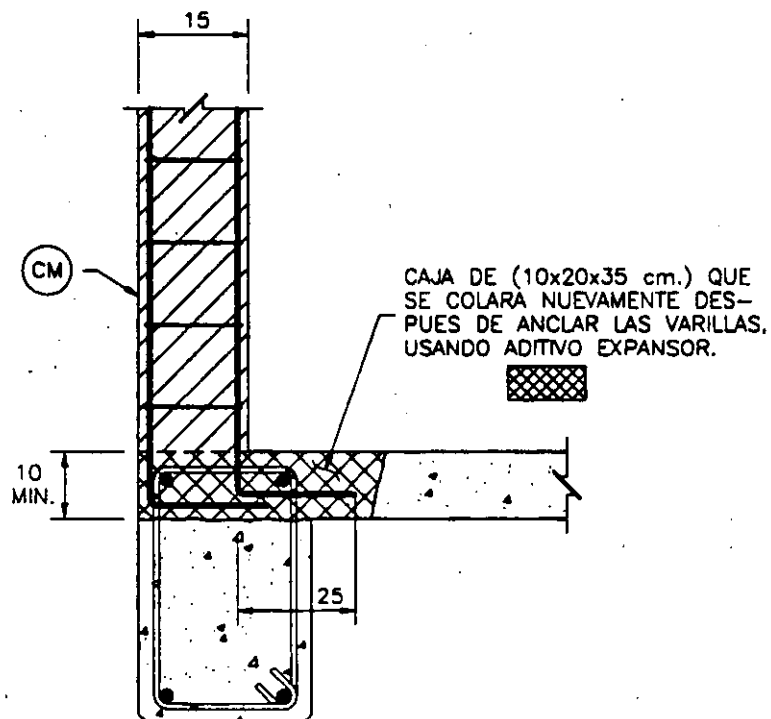
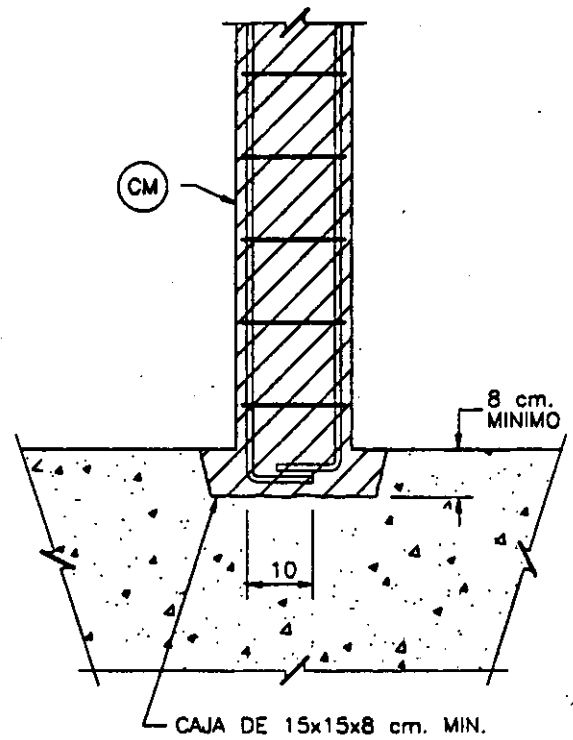
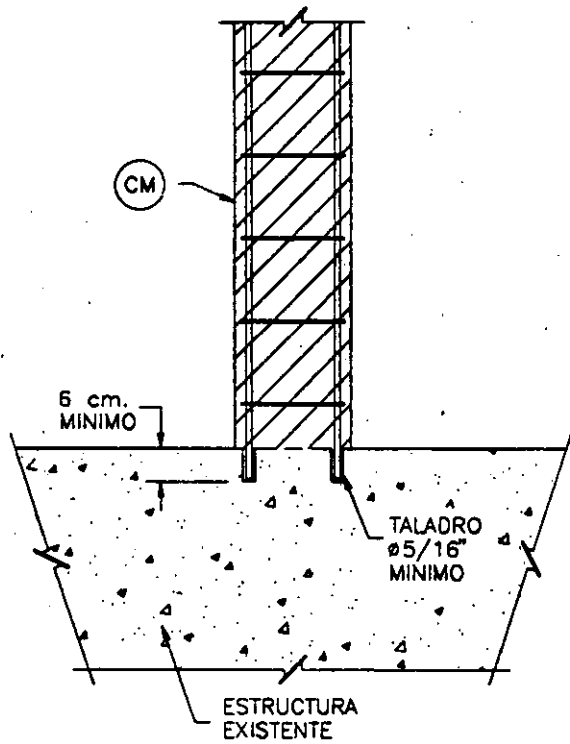
YESO ó RECUBRIMIENTO

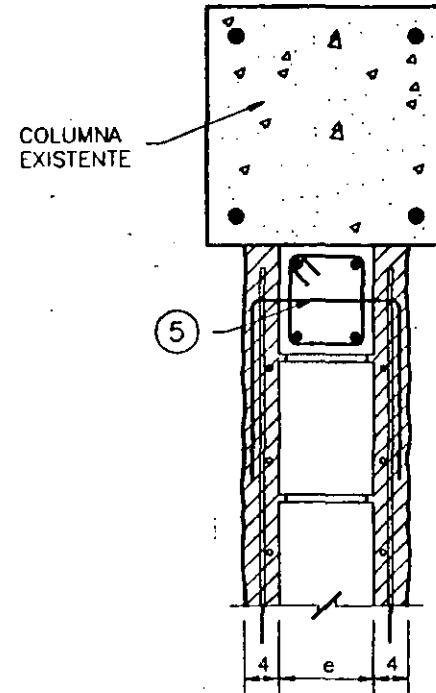
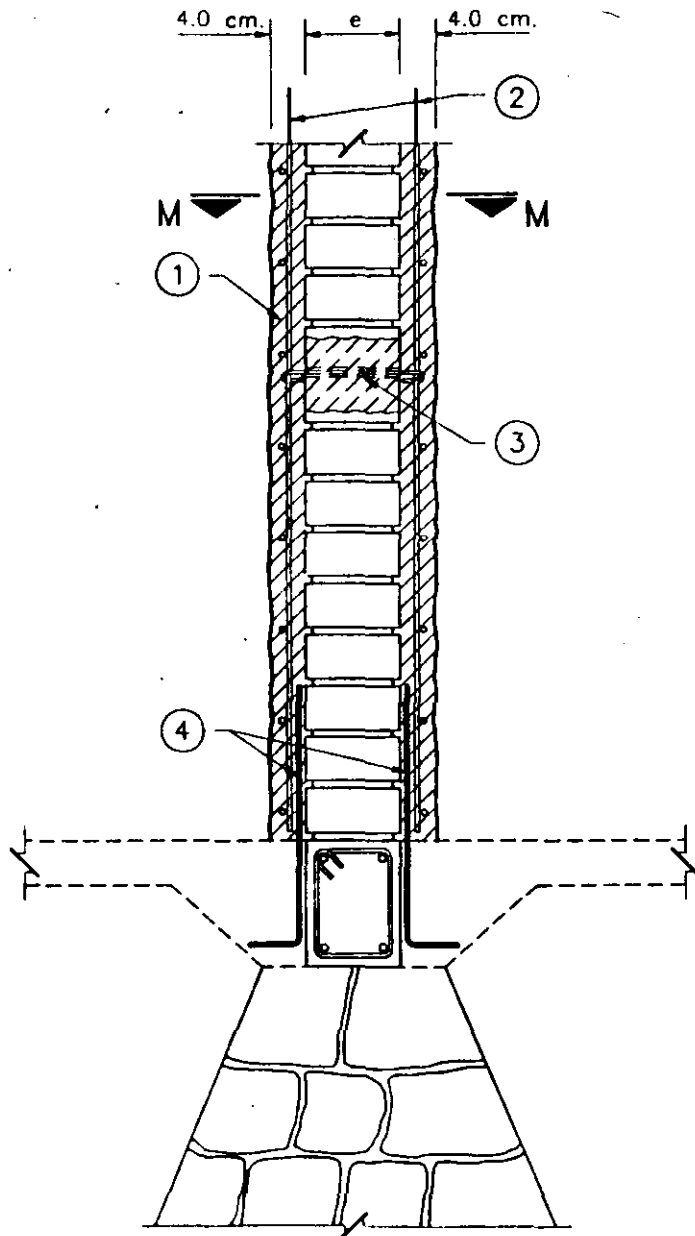
ANCLAS (A) ($\phi 1/2"$ MIN.) COLOCADAS DENTRO DE TALADROS $\phi 1/2"$ EN
COLUMNA EXISTENTE (3 MIN. @ 80 cm. APROX.)

PARA MUROS DE RIGIDEZ (EMPACADOS), ELIMINAR EL MATERIAL DEFORMABLE *
COLANDO EL CASTILLO CONTRA LA COLUMNA.

C O R T E 3 - 3
P L A N T A

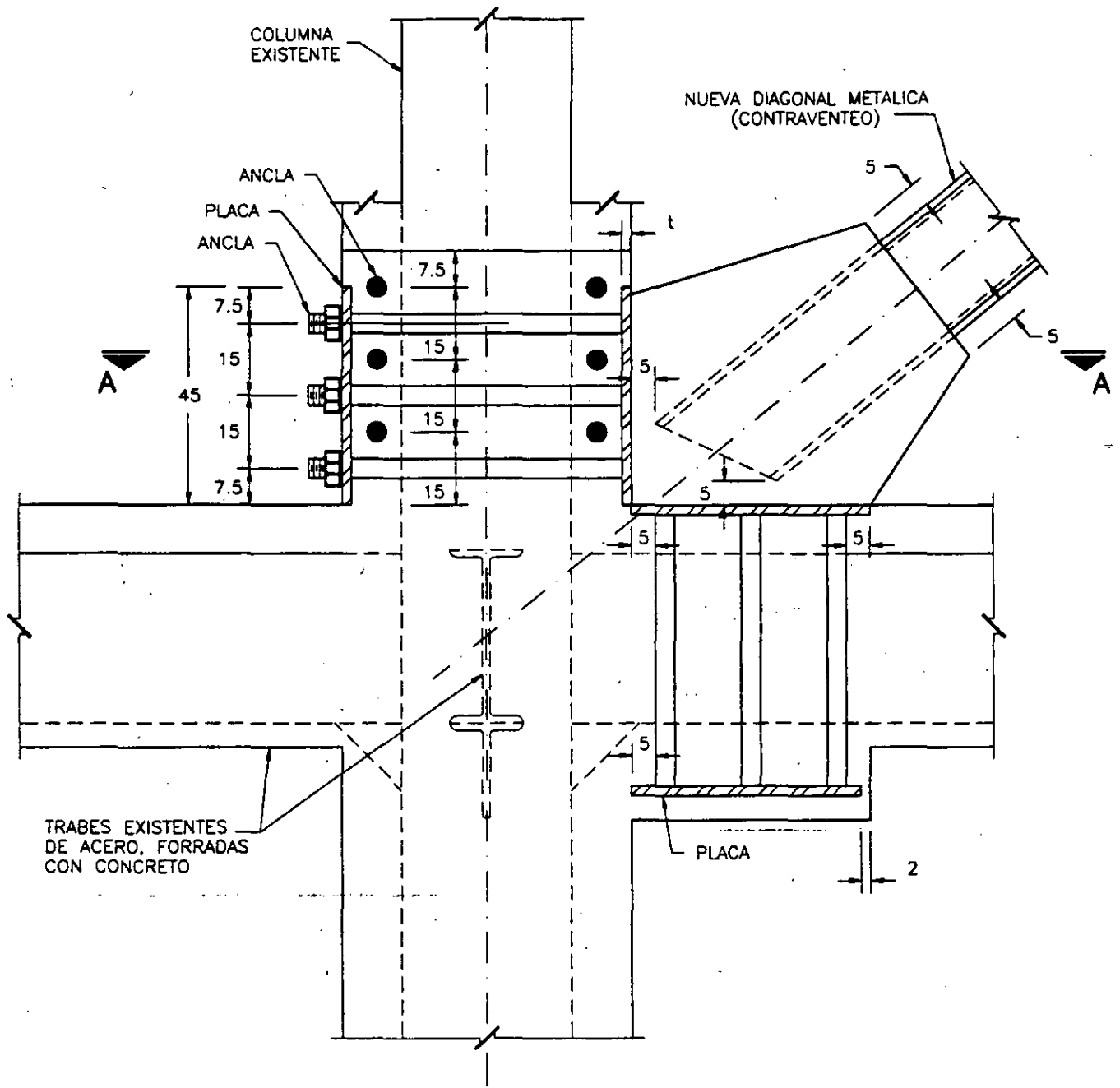
ANCLAJE PARA CASTILLOS



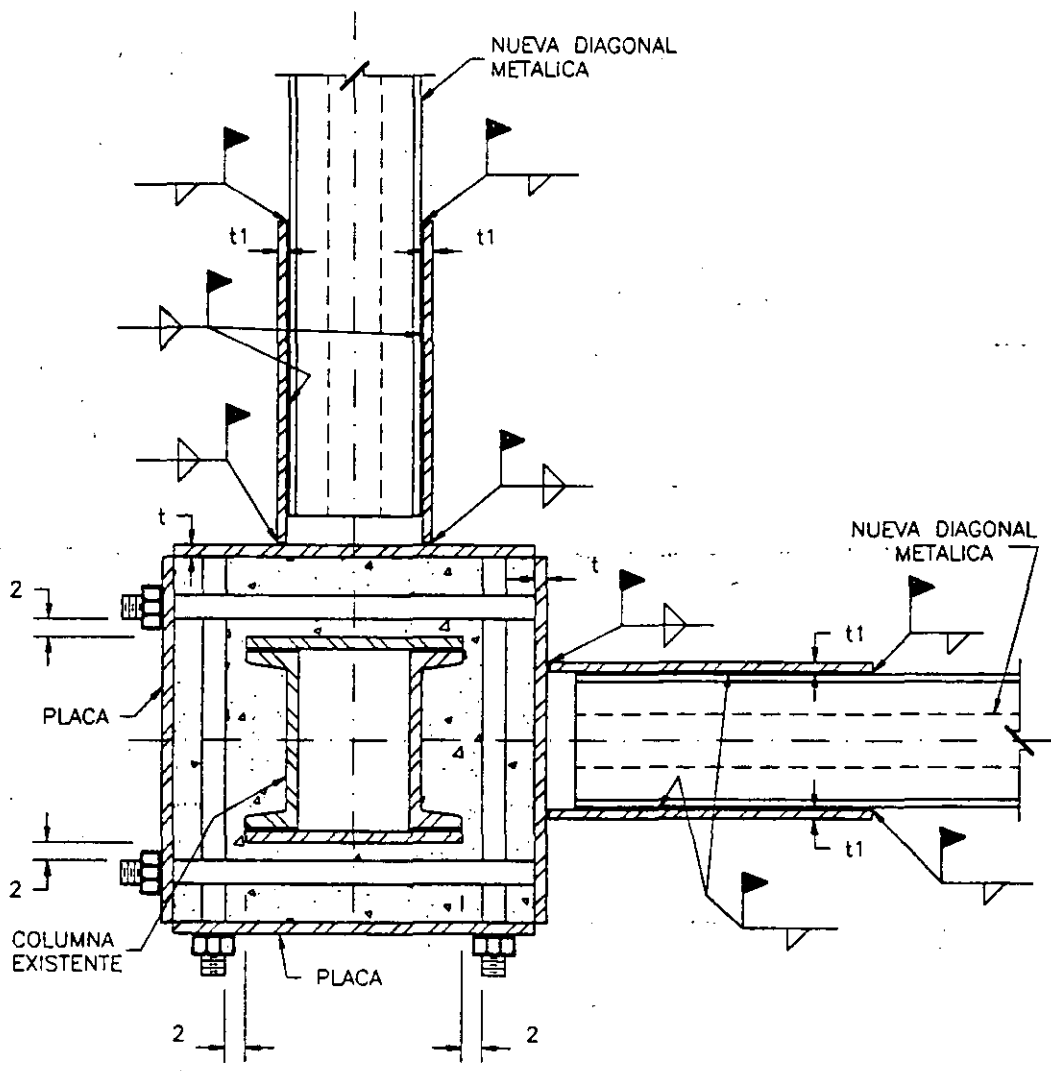


C O R T E M - M
RECUBRIMIENTO ARMADO PARA
REFUERZO DE MAMPOSTERIA

- 1).- CAPA DE MORTERO LANZADA CONTRA EL MURO DE MAMPOSTERIA.
- 2).- MALLA ELECTROSOLDADA ó VARILLAS PARA ARMADO DE LOS APLANADOS.
- 3).- "GRAPA" PARA SUJETAR LAS DOS MALLAS, COLOCADA A TRAVES DE "CAJAS" O PERFORACIONES HECHAS EN EL PROPIO MURO, Y QUE A LA VEZ SERVIRAN COMO CONECTORES. (ESPACIADA 80 cm. Ⓞ MAX.)
- 4).- VARILLAS ANCLADAS A EL ELEMENTO ESTRUCTURAL EXISTENTE PARA TRASLAPARSE CON LA MALLA.
- 5).- LAS DOS CAPAS DE MORTERO $f'c=100 \text{ Kg/cm}^2$ MINIMO DEBERAN REMATARSE EN SU EXTREMO SUPERIOR HORIZONTAL Y EN SUS EXTREMOS VERTICALES, CONTRA LA ESTRUCTURA EXISTENTE, Y DE PRI NCIA INTEGRANDO EL ARMADO A DALAS Y CASTILLOS DEL PROPI RO.



PREPARACION PARA RECIBIR
DIAGONAL METALICA (CONTRAVENTEO)
E L E V A C I O N

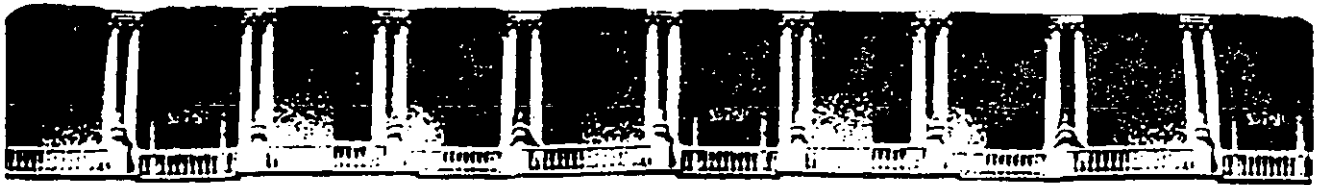


C O R T E A - A
P L A N T A

BIBLIOGRAFIA

1. "Repair and Strengthening of Reinforced Concrete, Stone and Brick-Masonry Buildings". Proc. Building Construction Under Seismic Conditions in the Balkan Region, Vol. 5, United Nations Development Programme, Vienna 1983.
2. Hernández B, O. "Procedimientos de Reparación de Estructuras Dañadas por Sismo" (primera etapa). Departamento del Distrito Federal. Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica. México, D.F., Abril 1981.
3. Pinkham, C.W, y Hart, G.C. "A Methodology for Seismic Evaluation of Existing Multistory Residential Buildings". Department of Housing and Urban Development. Office of Policy Development & Research. Junio 1977.
4. Hirosawa, M. et al. "Analysis on Damage of the Kurayoshi Higashi City Office Building During the Tottori Earthquake of 1983". Building Research Institute, Japón, Diciembre 1984.
5. Hirosawa, M. et al. "Analysis on Damage of the Namioka Town Hospital Building During the 1983 Nihonkai-Chubu Earthquake and Retrofit Design of the Building". Building Research Institute, Japón, Agosto 1985.
6. Loera, S. "Manual para Evaluar Daños Causados por Sismos en Edificios de Concreto Reforzado". Departamento del Distrito Federal, México, Marzo 1982.
7. Mendoza, C.J. "Manual para Evaluar Daños causados por Sismos en Estructuras de Mampostería". Departamento del Distrito Federal, México, Mayo 1982.
8. Petrovski, J. "Metodología y Procedimientos para la Evaluación de Daños Producidos por Terremotos". Institute of Earthquake Engineering and Engineering Seismology, Yugoslavia, 1983.
9. Okada, T. "Standard for Evaluation of Seismic Capacity of Existing Reinforced Concrete Building". Japan Building Disaster Prevention Association. Tokio, 1977.
10. Iglesias, J. (UAM Atzacapotzalco-México) 1987. Estudio de las Intensidades del Sismo del 19 de Septiembre en México, D.F.
11. McKenzie, G.H.F., et al. "Guidelines and Procedures for Strengthening of Buildings" Procc. 8 WCEE, Vol. 1, San Francisco, E.U.A. 1984.
12. Kahn, L. F. "Shotcrete Retrofit for Unreinforced Brick Masonry" Proc. 8WCEE, Vol. 1, San Francisco, E.U.A. 1984.
13. Hutchison, D.L. et al. "Laboratory Testing of a Variety of Strengthening Solutions for Brick Masonry Wall Panels". Proc. 8WCEE, Vol. 1, San Francisco, E.U.A., 1984.
14. Giangreco, E. et al. "Stress Analysis and Strengthening Techniques of Masonry Buildings" Proc. 8WCEE, Vol. 1, San Francisco, E.U.A. 1984.
15. Takaki, M. y Ikeda, A. "Evaluation & Strengthening of a Existing Reinforced Concrete School Building" Procc. 8WCEE, Vol. 1, San Francisco, E.U.A. 1984.
16. Kawabata, S. et al. "A Case Study of Seismic Strengthening of Existing Reinforced Concrete Buildings in Shizuka Prefecture, Japan", Proc. 8WCEE, Vol. 1, San Francisco E.U.A. 1984.

17. Endo, T. et al. "Practice of Seismic Retrofit of Existing Concrete Structures in Japan" Proc. 8WCEE, Vol. 1, San Francisco, E.U.A. 1984.
18. Higashi, Y. et al. "experimental Studies on Retrofitting of Reinforced Concrete Buildings Frames" Proc. 8WCEE, Vol. 1, San Francisco, E.U.A. 1984.
19. Yüzügüllü, O. "Bolted Connections for Precast R:C: Panels Used for Repair and/or Strengthening" Proc. 8WCEE, Vol. 1 San Francisco, E.U.A., 1984.
20. Van Gemert, D:A: "Repair and Strengthening of Reinforced Concrete Plates by Epoxy-Bonded Steel Plates" Proc. 8WCEE Vol. 1, San Francisco, E.U.A. 1984.
21. Alcocer, S.M., & J:O. Jirsa 1991. Reinforced Concrete Frame Connections Rehabilitated by Jacketing. PMFSEL Report No. 91-1, Phil M. Ferguson Structural Engineering Laboratory, The University of Texas at Austin.
22. Jirsa, J.O. 1987. Repair of damaged buildings - Mexico City. Proc. Pacific Conference on Earthquake Engineering: 1, 25-34, New Zealand.
23. Rosenblueth, E., & R. Meli 1986. The 1985 earthquake: Causes and effects in Mexico City. Concrete International: 8(5), 23-34
24. Altin, S. 1990. Strengthening of R/C frames with R/C infills. Ph. D. thesis, Middle East Technical University, Ankara, Turkey.
25. Ersoy, U. and Tankut, T. 1991. Jacketed columns subjected to combined axial load and reversed cyclic bending. 6. Canadian Conference on Earthquake Engineering, Toronto, Canada: 631-638.
26. Tankut, T. and Ersoy, U. 1991. Behavior of repaired/strengthened R/C structural members. American Concrete Institute Special Publication SP-128, Detroit, Michigan: 1257.1276.
27. Badoux, M. 1987. Seismic retrofitting of reinforced concrete structures with steel bracing systems. Ph. D. Dissertation. The University of Texas at Austin. Austin, Texas, USA.
28. Bass, R., Carrasquillo, R. and Jirsa, J:O. 1989. Shear transfer across new and existing concrete interfaces. ACI Structural Journal Vol. 86. No. 4, July-August: 383.393.
29. Bush, T., Jones, E. & Jirsa, J:O. 1991. Behavior of RC frame strengthened using structural steel bracing: ASCE Structural Journal Vol. 117, No. 4:1117.1128.
30. Gaynor, P. 1988. The effect of openings on the cyclic behavior of reinforced concrete infilled shear walls. M.Sc. Thesis. The University of Texas at Austin. Austin, Texas, USA.
31. Tomazevic, M., Sheppard, P. (1982) The strengthening of stone-masonry buildings for revitalization in seismic regions, 7th European Conference on Earthquake Engineering, Vol. 5, Athens, pp. 275-282.
32. Tomazevic, M., Weiss, P., Velechovsky, T. and Apih, V. (1991) The strengthening of stone masonry walls with grouting. Structural Repair and Maintenance of Historical Buildings II, Vol. 2: Dynamics, Stabilisation and Restoration, Computational Mechanics Publication, Southampton, Boston, pp. 215-225.



FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.

DIVISION DE EDUCACION CONTINUA

CURSO INTERNACIONAL DE INGENIERIA SISMICA

DISEÑO SISMICO DE EDIFICIOS

COMPORTAMIENTO DE MATERIALES Y ELEMENTOS

MODELOS ANALITICOS / MATEMATICOS DE EDIFICIOS

M. EN I. JOSE LUIS TRIGOS

**Profesor, Facultad de Ingeniería, UNAM
Ingeniero Civil, Consultor
Apartado 74 - 171, México D. F. 09080
(525) 689 - 6888 FAX 689 - 6639**

MEXICO

FI UNAM DEC DISEÑO SISMICO EDIFICIOS JL TRIGOS COMPORTAMIENTO MATERIALES Y ELEMENTOS 1/8

COMPORTAMIENTO DE MATERIALES

PROPIEDADES CUASIESTATICAS.

PROPIEDADES DINAMICAS.

ACERO ESTRUCTURAL

CONCRETO REFORZADO.

MAMPOSTERIA.

MADERA.

SUELOS.

ELECCION DE MATERIALES ESTRUCTURALES.

PROPIEDADES CUASIESTATICAS

CURVAS ESFUERZO - DEFORMACION UNITARIA.

- . RESISTENCIA.
 - COMPORTAMIENTO ELASTICO
- . RIGIDEZ.
- . RESILIENCIA.
 - COMPORTAMIENTO INELASTICO
- . DUCTILIDAD.

ACCIONES MECANICAS.

- . FUERZA AXIAL
- . FUERZA CORTANTE.
- . MOMENTO FLEXIONANTE.
- . MOMENTO TORSIONANTE.
- . COMBINACIONES.

PROPIEDADES DINAMICAS

EFFECTOS DE FATIGA.

EFFECTOS DE CHOQUE E IMPACTO.

PROPIEDADES DE AMORTIGUAMIENTO.

. AMORTIGUAMIENTO VISCOSO.

. AMORTIGUAMIENTO HISTERETICO.

. AMORTIGUAMIENTO DE COULOMB.

COMPORTAMIENTO DE ELEMENTOS

FUERZAS AXIALES.

FUERZAS CORTANTES.

MOMENTOS FLEXIONANTES.

MOMENTOS TORSIONANTES.

ACERO ESTRUCTURAL

COMPORTAMIENTO.

CARGA AXIAL.

FLEXION.

FLEXOCOMPRESION.

CONEXIONES.

EFFECTOS DE CARGAS REPETIDAS.

CONCRETO REFORZADO

COMPORTAMIENTO.

CARGA AXIAL.

FLEXION.

FLEXOCOMPRESION.

CORTANTE.

CONEXIONES.

EFFECTOS DE CARGAS REPETIDAS.

MAMPOSTERIA

COMPORTAMIENTO.

. PIEZAS.

. MORTEROS.

. ACERO DE REFUERZO.

. MAMPOSTERIA.

ENSAYES DE PILAS.

ENSAYES DE MUROS.

ELECCION DE MATERIALES ESTRUCTURALES

ALTA DUCTILIDAD.

ALTA RELACION RESISTENCIA / PESO.

HOMOGENEIDAD.

ORTOTROPIA.

FACILIDAD PARA HACER CONEXIONES DE RESISTENCIA PLENA.

MODELOS ANALITICOS / MATEMATICOS DE EDIFICIOS

INFORMACION BASICA.

INTERACCION CON OTRAS DISCIPLINAS.

ESTRUCTURACION.

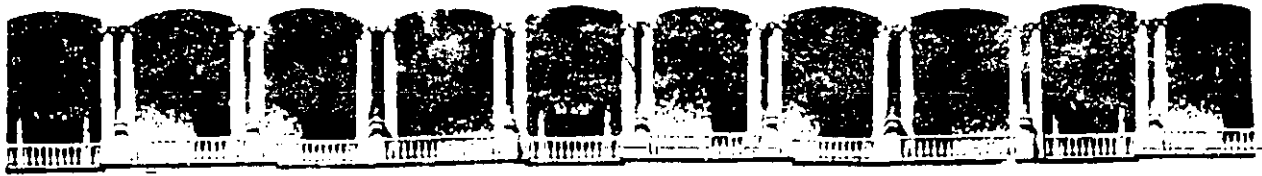
PROPIEDADES GEOMETRICAS Y MECANICAS.

CONDICIONES Y COMBINACIONES DE CARGA.

MODELOS ANALITICOS.

MODELOS MATEMATICOS.

APLICACIONES



**FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA**

XX CURSO INTERNACIONAL DE INGENIERIA SISMICA

MODULO III: DISEÑO SISMICO DE EDIFICIOS

**COMPORTAMIENTO DE MATERIALES Y ELEMENTOS ESTRUCTURALES ANTE
CARGAS REPETIDAS**

DR. ROBERTO MELI PIRALLA

DISEÑO SISMICO DE EDIFICIOS

TEMA 1: COMPORTAMIENTO DE MATERIALES Y ELEMENTOS ESTRUCTURALES ANTE CARGAS REPETIDAS (Texto: Capitulo 13 de la Ref. 1 pp 381 a 422)

1. *Características que definen la respuesta sísmica*

La respuesta sísmica de una estructura depende de sus características carga-deformación ante cargas dinámicas alternadas.

La filosofía implícita en los reglamentos de diseño admite que las estructuras sobrepasen el intervalo de comportamiento elástico bajo el efecto del sismo de diseño. Interesa por tanto el comportamiento hasta la ruptura.

La respuesta de la estructura completa depende de la de los elementos que la componen y esta de la de las secciones y de los materiales. Es necesario entonces conocer las relaciones esfuerzo-deformación de los principales materiales y elementos estructurales.

Una relación carga-deformación típica ante carga monotónicamente creciente se muestra en la fig 1. Los parámetros de la curva que interesan son rigidez, resistencia y ductilidad. De la rigidez dependen no solo las deformaciones que va a presentar la estructura bajo una acción dada, sino también la magnitud de la acción sísmica que esta va a tener que soportar. De la ductilidad depende esencialmente la capacidad de disipar la energía del sismo. Para muchos materiales es válida una idealización elastoplástica de la relación carga-deformación.

El factor de ductilidad Δ_u / Δ_y es la medida más común de la ductilidad; un material frágil tiene factor de ductilidad cercano a uno, como por ejemplo el concreto no reforzado sujeto a tensión; el acero de grado estructural puede alcanzar factores de ductilidad superiores a 20.

La ductilidad de una estructura en su conjunto es generalmente mucho menor que la ductilidad local que puede desarrollar una sección: depende del número de secciones que entran en fluencia antes del colapso de la estructura,

fig 2. Para el comportamiento sísmico de una estructura interesa su ductilidad global; para lograr un factor de ductilidad global alto se requiere que las secciones individuales tengan ductilidades grandes y que en el mecanismo de colapso de la estructura intervenga el mayor número posible de articulaciones plásticas.

Ante repeticiones de cargas alternadas la relación carga-deformación se modifica en forma más importante mientras más se sobrepase el intervalo "Elastico" de comportamiento, fig 3b. Las curvas descendentes (de descarga) difieren cada vez más de las de carga y se forman "lazos" o ciclos histeréticos. La respuesta sísmica depende fundamentalmente del área incluida en los lazos histeréticos que define la energía disipada por la estructura y por tanto su amortiguamiento histerético, fig 4.

En algunos materiales y en ciertos elementos estructurales las curvas histeréticas se asemejan a las de un comportamiento *elastoplástico* perfecto, fig 3c, en los que la curva para el primer ciclo de carga se mantiene aproximadamente constante ante repeticiones de ciclos y se tiene una gran capacidad de disipación de energía a través de ciclos histeréticos estables.

Otros materiales dan lugar también a ciclos histeréticos estables pero con una forma radicalmente distinta a la del primer ciclo y que incluye un área mucho menor que la que se tiene en un comportamiento elastoplástico, fig 3d; finalmente en otros casos se tiene un deterioro progresivo de rigidez y resistencia, fig 3e, que representa un daño irreversible en la estructura y una reducción progresiva de su capacidad de absorción de energía.

Se han propuesto diversos modelos teóricos del comportamiento histerético, los cuales se emplean para estudiar el comportamiento dinámico no lineal de estructuras (Masing, Ramberg-Osgood, Trilinear, etc).

El comportamiento sísmico en el intervalo inelástico depende esencialmente de las características de los ciclos histeréticos, el parámetro *ductilidad* no es suficiente para definir el comportamiento sísmico ya que a un mismo factor de ductilidad pueden corresponder capacidades muy distintas de disipación de energía.

Comportamiento ante cargas dinámicas y estáticas: La mayoría de los estudios sobre el comportamiento inelástico de estructuras se han realizado con ensayos ante pocos ciclos de carga estática alternadas. Se ha considerado siempre que esto es conservador con respecto al comportamiento ante cargas dinámicas, aunque hay algunos casos en que parece no ser así.

2. *Comportamiento de materiales (medido en especímenes estándar)*

a) *Concreto simple (ref 2 pp 65 a 150)*

La curva σ - ϵ en compresión y tensión, fig 5, muestra un comportamiento frágil en ambos casos. Las deformaciones de falla son pequeñas. El microagrietamiento causa desviaciones de la linealidad a partir de $0.4 f'_c$ y produce deformaciones irreversibles.

Efecto de la velocidad de carga, fig 6. Aumenta la resistencia y la rigidez, pero disminuye las deformaciones de falla, y vuelve más frágil el comportamiento.

Efecto del confinamiento en el concreto (ver ref 3 pp 20 a 30). Al aumentar el esfuerzo de confinamiento aumentan tanto la resistencia como la capacidad de deformación, fig 7; los resultados de ensayos de compresión triaxial son extrapolables para el estudio del efecto del confinamiento proporcionado por el refuerzo transversal. La diferencia de eficacia de un zuncho espiral y de estribos se muestra en la fig 7b. Con espiral puede incrementarse resistencia y ductilidad; con estribos solo ductilidad, pero en forma mucho menor que con espiral.

Efecto de la repetición de carga, fig 8. Para repeticiones esfuerzos altos de compresión el concreto no confinado se deteriora rápidamente.

b) *Acero estructural, de refuerzo y de presfuerzo (ref 4 pp 42 a 64)*

La curva esfuerzo-deformación del acero depende de su composición química y del tratamiento a que haya sido sometido. El módulo de elasticidad es cons

tante. El esfuerzo de fluencia (real o aparente) aumenta con el contenido de carbono y puede incrementarse por una reducción de área o por torcido efectuado en frío, fig 9. La meseta de fluencia se pierde a medida que aumenta f_y y si se trabaja en frío. La relación f_u/f_y y la ϵ_u disminuyen al aumentar f_y . Los factores de ductilidad son siempre grandes, exceden de 10 aún para los aceros menos dúctiles.

El efecto de la velocidad de carga en la resistencia y en la ductilidad es poco importante.

Ante el efecto de cargas alternadas que exceden la fluencia, el límite de proporcionalidad se reduce y la $\sigma-\epsilon$ se hace más redondeada (efecto de Bauschinger); los ciclos son muy estables y no muestran deterioro (fig 10).

c) *Otros materiales*

En los *metales* el comportamiento es cualitativamente como el del acero.

En la *mampostería* varía mucho según los materiales que la compongan (piezas y morteros). La fig 11 muestra algunas curvas típicas para mampostería, ref 5. El comportamiento en general muy frágil, especialmente cuando se emplean materiales de alta resistencia. El comportamiento ante cargas alternadas muestra un deterioro total a menos que se cuente con un refuerzo adecuado.

Las propiedades de la *madera* varían según la especie, la densidad, el contenido de humedad y son muy sensibles a la velocidad de aplicación de la carga, fig 12. El modo de falla del material es muy frágil aunque las estructuras de madera pueden tener alta disipación de energía si se detallan adecuadamente las uniones (ver capítulo correspondiente).

3. *Comportamiento de elementos estructurales*

3.1 *Vigas y columnas de concreto reforzado (ver ref 3 pp 195 a 169)*

a) *Flexión:* La relación momento-curvatura de secciones de concreto

reforzado se obtiene a partir de las hipótesis básicas del comportamiento del concreto en flexocompresión. Las curvas de la fig 13 muestran la influencia en la resistencia y la ductilidad de las cuantías de acero de tensión y compresión en su relación con la cuantía balanceada. Se concluye que si la cuantía de refuerzo de tensión es muy inferior a la balanceada se obtienen grandes ductilidades (comparables a las del acero). El refuerzo de compresión es de gran ayuda en incrementar la ductilidad. El efecto del refuerzo transversal en la relación momento curvatura de vigas se ve en la fig 14. El confinamiento que esto proporciona aumenta la ductilidad cuando la falla es cercana a la balanceada.

b) *Flexocompresión:* La relación momento curvatura puede calcularse con el mismo procedimiento que para elementos en flexión. La ductilidad depende del nivel de carga axial (fig 15). Para falla de compresión la ductilidad es casi nula a menos que se cuente con confinamiento importante, fig 16. Para falla de tensión se tiene cierta ductilidad, pero solo para cargas axiales muy pequeñas esta es importante.

c) *Efecto de cargas repetidas en elementos en flexocompresión:* En flexión simple y con cuantías bajas de acero el comportamiento es cualitativamente como el del acero: gran ductilidad y poco deterioro. Puede predecirse con buena aproximación empleando las hipótesis para concreto en flexocompresión. El deterioro ocurre solo para deformaciones muy altas debido al pandeo del acero de compresión. La degradación es mucho mayor cuando hay esfuerzos cortantes altos en las secciones críticas (articulaciones plásticas) o también cuando hay posibilidad de deslizamiento de las barras por adherencia, ver fig 17. Importantes estudios al respecto han sido realizados en Berkeley (ref 6), y en Nueva Zelanda. Se recomiendan estribos poco espaciados para evitar pandeo de barras y para confinar el concreto, altas cuantías de acero de compresión y desprestigiar la contribución del concreto a la resistencia en cortante. En el tema de estructuras de concreto se tratará con mayor detalle este punto.

Cuando hay cargas axiales importantes la ductilidad es baja y el deterioro ante repetición de cargas es importante, fig 17c.

d) *Contante, torsión y adherencia.* El modo de falla ante cortante y torsión es netamente frágil; aún cuando exista refuerzo transversal se gana poca ductilidad y el deterioro es muy rápido. Algo similar es el comportamiento cuando hay problemas de adherencia. Por tanto deben tomarse factores de seguridad mayores contra estos efectos que contra flexión.

3.2 *Elementos de concreto presforzado (ver ref 7 pp 49 a 81)*

Su comportamiento no difiere mucho del reforzado: pueden alcanzarse las mismas ductilidades siempre que la cuantía de refuerzo sea baja ($\rho \approx 0.2$) y el nivel de carga vertical también. El admitir que ante el sismo de diseño fluya el acero de presfuerzo es debatible, porque si fluye se pierde el presfuerzo y es difícil restaurarlo.

Ante cargas repetidas el comportamiento es distinto: fig 18; se tiene mucho menos disipación de energía; por tanto para resistir un mismo sismo se requiere mayor resistencia o mayor deformación inelástica que en concreto reforzado, fig 19.

El empleo de elementos continuos presforzados es poco usual.

3.3 *Elementos de acero estructural (ver ref 8 pp 125 a 159)*

El comportamiento en flexión es sumamente dúctil, pero la ductilidad puede verse afectada por pandeo local o pandeo lateral después de la fluencia, fig 20. El efecto de Bauschinger suaviza el acero y lo hace más propenso al pandeo. Hay que restringir las dimensiones de las secciones para asegurar la plastificación total sin que ocurra pandeo o colocar atiesadores poco espaciados. Secciones compactas. En columnas la capacidad de rotación es muy reducida. La práctica recomendable es sobrediseñar las columnas de manera que las articulaciones plásticas se formen en las vigas.

Ante cargas alternadas los ciclos son muy estables (si no hay problemas de pandeo) y hay gran disipación de energía, fig 21.

Hay que tener cuidado con las uniones: deben sobrediseñarse porque normalmente son menos ductiles que las secciones de las vigas.

3.4 Muros

Son elementos que proporcionan gran rigidez a las estructuras y frecuentemente se requieren en edificios de mediana o gran altura para limitar las deflexiones a valores admisibles.

a) *Muros de concreto* (ver ref 3 pp 610 a 660). Su comportamiento depende esencialmente de su relación altura a longitud H/L (o más correctamente de $\frac{M}{VL}$). Usualmente $H/L > 2$ y son por lo tanto elementos de flexión con bajos niveles de carga axial. Se comportan como vigas; mucha ductilidad, fig 22. Ante cargas alternadas su absorción de energía es alta y su deterioro bajo si rige flexión, fig 23. Si rige cortante mucho deterioro, fig 24. En muros bajos rige cortante casi siempre y la falla es poco dúctil y hay mucho deterioro. Problemas en las vigas que acoplan los muros entre sí o con marcos (se verán con más detalle en el tema de Estructuras de Concreto).

b) *Muros de mampostería*: (ver ref 9). Son elementos rígidos y frágiles; aceptan muy poca deformación lateral. Requieren de confinamiento y/o refuerzo para tener cierta ductilidad, fig 25. Tienen mucho deterioro especialmente si las piezas son huecas. Pueden diseñarse para que rija flexión, entonces el comportamiento puede ser mucho más favorable.

REFERENCIAS

1. N M Newmark y E Rosenblueth "Fundamentals of Earthquake Engineering" Prentice Hall, 1971
2. A M Neville "Properties of Hardened Concrete" en *Reinforced Concrete Engineering*, editado por B Bresler. Vol 1, Cap 3, J Wiley, 1974
3. R Parks y T Paulay "Reinforced Concrete Structures" J Wiley, 1975
4. J F McDermott "Reinforcing Steel" en *Reinforced Concrete Engineering* Vol 1 Cap 2 editado por B Bresler, J Wiley, 1974
5. R Meli y A Reyes "Propiedades Mecánicas de la Mampostería" Instituto de Ingeniería, Informe No. 288 (Jul 1971)
6. V V Bertero y E P Popov "Hysteretic Behavior of Ductile Moment-Resisting Reinforced Concrete Frame Components" Report No EERC 75-16 Univ of California, Berkeley, 1975
7. R W G Blakeley "Prestressed Concrete Design" en *Structural Design for Earthquakes*, publicado por Centre for Continuing Education, The University of Auckland N. Zeland 1972
8. G W Butcher "Steel Design" en *Structural Design for Earthquakes*, publicado por Centre for Continuing Education, Univ of Auckland, N Z 1972
9. R Meli "Comportamiento sísmico de muros de mampostería", Instituto de Ingeniería, Informe No. 352 Abr 1975

REFERENCIAS ADICIONALES

- J A Blume, N M Newmark y L H Corning "Design of Multistory Reinforced Concrete Building for Earthquake Motions" Portland Cement Association, 1961
- D J Dowrick "Earthquake Resistant Design", J Wiley, 1977

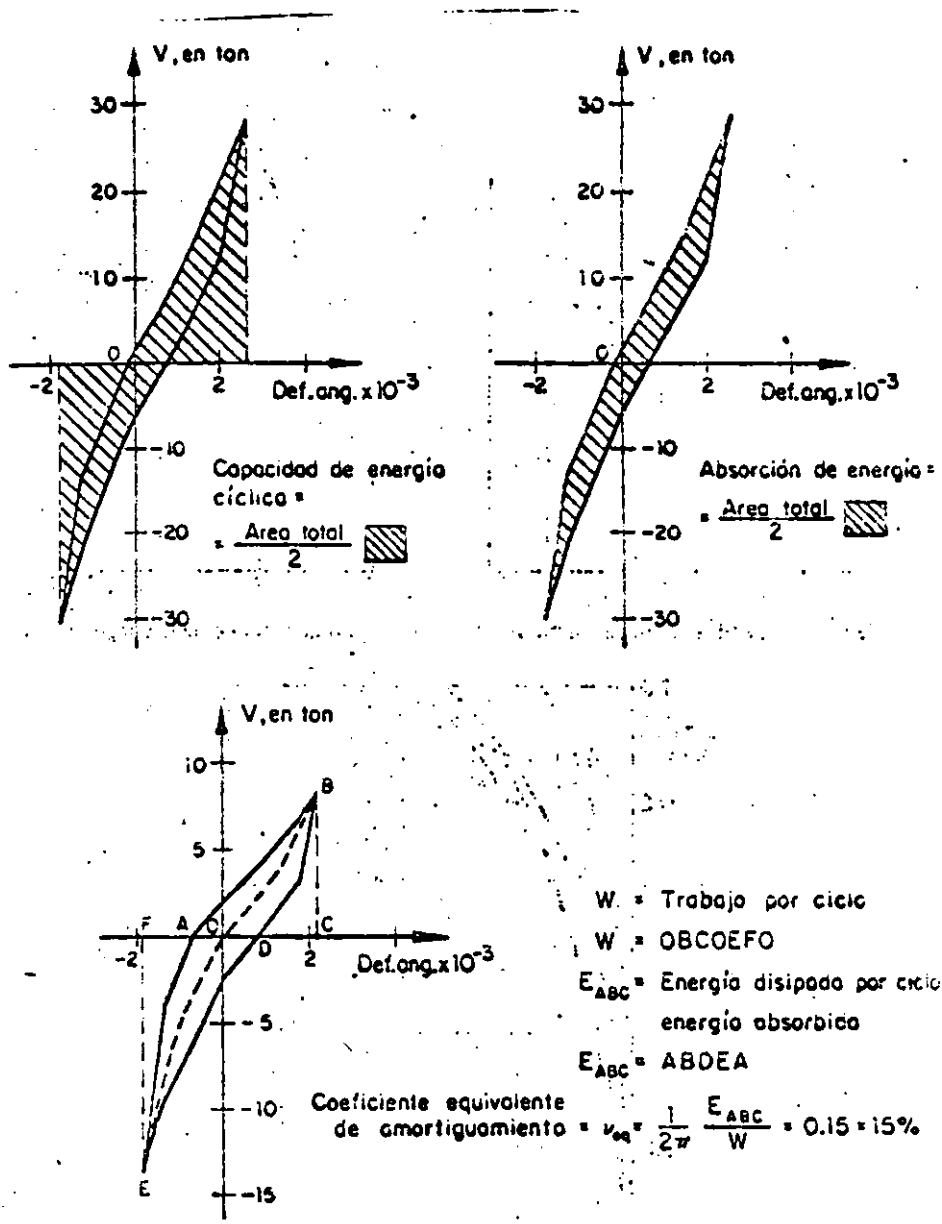
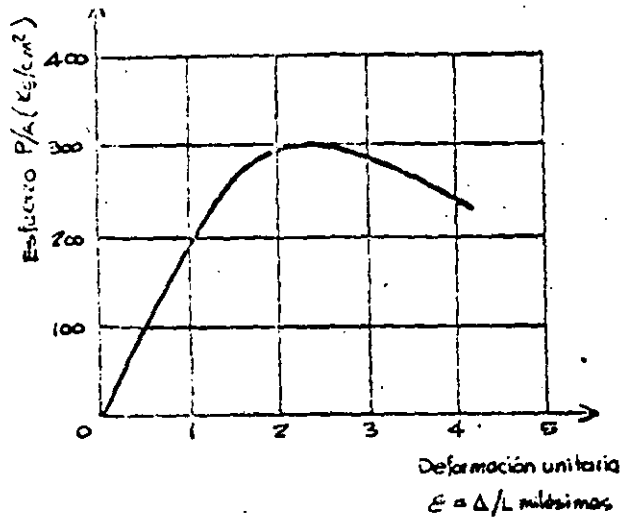
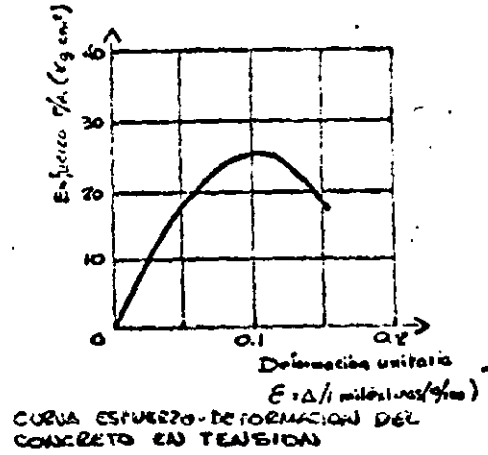


Fig 4 Definición de términos relacionados con la capacidad de disipación de energía



CURVA ESFUERZO-DEFORMACION DEL CONCRETO EN COMPRESION



CURVA ESFUERZO-DEFORMACION DEL CONCRETO EN TENSION

Fig 5 Curvas esfuerzo deformación del concreto simple

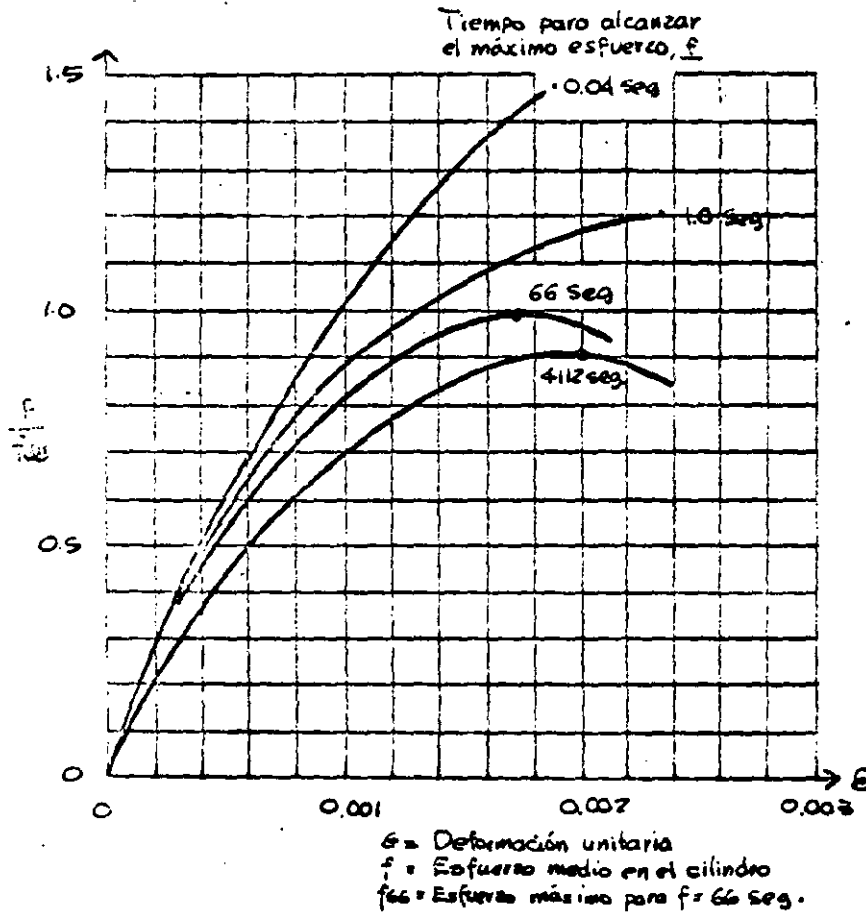
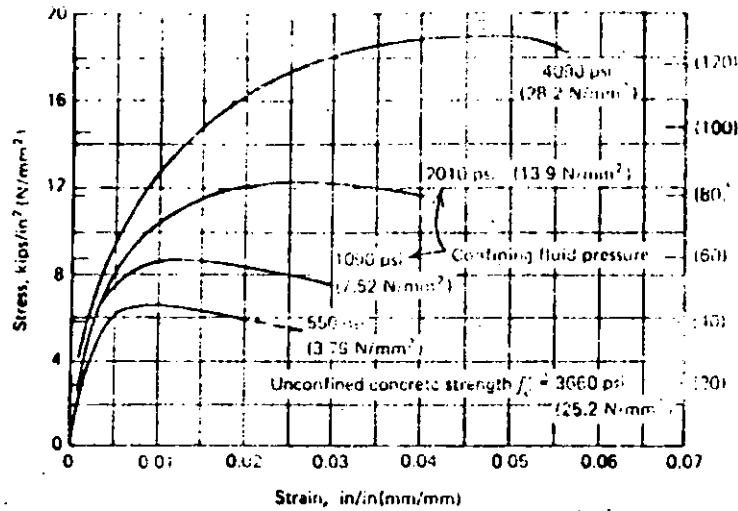
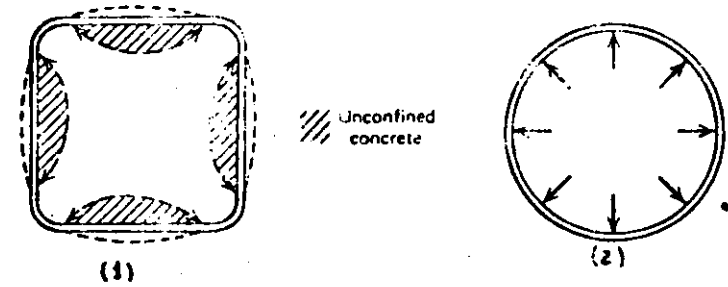


Fig 6 EFECTO DE LA VELOCIDAD DE CARGA (Hatakeyama)

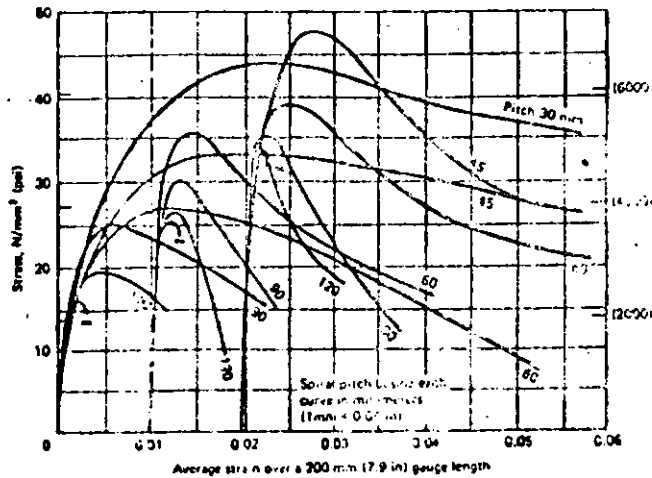


$$f'_{cc} = f'_c + 4.1f_i$$

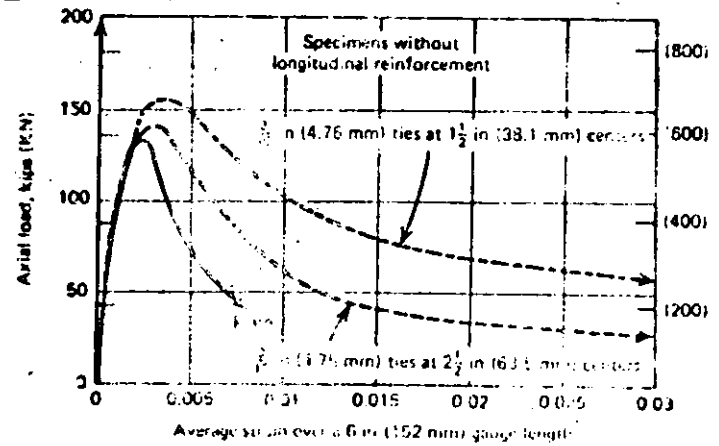
a) Resultados de ensayos a compresión triaxial



b) Confinamiento proporcionado por estribos (1) y por hélices (2)



c) Curvas esfuerzo deformación de cilindros de concreto reforzados con hélices 6.5 mm de diámetro, de acero grado estructural y distintos espaciamientos



d) Curvas esfuerzo deformación de prismas de concreto con diversos contenidos de estribos

Fig 7 Efecto del confinamiento en la curva esfuerzo deformación del concreto

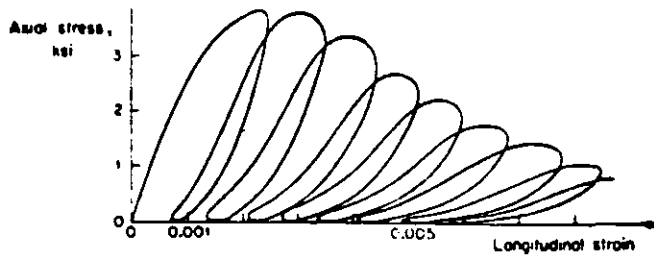


Fig 8 Efecto de la repetición de esfuerzos de compresión en el concreto simple

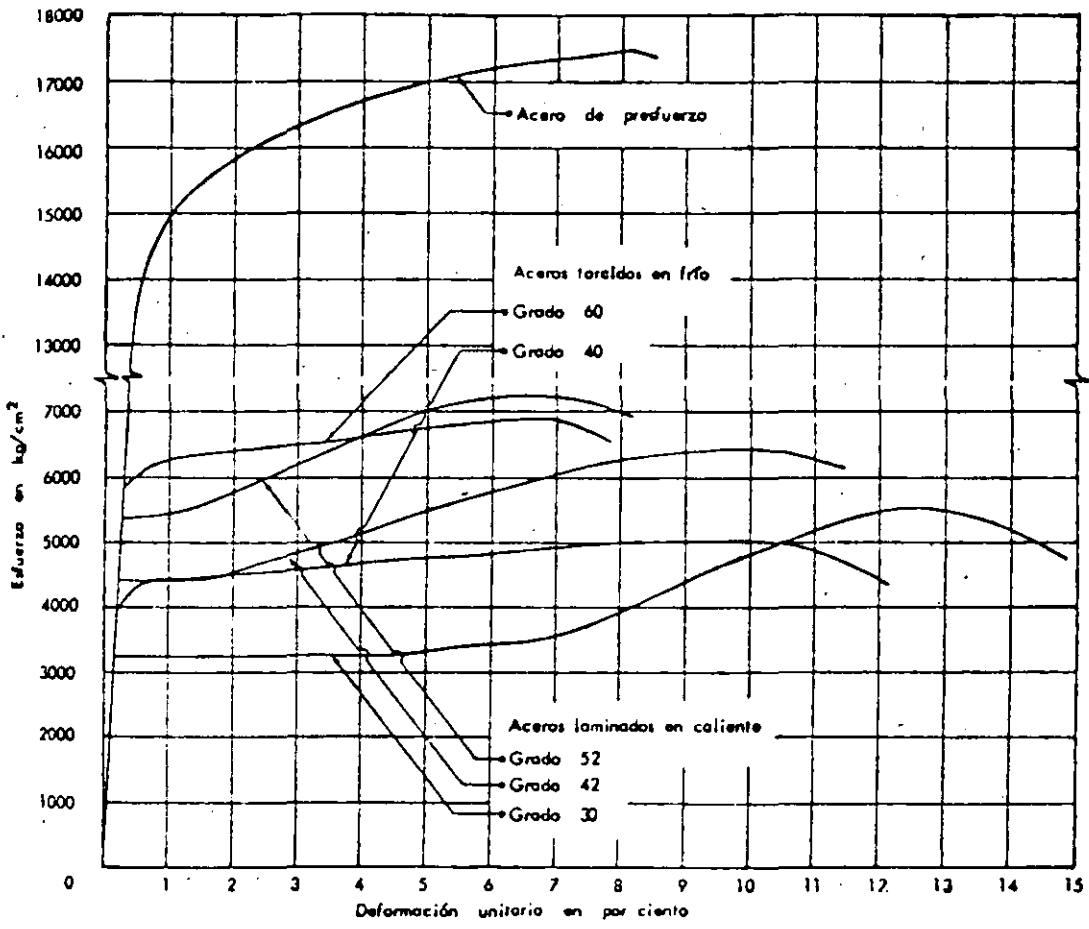


Fig 9 Curvas típicas esfuerzo-deformación para distintos tipos de acero de refuerzo

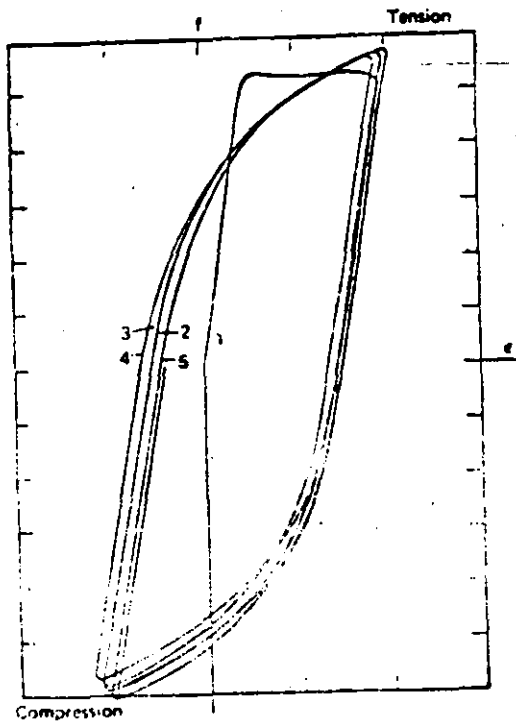


Fig 10 Ciclos histéricos en una barra de refuerzo

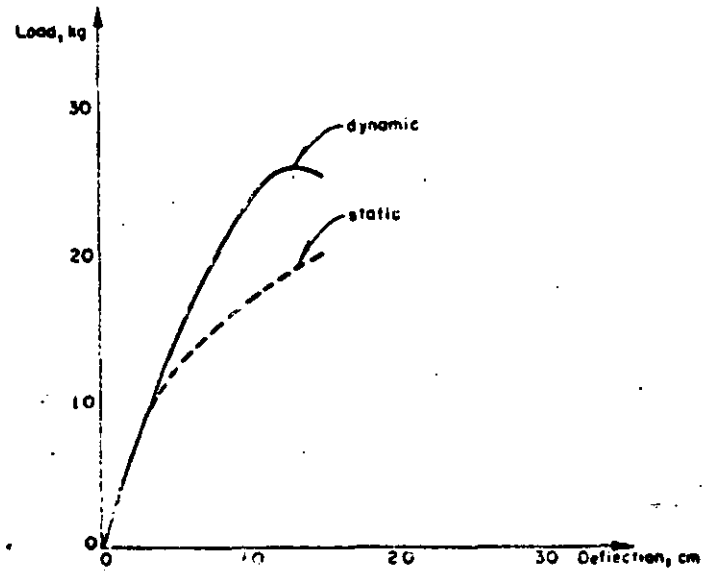


Fig 12 Curvas carga-deformación estática y dinámica para la madera

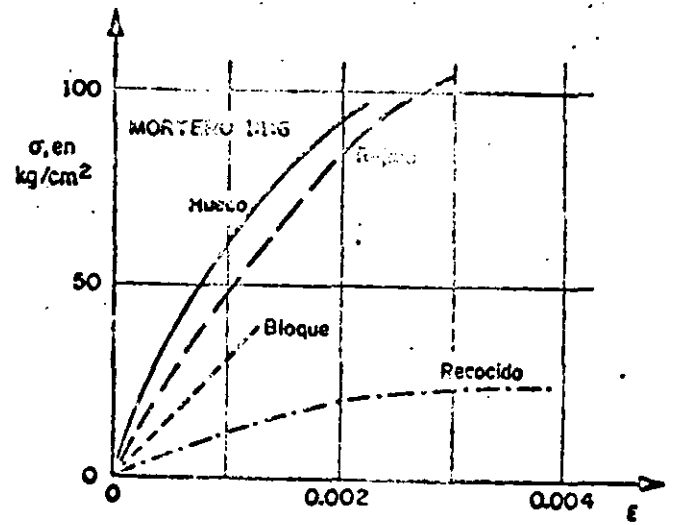
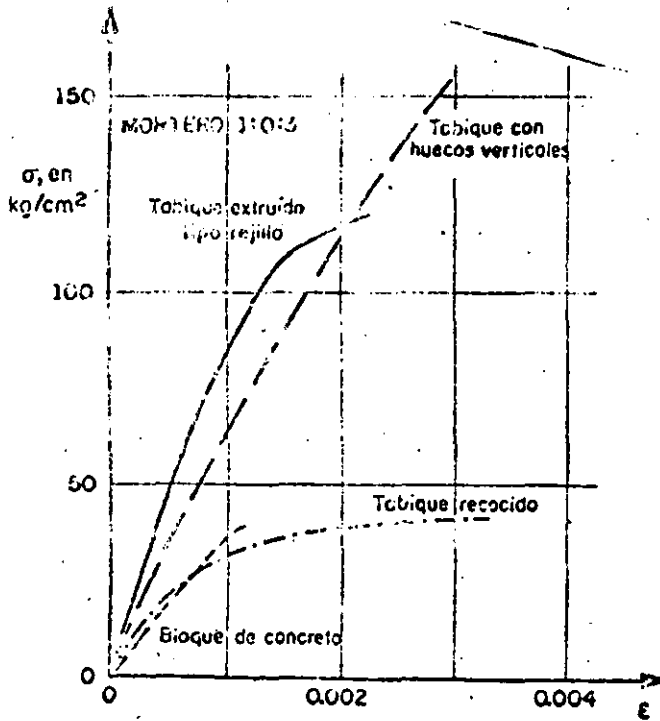


Fig 11 Curvas carga-deformación para mampostería en compresión

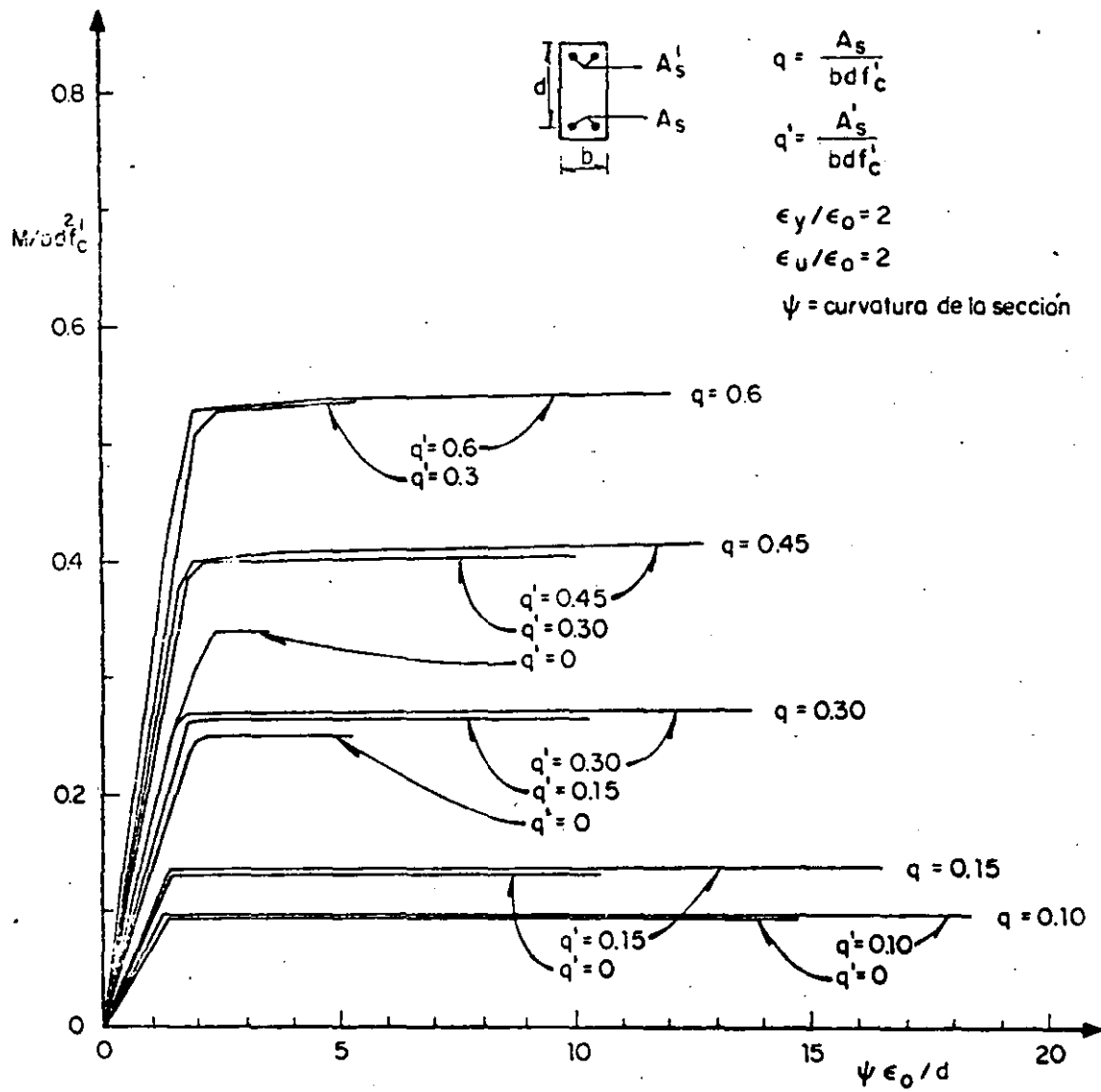
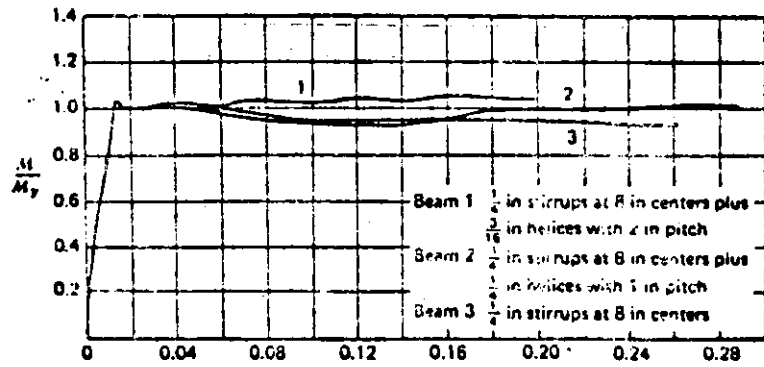
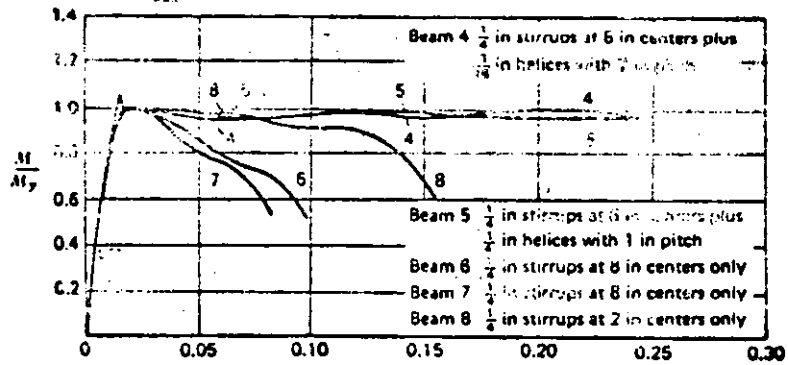


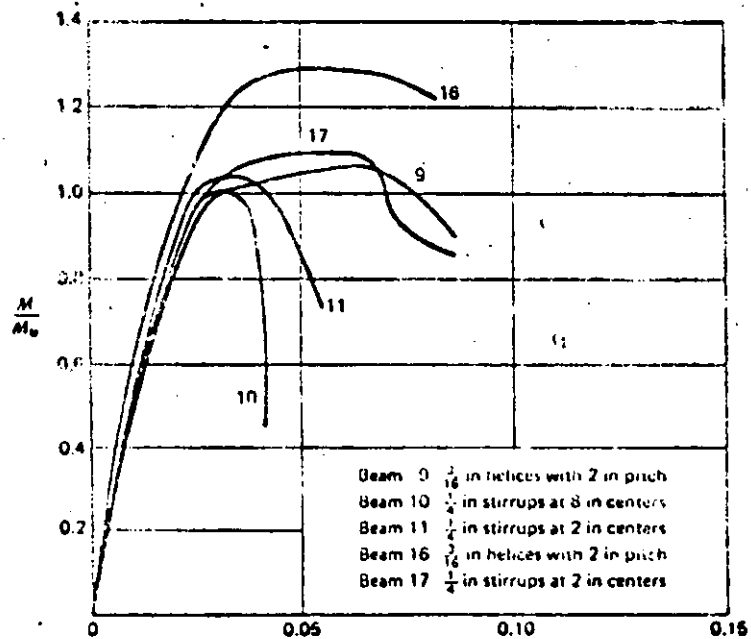
Fig 13 Relaciones Momento-Curvatura para secciones de concreto reforzado sujetas a flexión



a) Vigas subreforzadas

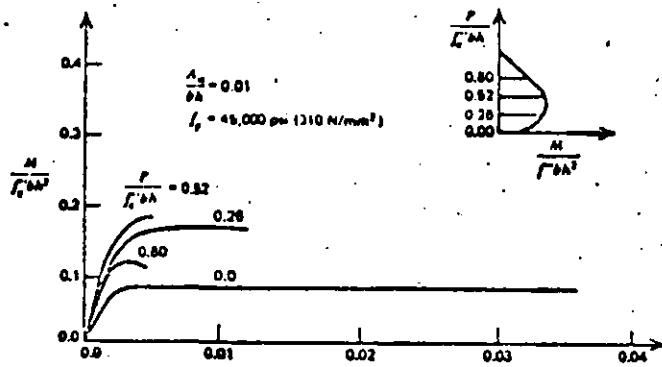


b) Vigas con falla balanceada

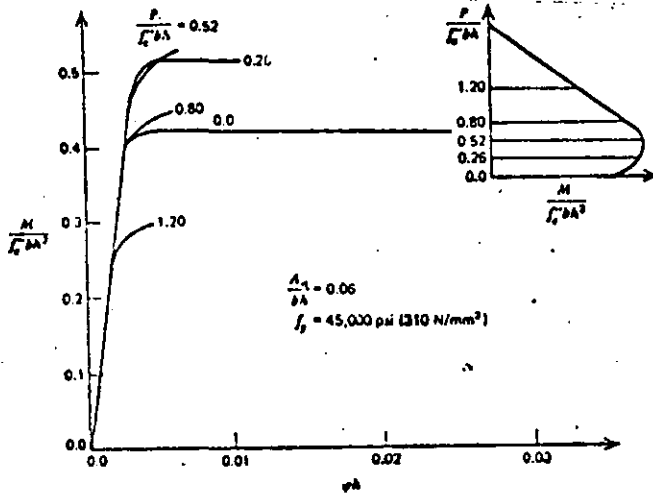


c) Vigas sobreforzadas

Fig 14 Efecto del refuerzo transversal en la relación momento de concreto reforzado sujeto a flexión



a) Columna con baja cuantía de refuerzo



b) Columna con alta cuantía de refuerzo

Fig 15 Relaciones momento-curvatura de secciones de concreto sujetas a flexocompresión

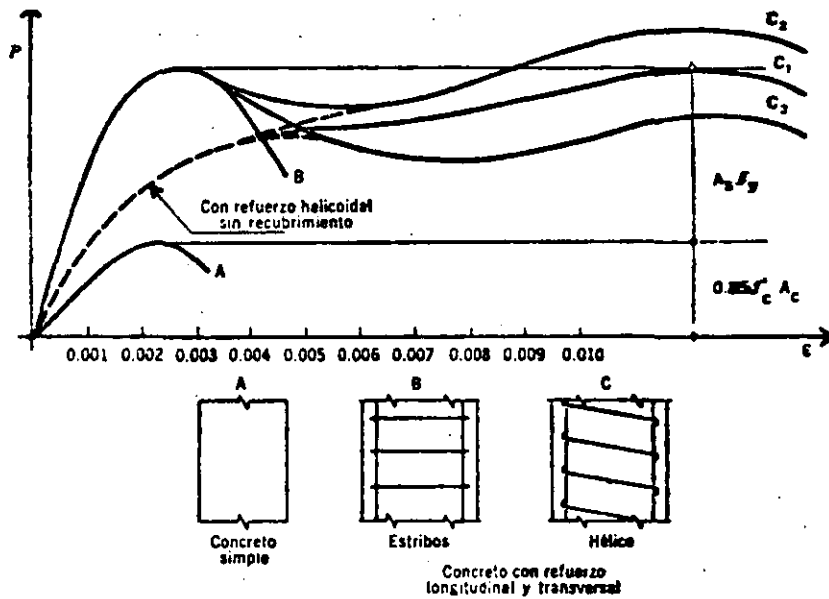
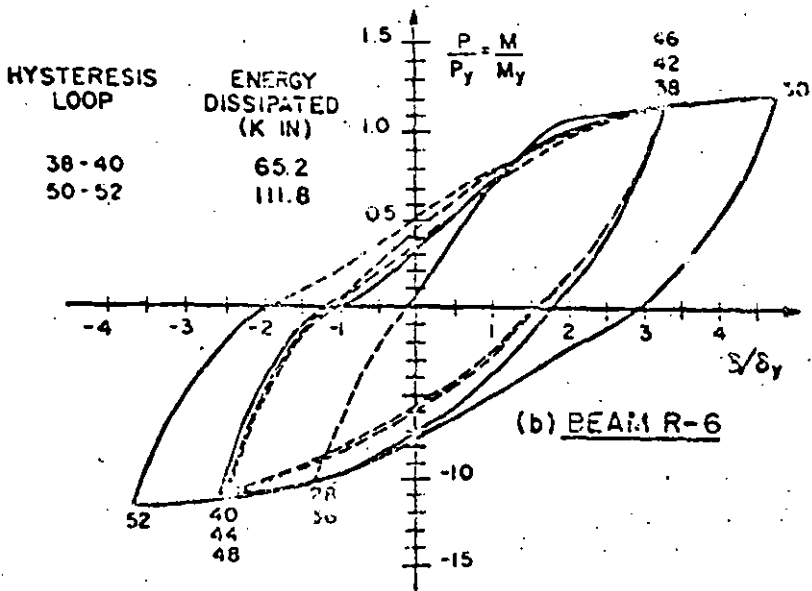
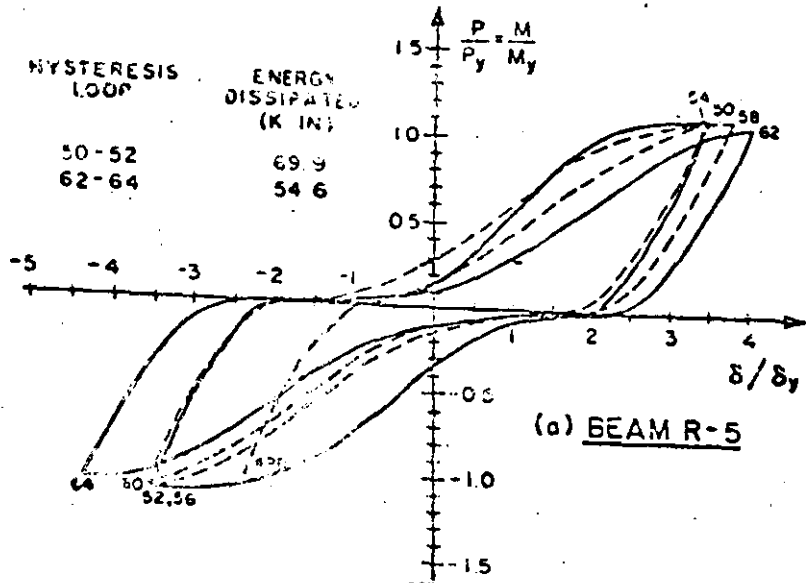


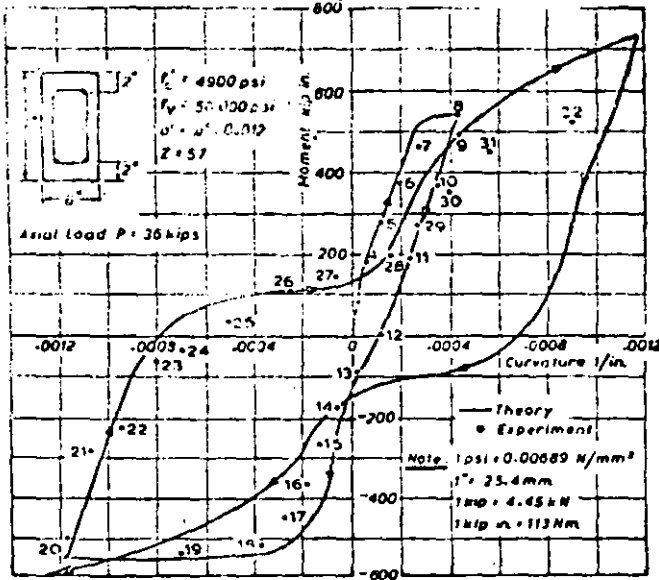
Fig 16 Efecto de confinamiento en la ductilidad de columnas



a) Falla por flexión con esfuerzos cortantes bajos

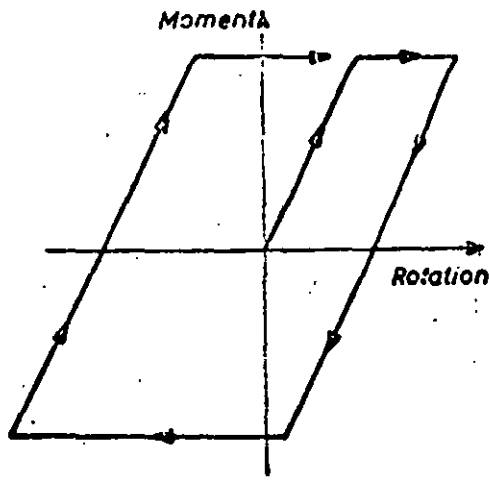


b) Falla por flexión con esfuerzos cortantes altos

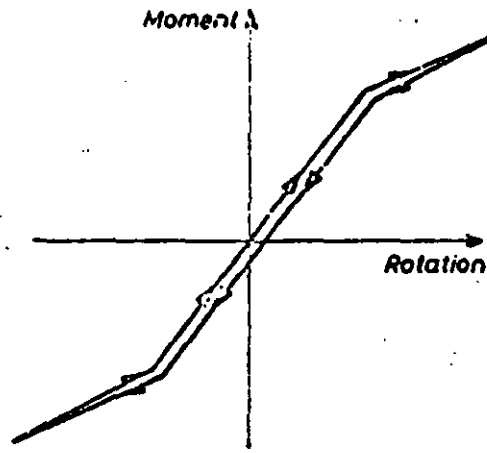


c) Columna con carga axial baja

Fig 17 Comportamiento histerético de secciones de concreto reforzado



a) Concreto reforzado



b) Concreto presforzado

Fig 18 Comparación del comportamiento histerético del concreto reforzado y presforzado

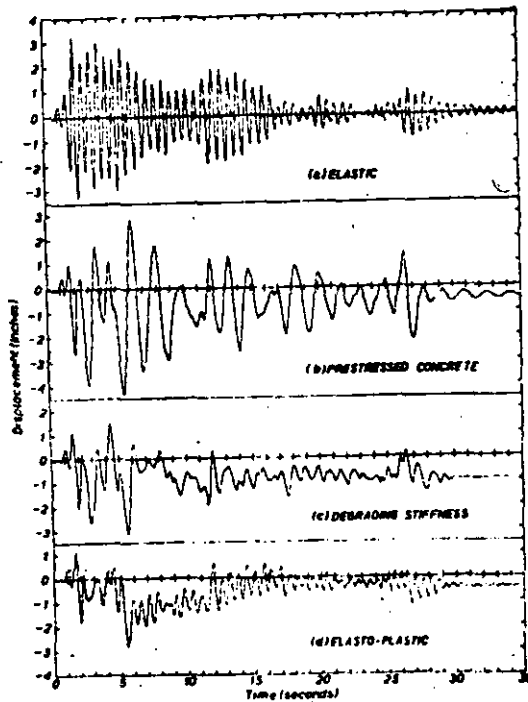
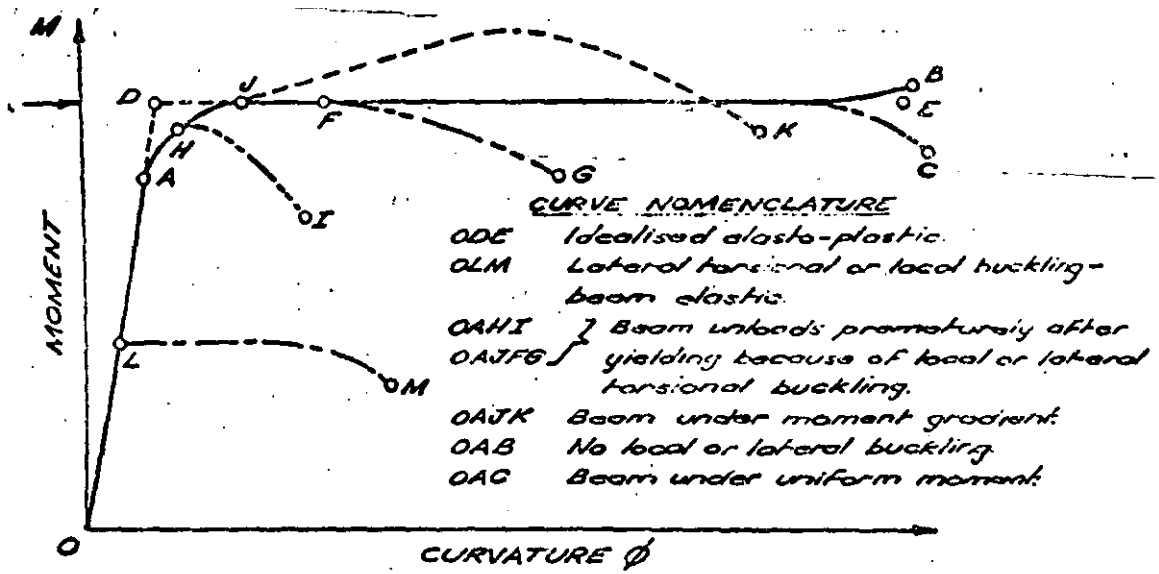


Fig 19 Comparación de deformaciones ante un sismo de un elemento de concreto reforzado y uno presforzado



a) Vigas

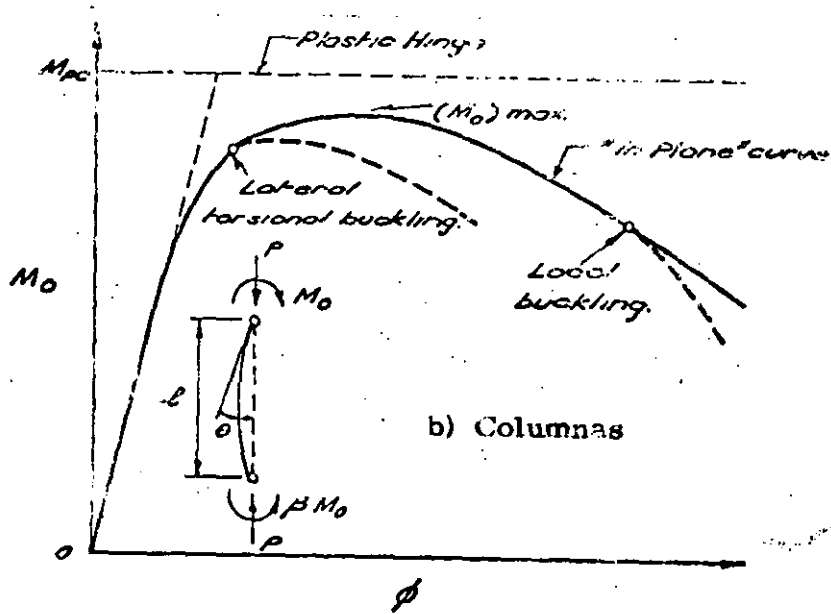


Fig 20 Relaciones momento-curvatura idealizadas en elementos de acero estructural

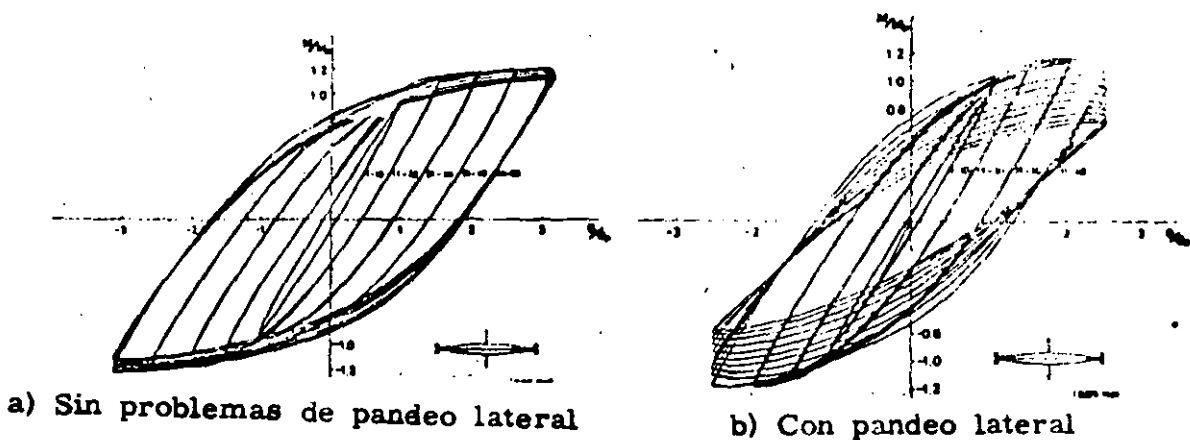
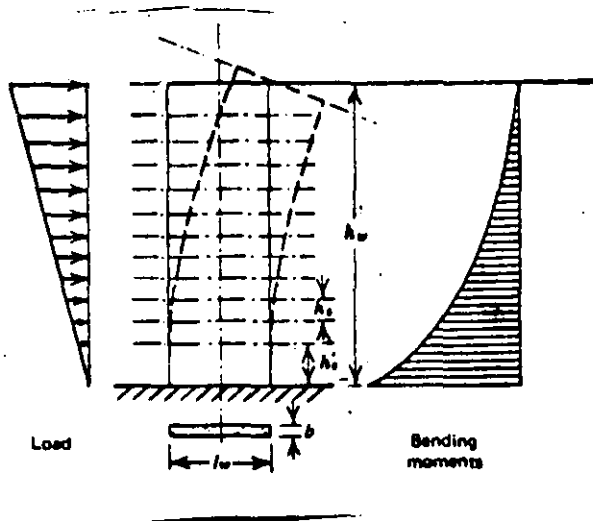
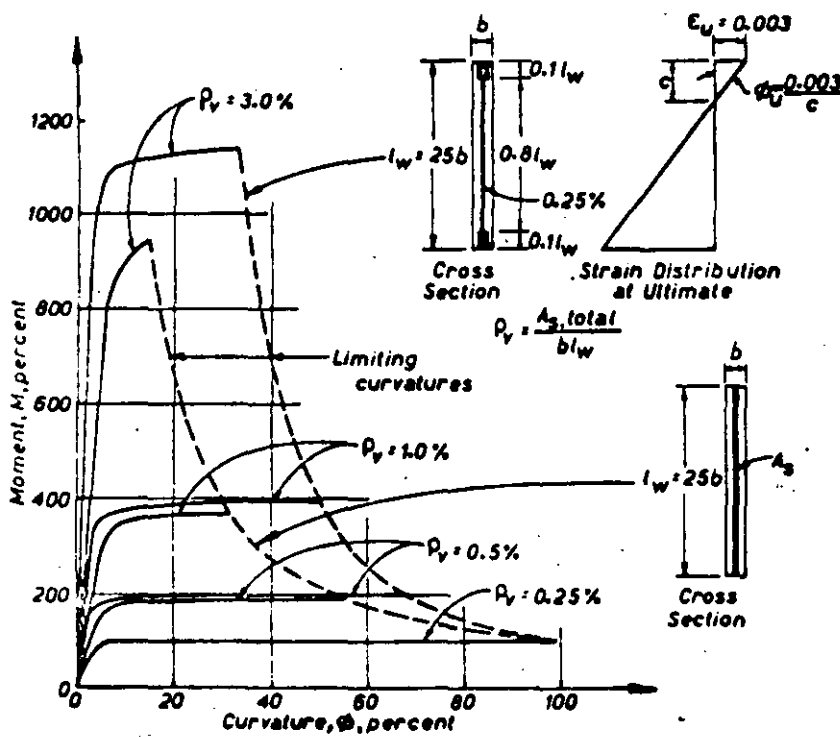


Fig 21 Comportamiento histerético de elementos de acero estructural

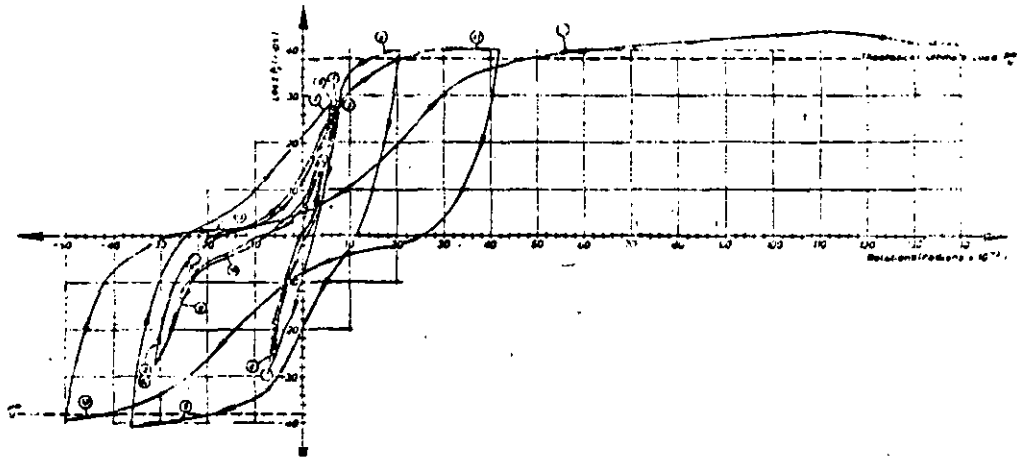


a) Deformaciones

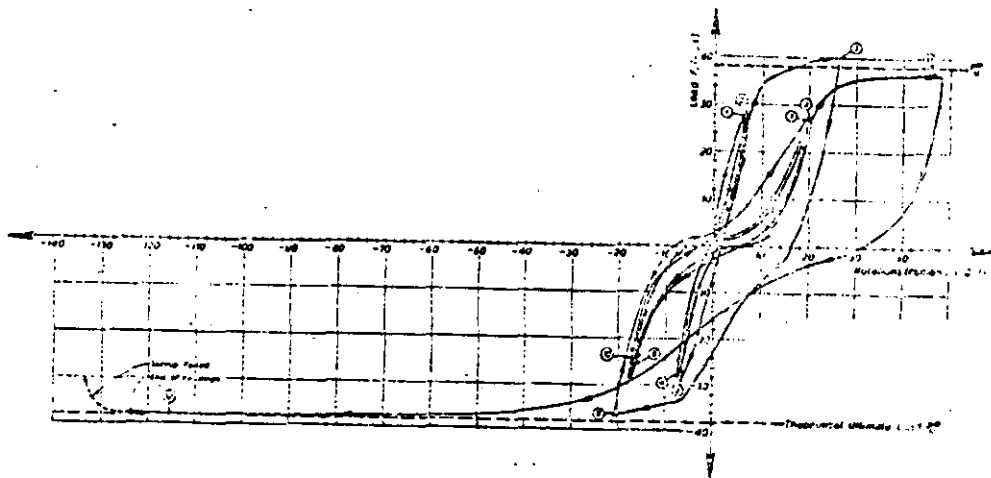


b) Relación momento-curvatura para distintas cuantías de refuerzo

Fig 22 Comportamiento de muros altos sujetos a cargas laterales

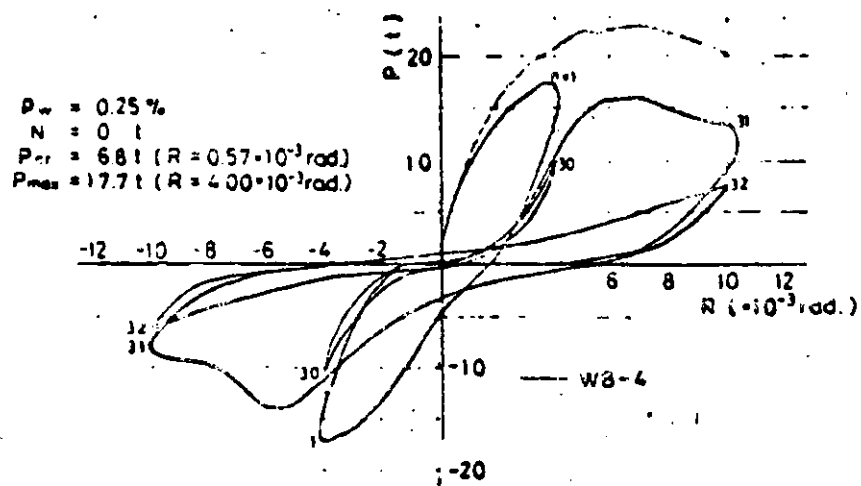


a) Falla por flexión sin agrietamiento diagonal

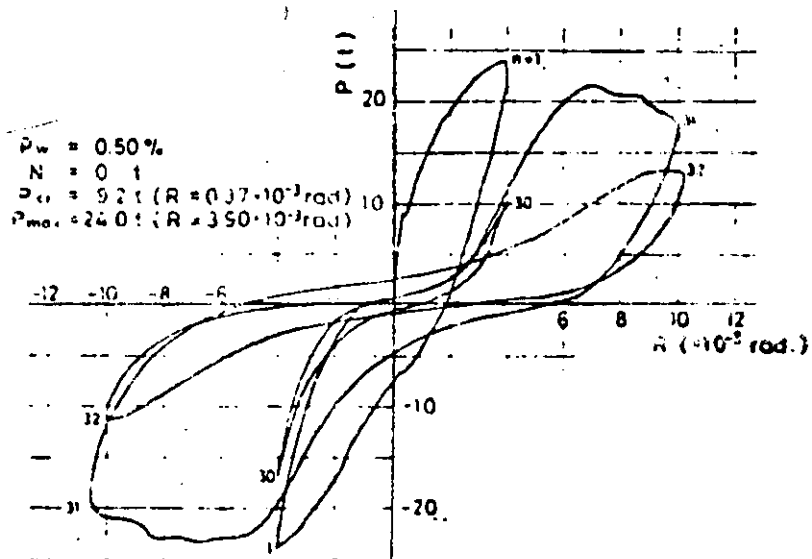


b) Falla por flexión después de agrietamiento diagonal

Fig 23 Ciclos histeréticos para muros cortos con falla por flexión

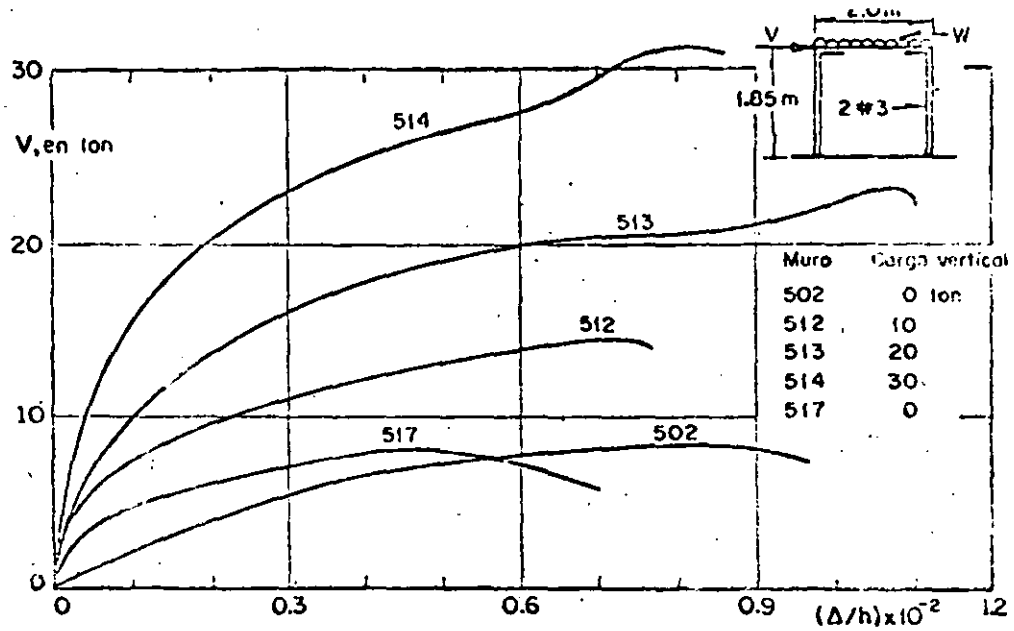


a) Cuantía de refuerzo horizontal 0.25%

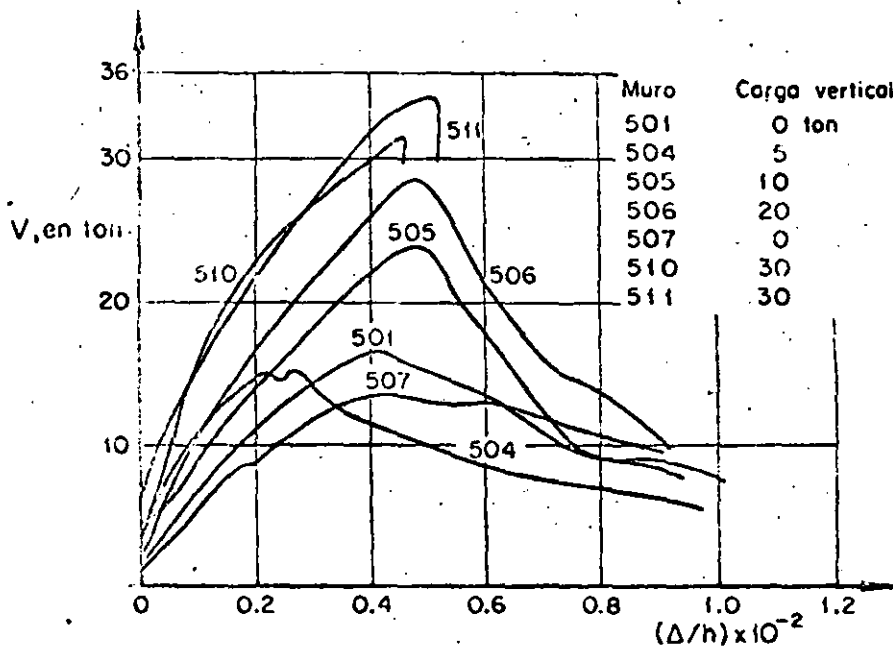


b) Cuantía de refuerzo horizontal 0.50%

Fig 24 Ciclos histeréticos en muros cortos con falla por cortante



Muros de bloque de concreto. Falla en flexión. Efecto de la carga vertical



Muros de bloque de concreto. Falla en tensión diagonal. Efecto de la carga vertical

Fig 25 Curvas Carga deformación para muros de mampostería



**FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA**

CURSO INTERNACIONAL DE INGENIERIA SISMICA

DISEÑO SISMICO DE UN EDIFICIO DE CONCRETO REFORZADO

Sergio M. Alcocer

- 1. DESCRIPCION DEL EDIFICIO**
- 2. ESTRUCTURACION**
- 3. DIMENSIONAMIENTO (DISEÑO PRELIMINAR)**
- 4. ANALISIS ESTRUCTURAL**
- 5. DISEÑO**
- 6. INTERACCION SUELO-ESTRUCTURA**

1. DESCRIPCION DEL EDIFICIO

- Centro de Salud: Grupo A
- Seis pisos más un sótano
- Altura de entrepiso: sótano y planta baja: 4.5 m
resto: 3.6 m
- Area total construida: 5440 m² (7 niveles)
- Zona III, D.F.
- Ver planta anexa

2. ESTRUCTURACION

a) Material

Concreto reforzado: economía

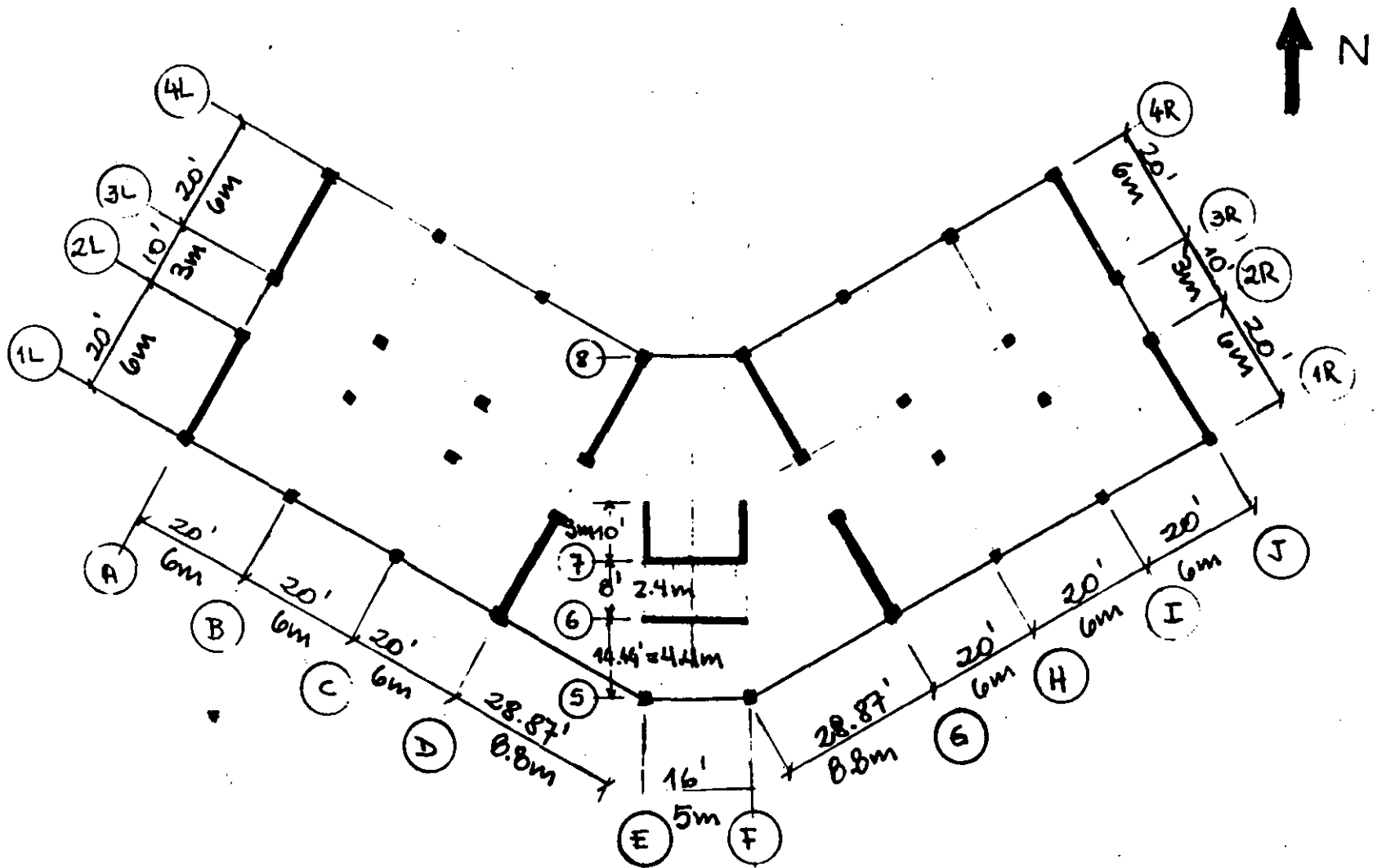
- + resistencia de diseño del concreto a la compresión: $f_c' = 300 \text{ kg/cm}^2$: clase 1
- + resistencia de fluencia del acero: $f_y = 4200 \text{ kg/cm}^2$

b) Estructuración

- marcos dúctiles: RDF, Q = 4
- muros, Q = 3
- marcos-muros, Q = 3 **

Sistema resistente de fuerzas laterales:

- muros acoplados en la dirección NS
 - núcleo de elevadores y escaleras en la dirección EW
- **** Los muros acoplados controlan desplazamientos de las alas



PLANTA DEL EDIFICIO

Sistema resistente de cargas gravitacionales

Marco

- losa en dos direcciones
- vigas interiores y de fachada
- columnas

Cajón de cimentación

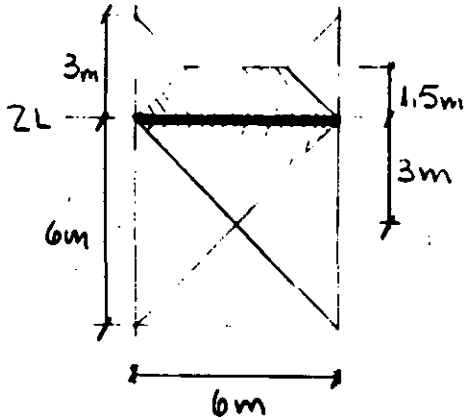
- losa y contratrabes
- muro perimetral de contención

Muros divisorios

- no formarán parte del sistema resistente a sismo

c) VIGAS

Puesto que se ha supuesto que la resistencia lateral será proporcionada por los muros, verifiquemos que una viga de 35x50 cm de sección pueda reforzarse para carga vertical



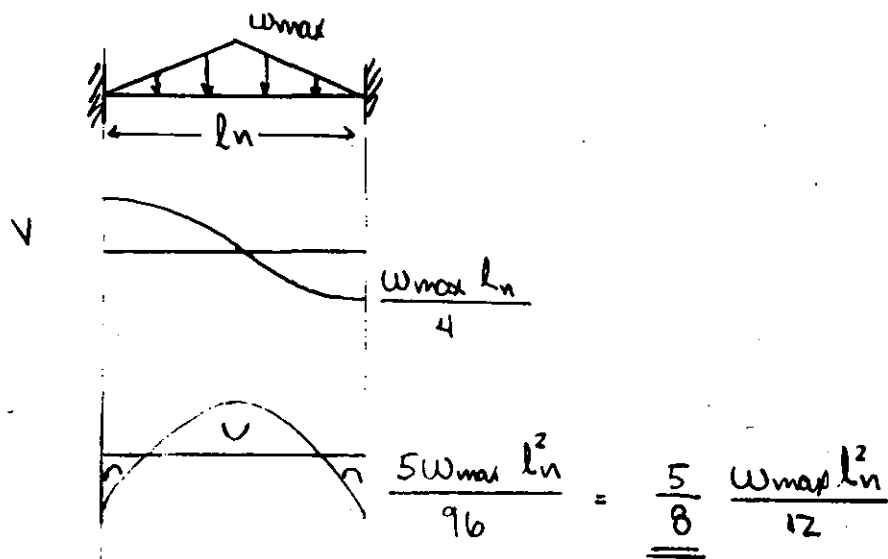
$$A_T = \frac{6^2}{4} + \frac{6+3}{2} \cdot 1.5 = 15.75 \text{ m}^2$$

$$A_{\text{Ac}} = 500 \text{ kg/m}^2$$

(sin considerar columnas, muros concreto, vigas)
y $c_{\text{cl}} = 170 \text{ kg/m}^2$

Carga trapezoidal : tratada como uniforme

Carga triangular : transformar a carga equivalente uniforme que produzca los mismos momentos de empotramiento



b) LOSA

De acuerdo a NTC 4.3.3 (Losas apoyadas en su perimetro)

$$h_{min} = \frac{\text{perimetro tablero}}{300} \times 0.034 \sqrt[4]{f_s w}$$

Si $f_s > 2000 \text{ kg/cm}^2$
y $w > 380 \text{ kg/m}^2$

Sea el tablero entre los ejes: 1L-2L-A-B
+ 2 lados continuos de 6m
+ 2 lados discontinuos de 6m

$$\begin{aligned} \text{Perimetro} &= 2 \times 6\text{m} + 2 \times 6\text{m} \times 1.25 \\ &= 27\text{m} \end{aligned}$$

↳ por ser discontinuos

Si $f_s = 0.6 f_y = 0.6 \times 4200$
y $w = 720 \text{ kg/m}^2$ (CM + CV medio)

$$h_{min} = \frac{2700}{300} \times 0.034 \sqrt[4]{0.6 \times 4200 \times 720}$$

$$h_{min} = 11 \text{ cm}$$

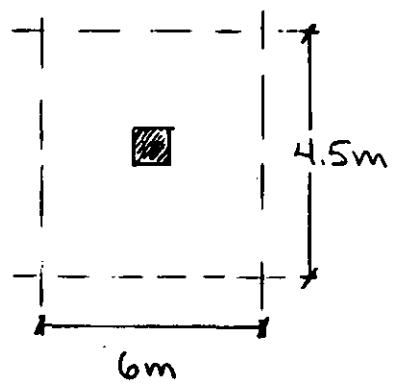
Puesto que en los ejes D, E, F, G no existe acción de marco usamos

$$\underline{h = 18 \text{ cm}}$$

3: DIMENSIONAMIENTO (DISEÑO PRELIMINAR)

a) COLUMNAS

PARA UNA COLUMNA INTERIOR ; CARGAS VIVA MÁXIMA.
MUERTA



CV* $w_m = 170 \text{ kg/m}^2$ piso
 100 kg/m^2 azotea
 * según RDE Art 99

CM $w = 650 \text{ kg/m}^2$ piso
 500 kg/m^2 azotea

Carga Axial Última en el sótano:

$$P_u = 1.4 \times 6 \times 4.5 \left[\underset{\substack{\text{CM} \\ \downarrow 6 \text{ pisos}}}{(0.65 \times 6 + 0.5)} + \underset{\text{CV}}{(0.7 \times 6 + 0.10)} \right]$$

$$P_u = 209 \text{ ton}$$

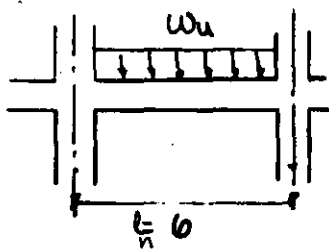
Nota La carga viva no se reduce pues $A_T = 6 \times 4.5 = 27 < 36 \text{ m}^2$

Si aceptamos $\sigma_{perm} = 100 \text{ kg/cm}^2$ (1000 ton/m²)

$$A = \frac{P_u}{\sigma_{perm}} = \frac{209}{1000} = 0.21 \text{ m}^2$$

$$\Rightarrow h = \sqrt{A} = 0.46 \text{ m}$$

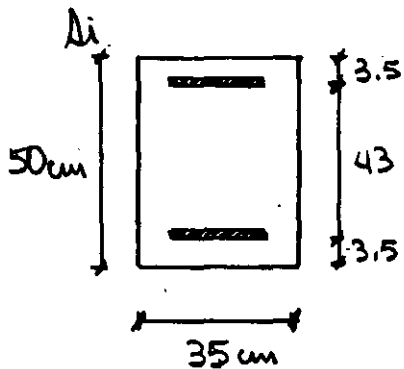
Usar columnas 45 x 45 cm | Sección constante en la altura.



$$\begin{aligned}
 \text{CM} \\
 W_u &= 1.4 \left(500 \times 3 \times \frac{5}{8} + 500 \times 1.5 + \right. \\
 &\quad \left. + 0.35 (0.5 - 0.18) \cdot 2200 + 170 \cdot 3 \cdot \frac{5}{8} + \right. \\
 &\quad \left. + 170 \cdot 1.5 \right) = 3510.7 \text{ kg/m}
 \end{aligned}$$

\downarrow carga W_{concreto}

$$\text{di } M_u = \frac{W_u l_n^2}{10} = \frac{3510.7 (6 - 0.45)^2}{10} = 10815 \text{ kg}\cdot\text{m}$$



$$d = 46.5 \text{ cm}$$

$$M_u = M_R = F_R \cdot 0.9d, A_s f_y$$

$$A_{s \text{ req}} = \frac{M_R}{0.9 \cdot 0.9 \cdot 46.5 \cdot 4200}$$

$$A_{s \text{ req}} = 6.8 \text{ cm}^2$$

$$p_{\text{req}} = \frac{A_{s \text{ req}}}{bd} = 0.0042$$

Para uma seção balanceada (Equação 2.2, NTC)

$$p_{\text{bal}} = \frac{f'_c}{f_y} \frac{4800}{f_y + 6000}$$

donde $f'_c = 0.8 f_c = 0.8 \cdot 300 = 240 \text{ kg/cm}^2$
 y $f''_c = 0.85 f'_c = 204 \text{ kg/cm}^2$

$$\Rightarrow P_{bal} = \frac{204}{4200} \frac{4800}{4200 + 6000} = 0.0229$$

Pero, según NTC 2.1.2.6,

$$P_{max} = 0.75 P_{bal} = 0.0171 > P_{req} \checkmark$$

Posiblemente una viga más pequeña sería adecuada. Sin embargo, los efectos sísmicos no se han considerado aún. El peralte, además, parece adecuado para un claro de 6m. $\left(\frac{l}{h} = \frac{600}{50} = 12 \right)$

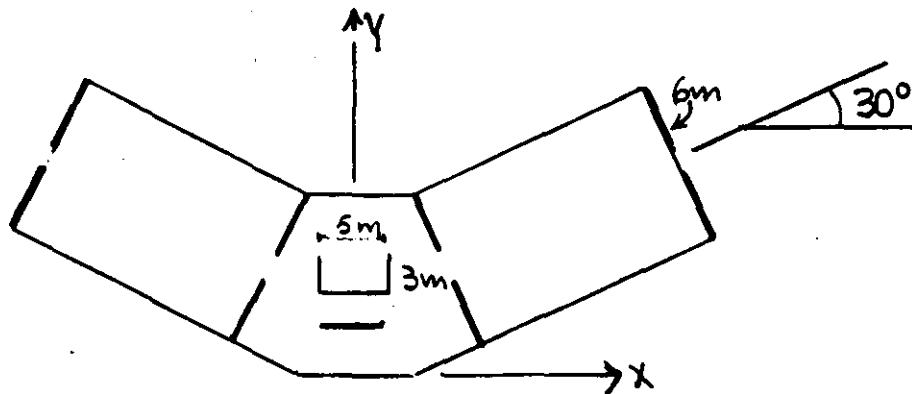
⇒ Usar $35 \times 50 \text{ cm}$ para todas las vigas de las alas.

Nota: Se propuso 35cm. para que la relación entre los anchos de viga y columna (i.e., $35/45 = 0.78$) sea 75%, aprox.

d) MUROS

Se dimensionan los muros para resistir todo el cortante sísmico.

Croquis



Las fuerzas cortantes sísmicas totales son:

$$V_x = 237 \text{ ton}$$

$$V_y = 199 \text{ ton}$$

Criterio de Diseño: el esfuerzo cortante promedio en el concreto será menor que $0.5 \sqrt{f_c}$

tomado de la Ec. 2.18 ($V_{cr} = 0.5 F_{cr} b d \sqrt{f_c}$)
para $p > 0.01$

Criterio de Análisis: los muros "incluidos" participan en las resistencias sobre x y y en función de su área multiplicada por $\sin^2 30^\circ$ y $\cos^2 30^\circ$, resp.

Dirección X (la otra dirección nos da otra, por inspección)

$$A_{req} = \frac{1.1 \times 237000 \text{ kg}}{0.80} \frac{1}{0.5 \sqrt{240}} = 42070 \text{ cm}^2 = 4.2 \text{ m}^2$$

Si $t = 20 \text{ cm}$

$$A_{muro} = 8 \times (6 \times 0.20 \times \sin^2 30^\circ) + 2 (5 \times 0.20)$$

$$= 4.4 \text{ m}^2 \checkmark$$

RESUMEN

Secciones constantes en la altura

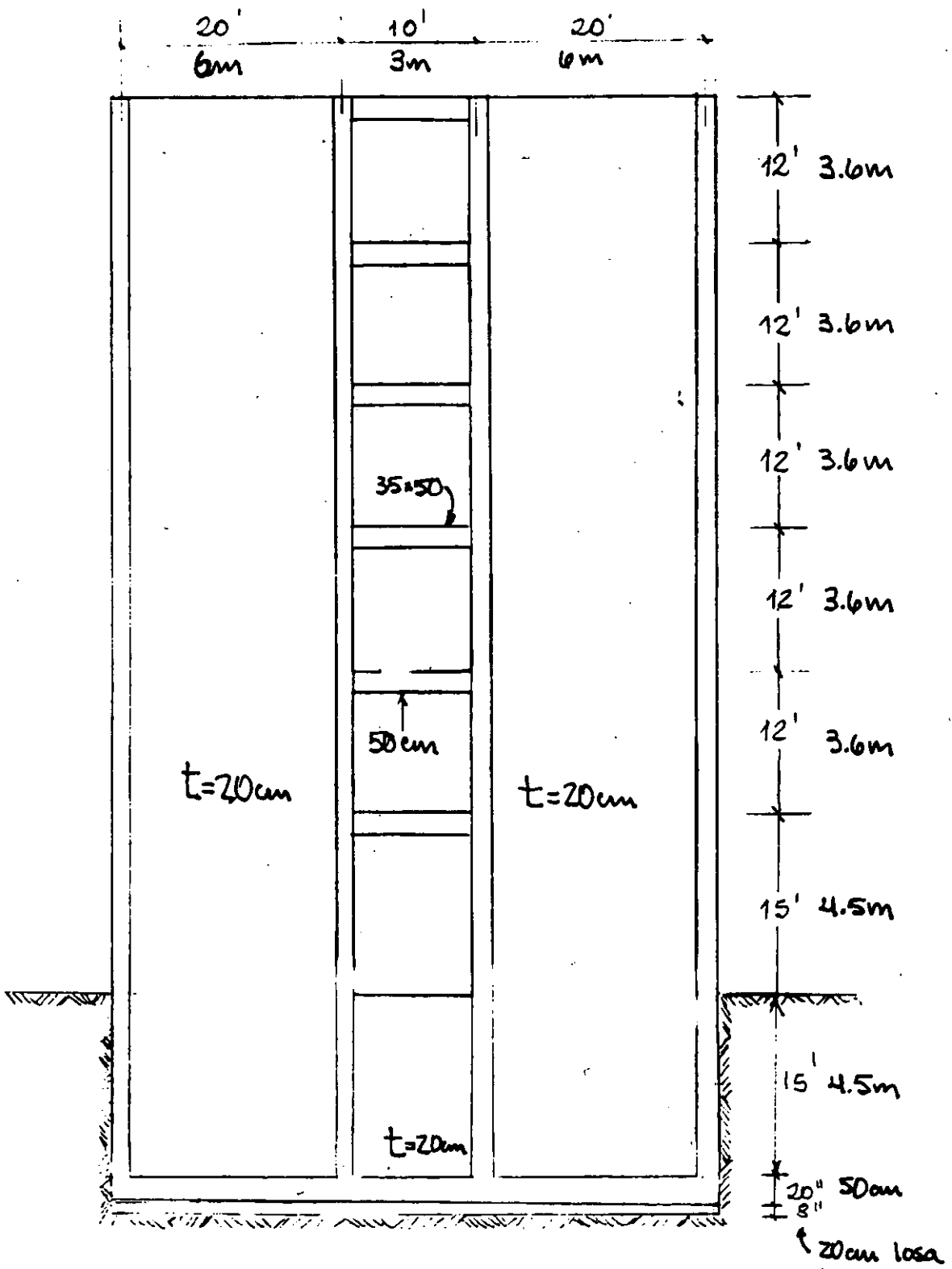
COLUMNAS : 45 cm x 45 cm

LOSA : 18 cm (t: espesor)

VIGAS : 35 cm x 50 cm (también contra trabes)

MUROS : 20 cm (t. espesor)

LOSA CIMENTACIÓN : 20 cm (espesor).



ELEVACION DE MUROS ACOPLADOS

4. ANALISIS ESTRUCTURAL

Hipótesis

- análisis elástico
- losa: diafragma rígido, aunque la forma del edificio sugiere "aleteo" del edificio
- se supone que el cajón de cimentación es rígido
- los elementos no estructurales (muros divisorios) no se consideran en el análisis

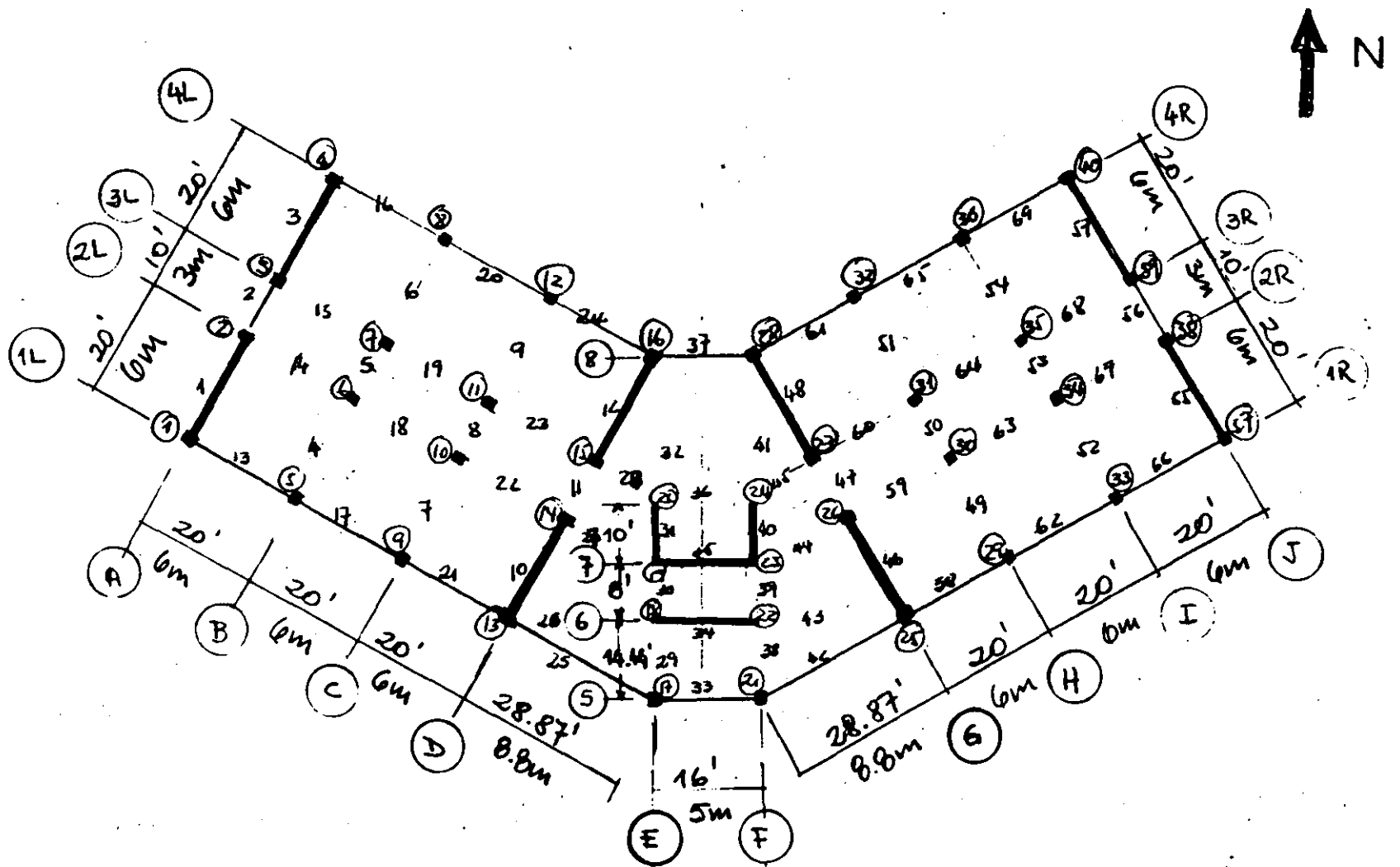
El edificio se modeló y analizó como estructura tridimensional usando el programa SUPER-ETABS

40 líneas de columna

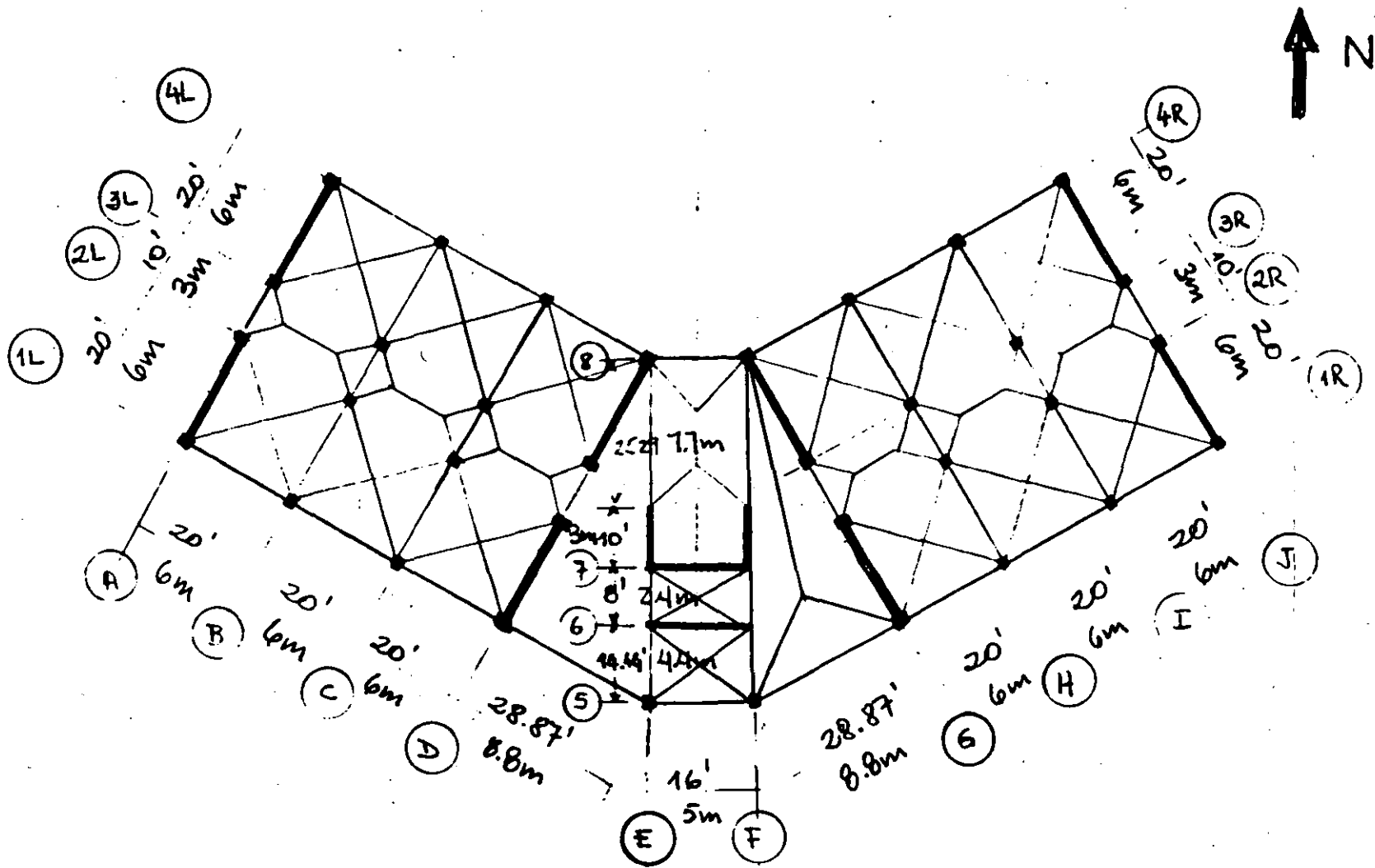
69 crujeas

102 elementos muro (paneles)

12 "contravientos flexibles" para estimar la distorsión ($AE/L=6.4 \text{ kg/cm}$)



NUMERACION DE CRUJIAS.



AREAS TRIBUTARIAS
 CARGAS VERTICALES

a) ANÁLISIS ESTÁTICO

- altura total de la estructura : $2 \cdot 4.5 \text{ m} + 5 \cdot 3.6 \text{ m}$
 $= 27 \text{ m} < 60 \text{ m}$

$$- \frac{V}{W} = \frac{C}{Q'}$$

donde : $C = 1.5 (0.4) = 0.6$

↳ C para Zona III
↳ factor de importancia de la estructura : Grupo A.

$R = 3$ puesto que no se satisface que:

"en cada entrepiso los muros sin capacidad de resistir, sin contar muros ni contravientos, avansen menos 50% de la fuerza sísmica actuante" (NTCSismo)

Así mismo, en 4.5.2 de las NTC-Concreto, se señala que:

"en el diseño por sismo de los muros a que se refiere esta sección y que resistan la totalidad de las fuerzas laterales, se usará $Q' = 3$ "

Pero $Q' = \text{Factor de regularidad}$ Q

El edificio no satisface las condiciones de regularidad:
1: Simetría
10: Torsión

$$\Rightarrow Q' = 0.8 Q = 2.4$$

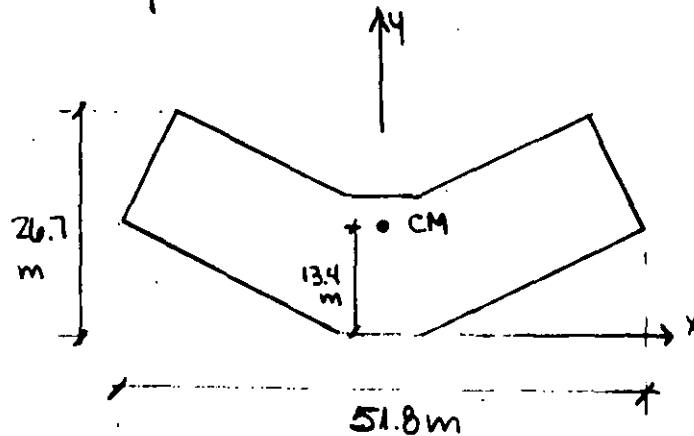
Por tanto, $\frac{V}{W} = \frac{0.6}{2.4}$

$$\frac{V}{W} = 0.25$$

* Los desplazamientos de entrepiso se multiplicarán por $Q=3$. Se verificará que desplazamiento/altura entrepiso < 0.012 porque los muros divisorios \uparrow están separados de la estructura.

Las fuerzas laterales se distribuyen en la altura del edificio. Estas fuerzas actuarán en el centro de masa del nivel (y las fuerzas cortantes en el centro de cortantes).

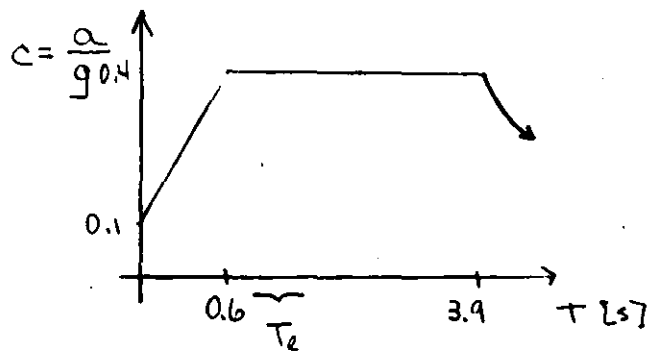
Para este edificio:



* importante considerar torsión en el análisis (J. Dany)

b) ANÁLISIS DINÁMICO

- debido a la asimetría
- espectro de diseño. Zona III (Zona de Lago)



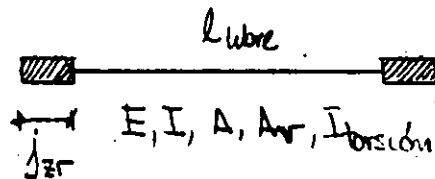
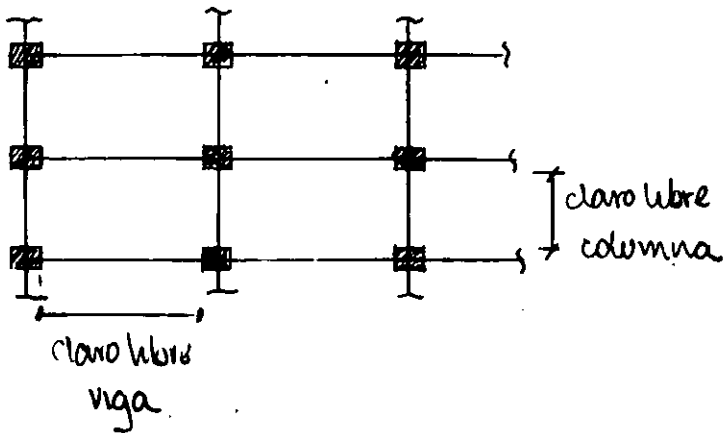
$$T_2 = 0.13 \sim 0.14 N \approx 0.8 s$$

- verificar $T_i \geq 0.4 s$
- usar espectro reducido: $Q' = 2.4$
- combinar respuestas: $S = \sqrt{\sum S_i^2}$

+ si los periodos de modos naturales difieren en menos de 10% entre sí: CQC (Complete Quadratic Combination - ETAS)

NOTA: las respuestas modales combinadas son las acciones, desplazamientos, y elementos mecánicos a estudiar. No usar una respuesta combinada S para obtener otro parámetro.

c) IDEALIZACIÓN DE LA ESTRUCTURA



Si las propiedades de las secciones (A, I) son en base a secciones no agrutadas, usar $J_{zr} = \frac{1}{3}$ ancho nudo

Si se usan propiedades agrutadas, $J_{zr} = \frac{1}{2}$ ancho nudo

Agrutamiento: vigas: $0.4 I_g$
 columnas $0.8 I_g$
 muros $0.25 I_g$

Para vigas

"L" : $I \approx 1.5 I_{rectangular}$

"T" : $I \approx 2 I_{rectangular}$

Para el análisis de la estructura, se consideraron las columnas y muros del PB y 1^{er} piso como agregados.

d) ANÁLISIS: se usó el Uniform Building Code 1985

o Fijos: Ajotea : 579 ton
Piso : 728 ton

Total : 4219 ton (no considera el peso del sótano)

Tara V_x , $C = 0.056 W$ | para roca
 V_y , $C = 0.047 W$

Piso	Fuerzas [ton]	
	X- EW	Y- NS
5	55.6	46.6
4	58.7	49.2
3	47.5	39.9
2	36.3	30.5
1	25.1	21.1
PB	14.4	12.1

o Verificación del modelo matemático.

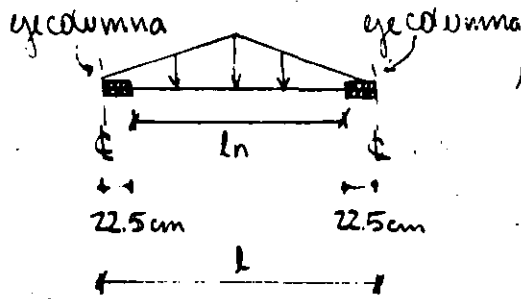
1) simétrica: cargas simétricas (verticales, mismo MY)
producción respuesta simétrica
- "cabceo" con carga vertical

2) Cargas verticales

$$(\sum P_u)_{andlisis} = (W_u)_{edificio} \quad (1)$$

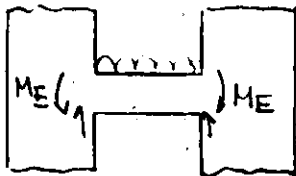
pero, ✓ < ✓ de la salida.

La aplicación es que los cortantes de empotramiento se calcularon usando el claro libre

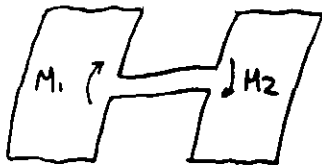


si se usa el en lugar de l_n , se viola la ec (1).

3) otro efecto: ante carga vertical, los M. de las vigas de acoplamiento son diferentes de ME



Empotramiento



ante carga vertical

Resultados del Análisis ante sismo.

◦ Análisis Dinámico : periodos

$$T_x = 0.76s$$

$$T_y = 0.61s$$

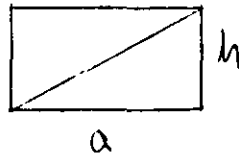
$$T_0 = 0.28s$$

masa modal efectiva 70%
RSC

◦ Contravientos para medir distorsiones

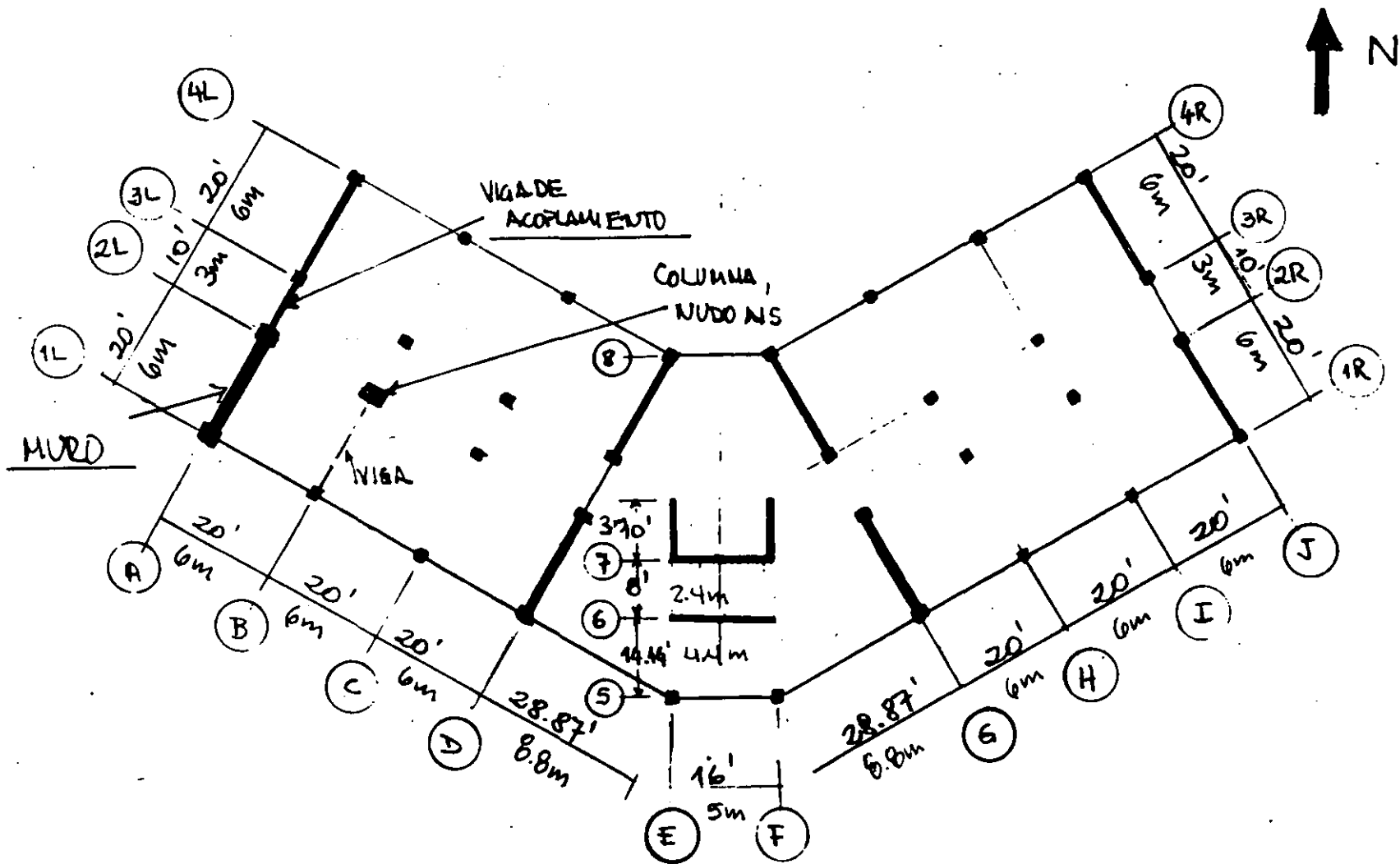
+ cruces 2 y 13 : para medir torsión

$$+ \text{distorsión} = 0.1N \left(\frac{a}{h} + \frac{h}{a} \right)$$



↑ fuerza normal : incluye
superposición modal

- + permite eliminar el cabeceo (amenstración flexible)
- + realmente mide los desplazamientos en los extremos de las alas versus el desplazamiento del piso registrado en el CM.
- + la máxima distorsión = 0.002.



ELEMENTOS DISEÑADOS

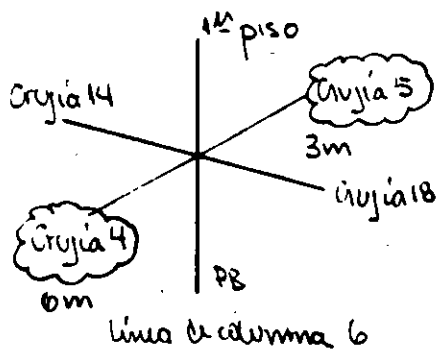
5- DISEÑO

Se diseñarán uno de los siguientes elementos:

- Viga
- Columna
- Junta Viga-columna
- Viga de acoplamiento
- Muro

NOTA : se garantizarán las dimensiones en la construcción.

a) VIGAS



Vigas 35 x 50 cm $d = 46.5$ cm

Columna 45 x 45 cm

a.1) Determinar A_s para vigas

$$\rho_{min} = \frac{0.7\sqrt{f_c'}}{f_y} = \frac{0.7\sqrt{300}}{4200} = 0.00289^*$$

$$\rho_{max} = 0.75\rho_{bal} = 0.0171 \text{ (ver Dimensionamiento)}$$

* en cada lado

$$A_{smin} = 2\#4 \text{ continuas en el nodo}$$

Cruja 4: $\sqrt{M_u^-} = 1060.6 \text{ ton cm} \Rightarrow \rho = 0.0064 \Rightarrow A_s = 10.5 \text{ cm}^2$
 $4 \# 6, A_s = 11.36 \text{ cm}^2$
 $M_u^+ = 554.7 \text{ ton cm} \Rightarrow \rho = 0.0022 < \rho_{\min} \Rightarrow A_s = 4.7 \text{ cm}^2$

Cruja 5: $M_u^- = 1210.8 \text{ ton cm} \Rightarrow \rho = 0.0047 \Rightarrow A_s = 7.65 \text{ cm}^2$
 $\sqrt{M_u^+} = 871.8 \text{ ton cm} \Rightarrow \rho = 0.0034 \Rightarrow A_s = 5.51 \text{ cm}^2$
 $3 \# 5, A_s = 6.0 \text{ cm}^2$

Si $\rho_{\min} = 0.0025$, usando ec. 2.9 NTC-comando

$$M_c = F_c \left[(A_s - A_s') \left(d - \frac{a}{2} \right) + A_s' \left(d - d' \right) \right]$$

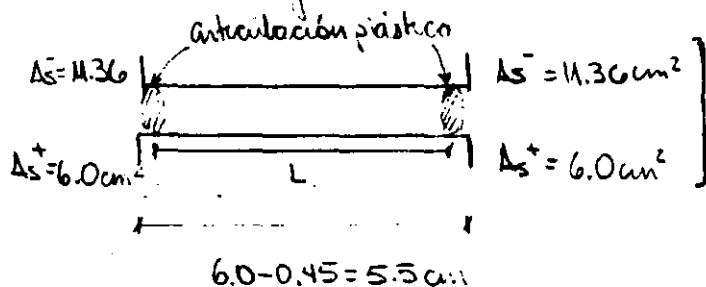
$$= 0.9 \left[(11.36 - 6.0) 4200 \left(46.5 - \frac{3.15}{2} \right) + 6.0 \times 4200 (46.5 - 3.5) \right]$$

donde $a = \frac{(A_s - A_s') f_y}{f_c b} = \frac{(11.36 - 6) 4200}{204 \cdot 35} = 3.15 \text{ cm}$

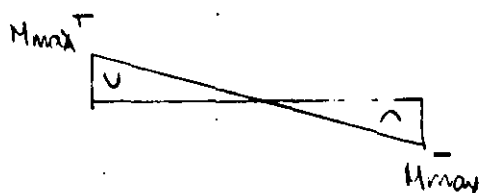
$M_c = 1885.4 \text{ ton cm} > M_u^-$ para la cruja 4.

a.2) Tiempo de corte

Se piensa mas que el acero obtenido se mantiene en las secciones criticas de la cruja 4:



se satisface que $M_c^+ \geq 0.5 M_c^-$



Según 5.2.4 de NTC podemos diseñar para carga constante:

+ por capacidad : factores de reducción
 espunjo acero = 1.25 fy
 carga viva afectada por Fe.

$$V_{max} = \frac{M_{max}^+ + M_{max}^-}{L} + \frac{wL}{2} \approx \frac{\alpha(M_{n}^+ + M_{n}^-)}{L} + \frac{wL}{2}$$

$$M_{n}^- = \frac{M_e^-}{F_e} = \frac{1885.4}{0.9} = 2095 \text{ ton}\cdot\text{cm}$$

$$M_{n}^+ = 1127 \text{ ton}\cdot\text{cm}$$

$$w = 2387 \text{ kg/m} \quad (\text{obtenido en forma similar al producto})$$

$$V_{max} = \frac{(2095 + 1127) \cdot 1.25}{600} + \frac{2.4 \cdot 6}{2}$$

$$V_{max} = 6.7 + 7.2 = 14.0 \text{ ton}$$

$$V_n = \underset{F_e=1}{V_{max}} = 14.0 \text{ ton}$$

+ de Vanólesis, con $F_e = 0.6$ (en lugar de 0.8)


$$V_{anólesis} = 11.7 \text{ ton}$$

$$V_n = \frac{V_{anólesis}}{0.6} = 19.5 \text{ ton}$$

⇒ diseñar para $V_n = 19.5 \text{ ton}$

Según 5.2.3,

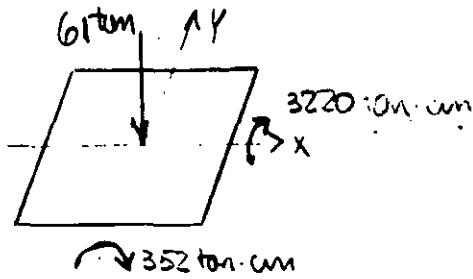
$$S \leq \begin{cases} 0.25d = 11 \text{ cm} \\ 8d_{b_{\min}} = 12.5 \text{ cm} \quad (\neq 5) \\ 24d_{b_{\text{estribo}}} = 23 \text{ cm} \\ 30 \text{ cm} \end{cases}$$

usar $s = 10 \text{ cm}$ | 

- dobles 135°
- extensión $10 d_b (9.5 \text{ cm})$!

Fibra de la zona de la articulación plástica: $S_{\max} \leq 0.5d = 23 \text{ cm}$
 uson $s = 20 \text{ cm}$ (O.K.)

b) COLUMNA



b.1) Diseño por flexión

$$M_{ux} = 352 \text{ ton}\cdot\text{cm}$$

$$M_{uy} = 3220 \text{ ton}\cdot\text{cm}$$

$$e_x = 6 \text{ cm}$$

$$e_y = 53 \text{ cm}$$

$$\left. \begin{array}{l} e_x = 6 \text{ cm} \\ e_y = 53 \text{ cm} \end{array} \right\} > 0.05h = 2.25 \text{ cm} \checkmark$$

$\leftarrow e_{\text{min}}$

Agim 5.3 (NTC-Concreto): miembro a flexo-compresión si

$$P_u > A_g f'_c / 10$$

$$\frac{A_g f'_c}{10} = \frac{45^2 \cdot 300}{10} = 60.8 \text{ ton (está en el límite)}$$

de ser considerada a flexión

Para fines del ejemplo \Rightarrow flexo-compresión

Usaremos las gráficas para diseñar columnas de concreto reforzado (Serie 428 Instituto de Ingeniería)

$$R_x = \frac{352000}{0.8 \cdot 45^3 \cdot 204} = 0.024$$

$\hookrightarrow R_x$

$$\left(R = \frac{M}{F_c b h^3 i^2} \right)$$

$$R_y = \frac{3220000}{0.8 \cdot 45^3 \cdot 204} = 0.217$$

$$R_x / R_y = 0.11$$

$$k = \frac{P_u}{F_c b h i^2} = \frac{61000}{0.8 \cdot 45^2 \cdot 204} = 0.185$$

Plante efectivo: $d = h - r = 45 - r = 40 \text{ cm}$
 $r = 3 + 2 = 5 \text{ cm}$

$$\Rightarrow d/b = 40/45 = 0.89 \text{ usar } 0.9$$

Para $k_x/i_y = 0.5$, Figura 12 (ver página 55) $q = 0.7$

$k_x/i_y = 0$, Figura 10 (ver página 54) $q = 0.5$

multiplicando para $k_x/i_y = 0.11$, $q = 0.54$

Eso $q = \frac{A_s}{bh} \frac{f_y}{f'_c}$

$$A_s = qbh \frac{f'_c}{f_y} = 0.54 \cdot 45 \cdot 45 \frac{204}{4200}$$

$$A_s = 53.1 \text{ cm}^2$$

Usar $12 \# 8$ $A_s = 61.2 \text{ cm}^2$

$$\left| \begin{array}{l} \rho = 61.2/45^2 = 0.03 < \rho_{\max} = 0.04 \\ \rho_{\min} = 0.01 \end{array} \right.$$

Para miembros rectos se satisface que.

- $h_{\min} \geq 30 \text{ cm}$
- $A_g > F_u / 0.5 f'_c$
- $b/h \leq 0.1$
- $h'/h = 310/45 = 6.9 < 15$

Para asegurar un comportamiento "viga de bel - columna junta"

$$\frac{\sum M_{col}}{\sum M_{vigas}} \geq 1.5$$

donde los momentos se refieren a momentos resultantes referidos al centro del miembro

Para M_c columna: $A_c = 61.2 \text{ cm}^2$

$$q = \frac{61.2}{45^2} \cdot \frac{4200}{204} = 0.62$$

$$y k = 0.185$$

de la Figura 10, $R = 0.30$
(II-20)

$$\Rightarrow M_2 = R F_c d^2 f'_c$$

$$= 0.3 \cdot 0.8 \cdot 45^3 \cdot 204$$

$$= 44161 \text{ km} \cdot \text{cm}$$

$$\Rightarrow \frac{\sum M_{col}}{\sum M_{viga}} = \frac{2 \cdot 44161}{1885 + 0.9 \cdot 1127} = 3 \quad \checkmark$$

Para las vigas
14418 la razón
da 1.45 ✓

* de búa incluído $\alpha = 1.25$
p/viga

b.2) Traslape

sólo se permite a la mitad central del elemento

$$\text{Traslape} \geq \begin{cases} 1.33 L_d & (\text{según 3.9.1}) \\ (0.01 f_y - 6) d_b \end{cases}$$

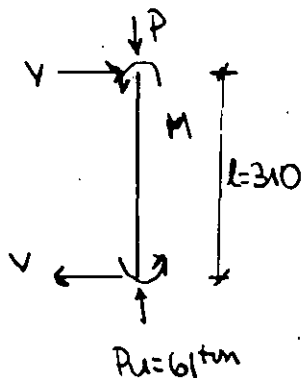
$$\text{Pero } L_d = L_{db} = 0.06 \frac{f_y}{\sqrt{f'_c}} \geq 0.006 d_b f_y$$

$$\Rightarrow \text{trape} = 1.33 \cdot 0.06 \frac{5.1 \cdot 4200}{\sqrt{300}} = 99 \text{ cm} \Rightarrow 1 \text{ m}$$

que debe ser mayor que $1.33 \cdot 0.006 \cdot 2.5 \cdot 4200 = 84 \text{ cm}$

b.3) Diseño por cortante

Las columnas se dimensionarán de manera que no fallen por falla cortante antes de que se formen articulaciones plásticas en las vigas (5.3.5)



Diseño por capacidad

$$M = 0.5 (1.5 \leq M_{\text{viga}})$$

$$M = 0.5 [1.5 (1.885 + 0.9 \cdot 1127)]$$

$$= 2174 \text{ tm} \cdot \text{cm} \text{ (que es } 0.5 M_{\text{ced}} \text{ aprox.)}$$

$$V_u = \frac{2M}{l} = \frac{2 \cdot 2174}{310} = 14 \text{ tm}$$

Según 2.1.5

$$V_{c2} = 0.5 F_c b d \sqrt{f_c^2} (1 + 0.007 \frac{P_u}{A_g})$$

para $p > 0.01$ ($p_{\text{ced}} = 0.03$)

$$= 0.5 \cdot 0.8 \cdot 45 \cdot 40 \sqrt{204} (1 + 0.007 \cdot \frac{61000}{45^2})$$

$$= 12.5 \text{ tm}$$

P_{uo}

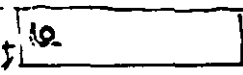
$$S = \frac{F_c A_v f_y d}{V_u - V_{c2}}$$

$$\frac{A_s}{s} = \frac{V_u - V_{cr}}{F_R f_y d} = \frac{1500}{0.8 \cdot 4200 \cdot 46.5} = 0.0096 \frac{\text{cm}^2}{\text{cm}}$$

b.4) Por confinamiento (según 5.2.4)

$$\frac{A_{sh}}{s} = 0.3 \left(\frac{A_g}{A_c} - 1 \right) \frac{f'_c}{f_y} h_c = 0.3 \left(\frac{45^2}{39^2} - 1 \right) \frac{300}{4200} 39 = 0.277 \frac{\text{cm}^2}{\text{cm}}$$

$$\frac{\Delta_{sh}}{s} = 0.12 \frac{f'_c}{f_y} h_c = 0.12 \frac{300}{4200} 39 = 0.334 \frac{\text{cm}^2}{\text{cm}}$$

⇒  $h_c = 45 - 6 = 39 \text{ cm}$
 $2x \downarrow$

Por la última, $\frac{A_{sh}}{s} = 0.334$

$$s \leq \begin{cases} \bullet \frac{h}{4} = 11 \text{ cm} \\ \bullet 10 \text{ cm} \end{cases} \quad \left| \text{según 5.3.4} \right.$$

según 4.5.3 $\bullet \frac{850}{\sqrt{f_y}} \frac{d_c}{\text{col}} = \frac{850}{\sqrt{4200}} \cdot 2.5 = 33 \text{ cm}$
 \downarrow
 $\# 8$

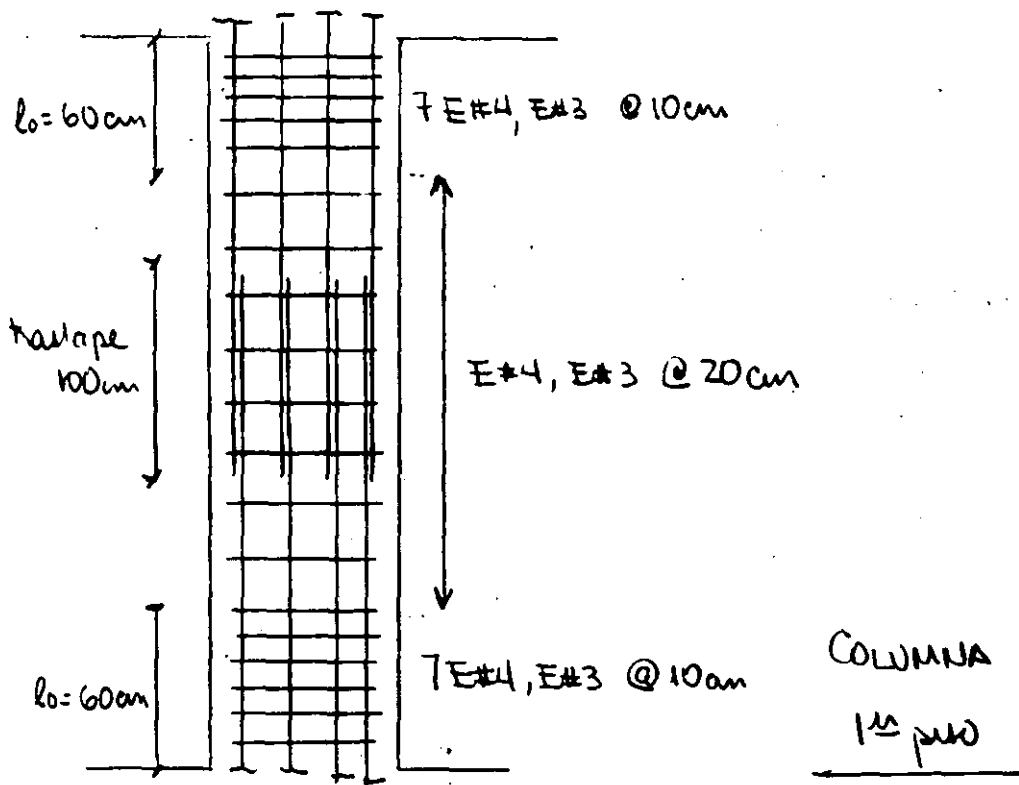
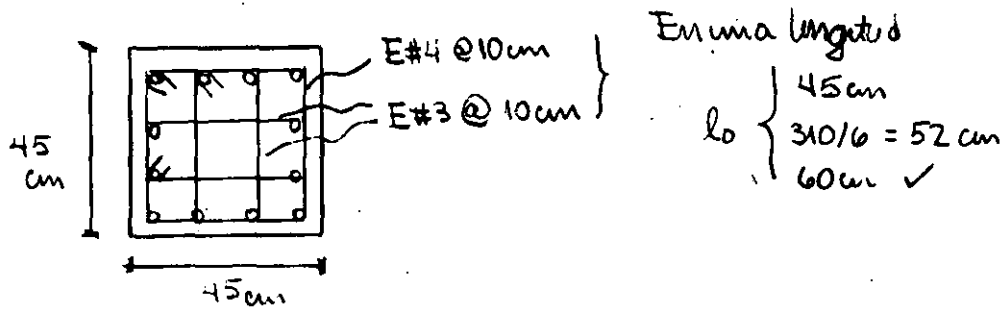
$\bullet 48 d_{\text{extremo}} = 48 \cdot 1.25 = 60 \text{ cm}$

$\bullet \frac{h}{2} = 23 \text{ cm}$

Por $s = 10 \text{ cm}$

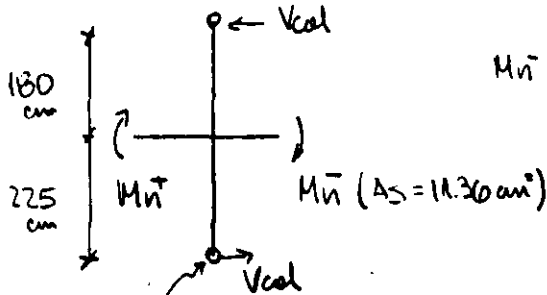
$$\Rightarrow A_{sh} = 0.334 \cdot 10 = 3.34 \text{ cm}^2$$

Usar $E \# 4$, $E \# 3 @ 10 \text{ cm} \Rightarrow A_{sh} = 4 \text{ cm}^2$



c) JUNTA VIGA-COLUMNA

c.1) Resistencia al corte



$$M_n^-: a = \frac{1.25 f_y A_s}{f_c' b} = \frac{1.25 \times 4200 \times 11.36}{204 \times 35} =$$

$$a = 8.35 \text{ cm}$$

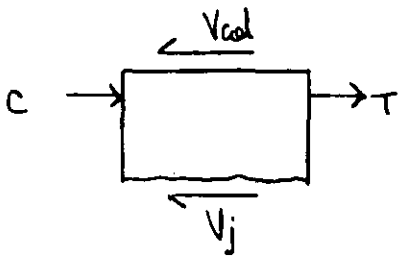
punto de inflexión a la mitad
de la altura de la columna

$$M_n^- = 1.25 \times 4200 \times 11.36 \left(46.5 - \frac{8.35}{2} \right) = 2524 \text{ ton}\cdot\text{cm}$$

$$M_n^+: a = \frac{1.25 \times 4200 \times 6}{204 \times 35} = 4.41 \text{ cm}$$

$$\Rightarrow M_n^+ = 1395 \text{ ton}\cdot\text{cm}$$

$$P_{\text{uno}} \quad V_{\text{col}} = \frac{\sum M_n}{180 + 225} = \frac{2524 + 1395}{405} = 9.7 \text{ ton}$$



$$C = 1.25 \times 4200 \times 6.0 = 31.5 \text{ ton}$$

$$T = 1.25 \times 4200 \times 11.36 = 59.6 \text{ ton}$$

$$V_j = 31.5 + 59.6 - 9.7 = 81.4 \text{ ton}$$

Puesto que el nudo está compuesto en 75% por el ancho de las
trabes,

$$V_{2j} = 5.5 F_R \sqrt{f_c'} b_e h, \quad b_e = \frac{b_{\text{trabes}} + b_{\text{col}}}{2} = \frac{45 + 35}{2} = 40 \text{ cm}$$

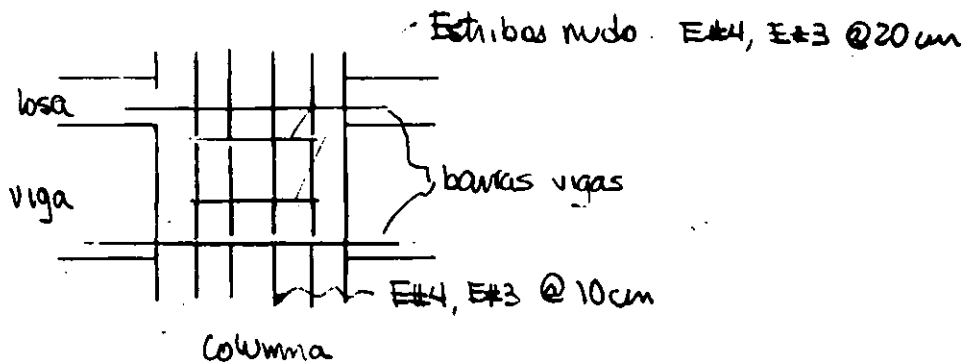
$$= 5.5 \times 0.8 \times \sqrt{240} \times 40 \times 45$$

$$= 123 \text{ ton} > V_j \quad \checkmark$$

c.2) Refuerzo transversal de confinamiento

Puesto que el nudo está confinado por cuatro traveses, con relación de áreas viga / columna > 0.75 ,

⇒ reducir el refuerzo transversal de la columna, con 2 juegos de estribos entre los niveles superior e inferior ← importante



c.3) Anclaje del refuerzo *

Según 5.4.4, puesto que los nudos tienen más del 50% de la fuerza lateral,

$$\frac{h}{d_b} \geq 15$$

Para barras de columna

$$\frac{h_{viga}}{d_b \text{ columna}} = \frac{50}{2.5} = 20 \checkmark$$

↙ #8

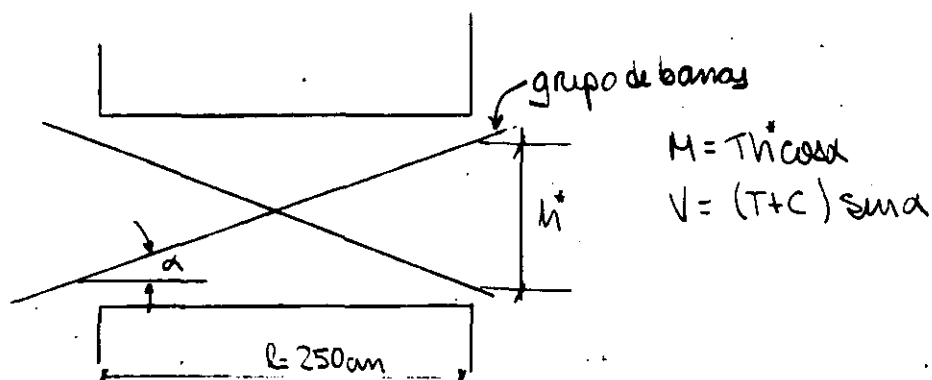
$$\frac{h_{columna}}{d_b \text{ viga}} = \frac{45}{1.9} = 23 \checkmark$$

↙ #6

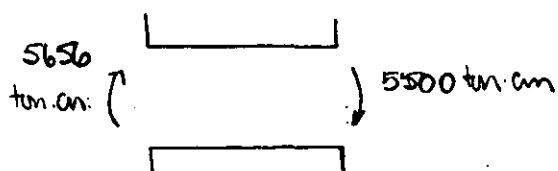
* a menudo controlar el pnalte, especialmente columnas

Según 5.4.1, se deben incluir dibujos acotados y a escala en los planos, del tipo en las uniones vigas-columna

d) VIGAS DIAFRAGMA DE ACORRIENTO



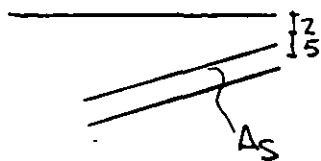
En nuestro caso, $l = 250 \text{ cm}$, $h^* = 50 \text{ cm}$ ($l/h^* = 5 > 2$)
 ↑ máximo para NTC
 RDF (4.14.2)



Por facilidad, $M = 5600 \text{ ton.cm}$

$$M_{\text{máx}} \approx \alpha M = 1.25 \cdot 5600 = 7075$$

$$\text{si } h^* = 36 \text{ cm y } \alpha = \arctan 0.2 = 11.3^\circ$$



$$T = \frac{M_{\text{máx}}}{h^* \cos \alpha} = \frac{7075}{36 \cdot \cos 11.3^\circ}$$

$$T = 200 \text{ ton}$$

$$\Rightarrow A_s = \frac{T}{f_y} = \frac{200}{4.2} = 48 \text{ cm}^2 \quad \text{usar } 6\#10$$

$$A_s = 49.14 \text{ cm}^2$$

(Pase sobre $V = (T + C) \sin \alpha$, $T = 144 \text{ ton}$)

Las diagonales se anclaran según 3.1.1c) multiplicado por 1.5

$$1.5L_d = 1.5 \cdot 0.06 \frac{A_s f_y}{\sqrt{f'_c}} \geq 1.5 \cdot 0.006 d_b f_y$$

$$1.5 \cdot 0.006 \cdot 3.175 \cdot 4200 = 120 \text{ cm}$$

$$1.5 \cdot 0.06 \frac{8.19 \cdot 4200}{\sqrt{300}} = 178 \text{ cm} \checkmark$$

Estribos:

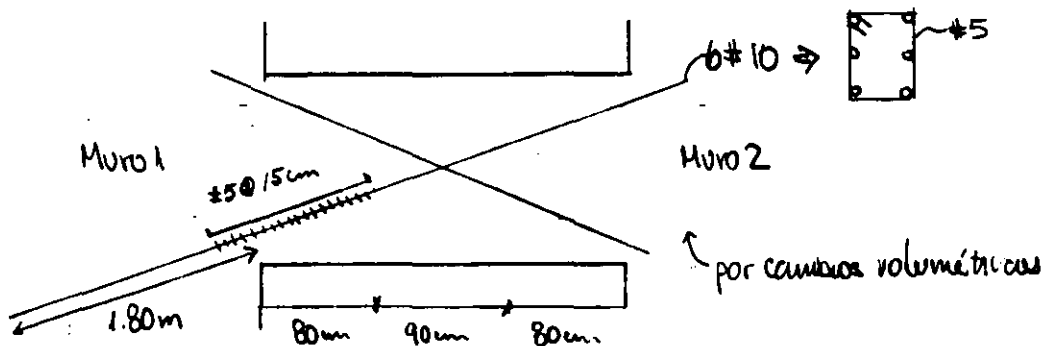
$$\frac{850}{\sqrt{f_y}} d_b = \frac{850}{\sqrt{4200}} \cdot 3.175 = 42 \text{ cm}$$

$s \leq$

$$48 d_{\text{estribo}} = 48 \cdot \frac{5}{8} \cdot 2.54 = 76.2 \text{ cm}$$

$$35/2 = 17.5 \text{ cm} \text{ regl, usar } s = 15 \text{ cm}$$

↑ menor dimensión



El resto de la viga lleva refuerzo por cambios volumétricos.

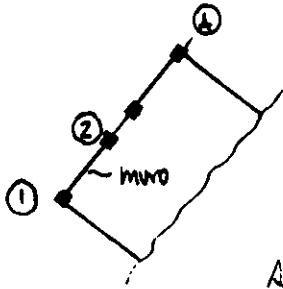
$$\text{Si } \rho = 0.002, A_s = 50 \times 35 \times 0.002 = 3.5 \text{ cm}^2$$

(3.10)

⇒ Usar #2.5 @ 50cm (verticales) no diagonales
2 ± 3 horizontales

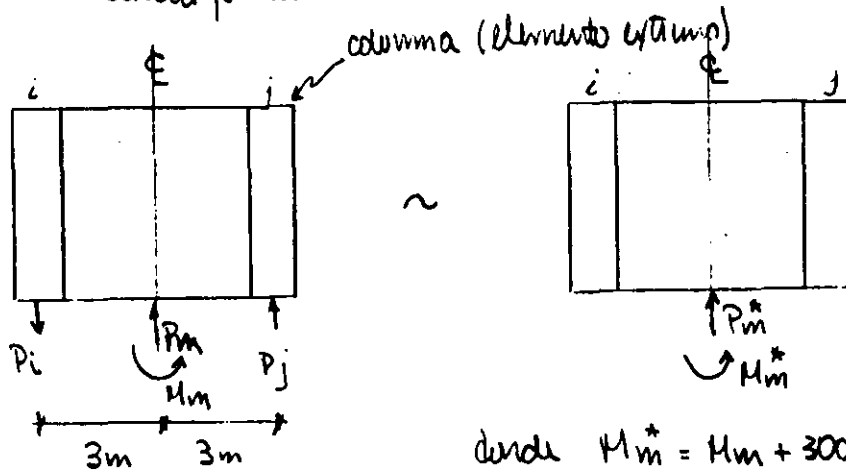
e) MURO DE CONCRETO

Se diseñará el muro de la planta baja entre columnas 1 y 2.



Del dimensionamiento: $t=20\text{ cm}$
 $h=45\text{ cm}$

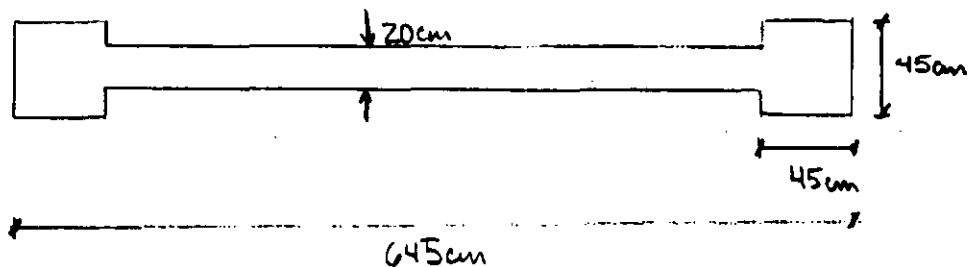
De acuerdo al modelo de la estructura, se obtuvieron elementos mecánicos en las columnas y en el muro. Se debe incorporar la carga axial de las columnas en la carga axial y flexión del muro. De esta forma:

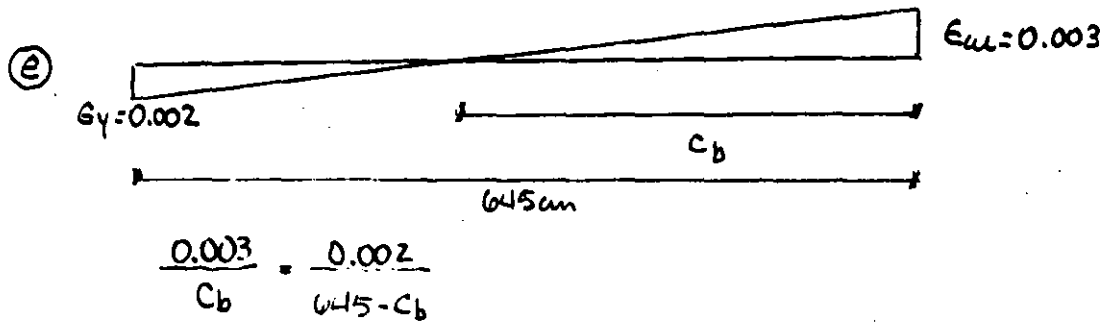


donde $M_m^* = M_m + 300(P_i + P_j)$
 $P_m^* = P_m - P_i + P_j$

La carga de compresión más alta fue de 362 ton y de tensión de 143 ton.

Para tener idea de la peor combinación de carga, considerando carga axial estimativa en forma aproximada, la carga axial balanceada.





$$\Rightarrow c_b = \frac{0.003(645)}{0.005} = 387 \text{ cm}$$

La profundidad del bloque equivalente de esfuerzos es de

$$a_b = 0.8 \cdot c_b = 309.6 \text{ cm}$$

La carga axial balanceada será:

$$P_b = \frac{0.85 f'_c}{f'_c} a_b + A'_s f_y - A_s f_s$$

Suponiendo que $A'_s = A_s$, $f_y = f_s$ y $b = 20 \text{ cm}$

$$P_b = 204 \times 309.6 \times 20 / 1000$$

$$= 1263 \text{ ton (compresión)}$$

** Es claro que la máxima carga de compresión está muy por debajo de P_b .

⇒ la condición crítica de carga es:

$$M_u = 302,550 \text{ ton} \cdot \text{cm}$$

$$P_u = 143^+ \text{ ton (tensión)}$$

$$V_u = 294 \text{ ton (se verificará por capacidad)}$$

c.1) Diseño por cortante

Lapaja constante $V_u = 294 \text{ ton}$ es constante en la altura del muro en el primer entrepiso.

Verifiquemos que $V_{max} > V_u$ (4.5.2 NTC-Concreto)

$$V_{max} = 2F_c L t \sqrt{f'_c} = 2 \cdot 0.8 \cdot 645 \cdot 20 \sqrt{240} / 1000$$

$$= 320 \text{ ton} > 294 \text{ ton} \checkmark$$

Puesto que $\frac{H}{L} = \frac{250}{645} = 3.5 > 2$, el cortante que

forma el concreto se analiza con la EC. 2.18 (para vigas), afectada por un factor que considere la carga axial a tensión

$$V_{cR} = 0.5 F_c b d \sqrt{f'_c} \underbrace{(1 - 0.03 \frac{P_u}{A_g})}_{\text{tensión}} \text{ si } \rho \geq 0.01$$

$$\text{donde } b = 20 \text{ cm}$$

$$d = 0.8L = 0.8 \cdot 645 = 516 \text{ cm}$$

$$\frac{P_u}{A_g} = \frac{143000}{2 \cdot 45^2 + 20(600 - 45)} = 9.4 \text{ kg/cm}^2$$

$$V_{cR} = 0.5 \cdot 0.8 \cdot 20 \cdot 516 \cdot \sqrt{240} (1 - 0.03 \cdot 9.4) / 1000$$

$$V_{cR} = 45.8 \text{ ton}$$

El acero horizontal se determina como (EC. 4.6)

$$\rho_h = \frac{V_u - V_{cR}}{F_c f_y d t} = \frac{294000 - 45800}{0.8 \cdot 4200 \cdot 516 \cdot 20} = 0.0072 > \rho_{min} \checkmark$$

donde $\rho_{min} = 0.0025$

Nota V_{CR} se determinó con 2.18 para $p \geq 0.01$, pero $p_n < 0.01$

usando 2.17 con $p_n = 0.007$

$$V_{CR} = 38.2 \text{ tm}$$

$$y \quad p_n = 0.0074 \quad \text{Poco sensible.}$$

$$\text{Si } t = 20 \text{ cm} \quad y \quad p_n = \frac{A_{vh}}{S \cdot t}$$

$$\frac{A_{vh}}{S} = 0.148 \frac{\text{cm}^2}{\text{cm}}$$

Puesto que $t > 15 \text{ cm}$, se colocará el refuerzo en 2 capas si se usan $2\#5$ ($A_{vh} = 4 \text{ cm}^2$),

$$S = 4 / 0.148 = 27 \text{ cm}$$

$$S = 25 \text{ cm} < s_{may} = 35 \text{ cm} \checkmark$$

$$\Rightarrow \text{usar } \underline{2\#5 @ 25 \text{ cm}}$$

El acero vertical se calcula con.

$$P_v = 0.0025 + 0.5 \left(2.5 - \frac{4}{L} \right) (p_n - 0.0025)$$

↑
notar

$$\rho_v = 0.0025 + 0.5(2.5 - 3.5)(0.0074 - 0.0025)$$

$$= 0.0001 < \rho_{min}$$

usar $\rho_v = \rho_{min} = 0.0025$

Análogamente al desarrollo de f_h

$$\frac{A_{wv}}{s} = 0.05$$

si $s_{max} = 35 \text{ cm}$, $A_{wv} = 0.05 \cdot 35 = 1.75 \text{ cm}^2$

$$\Rightarrow \text{usar } 2\#4 @ 35 \text{ cm.}$$

$$(A_w = 2.58 \text{ cm}^2)$$

e.2) Revisión del elemento extremo como columna corta

sin considerar el acero del alma, se dimensiona el elemento extremo para la máxima carga axial. De las varias condiciones de carga, considerando carga axial y momento, $P = 537 \text{ ton}$
 $\hookrightarrow M = P \cdot L$

$$A_g = 45^2 = 2025 \text{ cm}^2$$

se usan 12 #10, $A_{st} = 12 \cdot 8.19 = 98.3 \text{ cm}^2$

$$P_{e0} = 0.8 [f'_c (A_g - A_{st}) + f_y A_{st}] \quad (\rho_{st} = 0.048 < 0.00)$$

$$= 0.8 [304(2025 - 98.3) + 4200 \cdot 98.3] / 1000$$

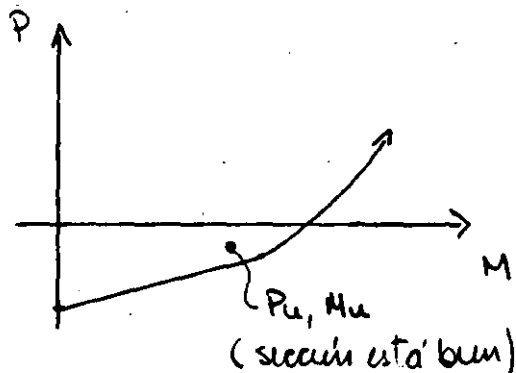
$$= 6415 \text{ ton} > P_u$$

23) Revisión de la capacidad

Se calcularon algunos puntos del diagrama de interacción

señal:

	P [ton]	M [ton·cm]
tension	145	342 782 ← M_n
	0	385 257
	136	424 600
	318	475 670
	454	512 901
	590	548 816
	726	583 444



Según la condición de carga crítica.

$$V_u = 294 \text{ ton}$$

$$\begin{aligned}
 (V_u)_{\text{aumentado}} &= V_u \frac{\alpha M_n}{M_u} ; \alpha = 1.1 \text{ a } 1.2 \\
 &= 294 \frac{1.1 \cdot 342782}{302550} \quad \left(\frac{1}{F_2} = \frac{1}{0.9} \right) \\
 &= 1.25 V_u = 367 \text{ ton}
 \end{aligned}$$



Pero la capacidad

$$\begin{aligned}
 \phi V_n &= V_{c2} + V_s = 45.8 + f_n \cdot f_y \cdot A_s \\
 \text{C1.0} & \quad \text{donde } f_n = \frac{A_{v2}}{S_{v2}} = \frac{4}{25 \cdot 20} = 0.008 \\
 &= 45.8 + 0.008 \cdot 4200 \cdot 516 \cdot 20 / 100 \\
 &= 45.8 + 347 \\
 &= 393 \text{ ton} > (V_u)_{\text{aumentado}} \quad \checkmark
 \end{aligned}$$

e.4) Confinamiento de los elementos extremos

Similares a las columnas, solo que el refuerzo transversal se coloca a lo largo del elemento con la misma separación.

$$\frac{A_{sh}}{s} = 0.334 \quad ; \quad \text{si rige } s = 10 \text{ cm}$$

$$A_{sh} = 3.34 \text{ cm}^2$$

$$\Rightarrow \#4, \#3 @ 10 \text{ cm}$$

e.5) Mínimo de barras (traspas) l_t

+ a la mitad de la altura, y barras alternadas

$$\text{Para las barras del } \#10, \quad l_t = 1.33 L_{db}$$

$$\text{donde} \quad L_{db} = \frac{0.006 \cdot a_s \cdot f_y}{\sqrt{f_c}} = \frac{0.006 \cdot 8.9 \cdot 4200}{\sqrt{300}} = 119 \text{ cm}$$

$$\text{que tiene que ser mayor o igual que} \quad 0.006 d_b f_y = 0.006 \cdot \frac{10}{8} \cdot 2.5 \cdot 4200 = 78.8 \text{ cm}$$

$$\Rightarrow l_t = 1.33 \cdot 119 = 160 \text{ cm}$$

$$\text{Para las barras del } \#4, \quad l_t = 40 \text{ cm} \quad | \quad \text{rige } (0.006 d_b f_y)$$

Para el anclaje de las varas del # 5 (horizontales)

Según 3.1.1

$$L_{dn} = \frac{0.076 d_b f_y}{\sqrt{f'_c}} = \frac{0.076 \cdot \frac{5}{8} \cdot 3.54 \cdot 4200}{\sqrt{300}}$$

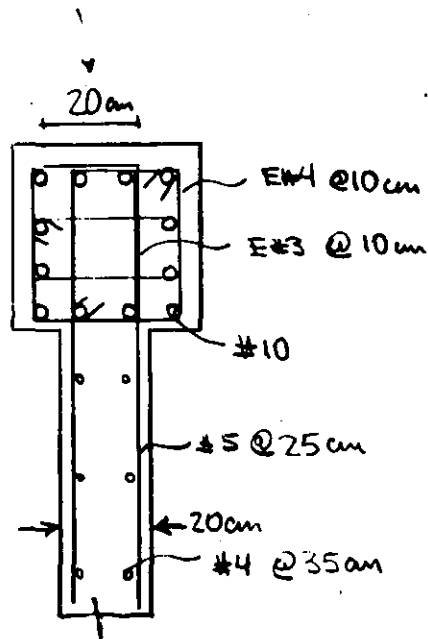
$$= 30 \text{ cm} < 45 \text{ cm (Ancho del elemento de exterior)}$$

El tramo recto después del doblado será de $12d_b = 19 \text{ cm}$

usar 20 cm

Croquis

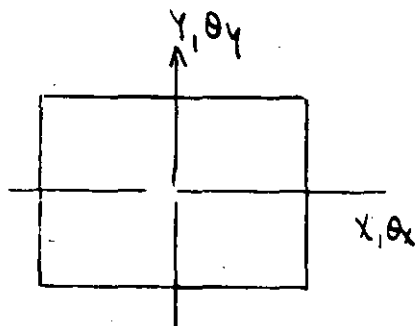
Elemento exterior
45 cm x 45 cm



6- INTERACCIÓN SUELO - ESTRUCTURA.

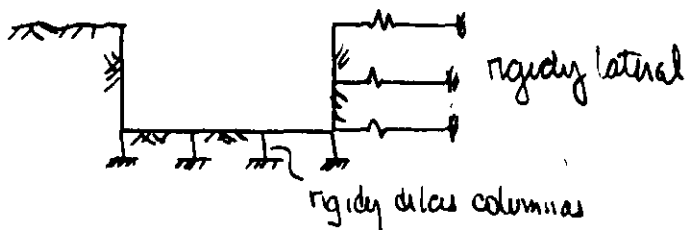
- losa de cimentación y muros de contención, que se suponen rígidas + pilotes
- contrateles

Algunos comentarios sobre modelación de la interacción suelo - estructura usando ETABS.



El objetivo es modelar $k_x, k_{\theta x}, k_y$ y $k_{\theta y}$

Para cimientos de cimentación



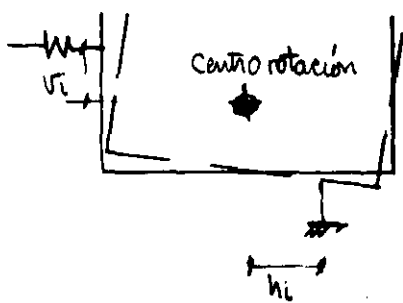
La rigidez lateral total de la cimentación será dada por:

$$k_x = \sum k_{lateral} + \sum \frac{12EI}{L^3(1+3\psi)}$$

columnas equivalentes
 donde $\psi = \frac{6EI}{L^2 A_r G}$ (si $\psi = 0$: deformaciones por cortante son nulas)

La rigidez rotacional total se obtiene de:

$$K_{\theta\theta} = \sum k_{\text{rot}} \cdot \sigma_i^2 + \sum \frac{AE}{L} h_i^2 \quad (\text{contribución de la rigidez axial de las resortes-columna})$$



$$+ \sum \frac{12EI}{L^3(1+\nu_s)} \sigma_i^2 \quad (\text{contribución de la rigidez lateral de las columnas})$$

$$+ \sum \frac{2EI(2\nu_s)}{L(1+\nu_s)} \quad (\text{contribución de la rigidez rotacional de las columnas})$$

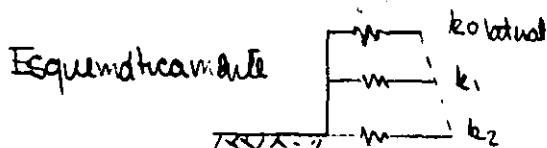
El término $K_{x\theta}$ se obtiene:

$$K_{x\theta} = \sum k_{\text{lateral}} \sigma_i + \sum \frac{12EI}{L^3(1+\nu_s)} \sigma_i + \sum \frac{6EI}{L^2(1+\nu_s)} \sigma_i$$

Se puede suponer que el centro de rotación estará a $2/3$ de la profundidad de la cimentación

se puede incrementar la rigidez lateral en forma lineal con la profundidad de la cimentación

$$k_{\text{lateral}} = k_{\text{olateral}} + c y$$



$K_x, K_y, K_{\theta x}, K_{\theta y}$ se obtienen: RDF-87, etc., etc.

Para obtener k_{ox} y k_{oy} en un punto, se supone $\beta=0$ y $L=0.5$ cm
 se aplica el elemento de columna en la superestructura;

Se resuelve un sistema de ecuaciones de la forma

$$\begin{Bmatrix} k_{ox} \\ L_x \\ k_{oy} \\ L_y \\ k_{oz} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} * \\ * \\ * \\ * \\ * \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} k_{ox} \\ A \\ I_y \\ k_{oy} \\ I_x \end{Bmatrix}$$

* ver ecuaciones
 pasadas, para una posición
 de rotación

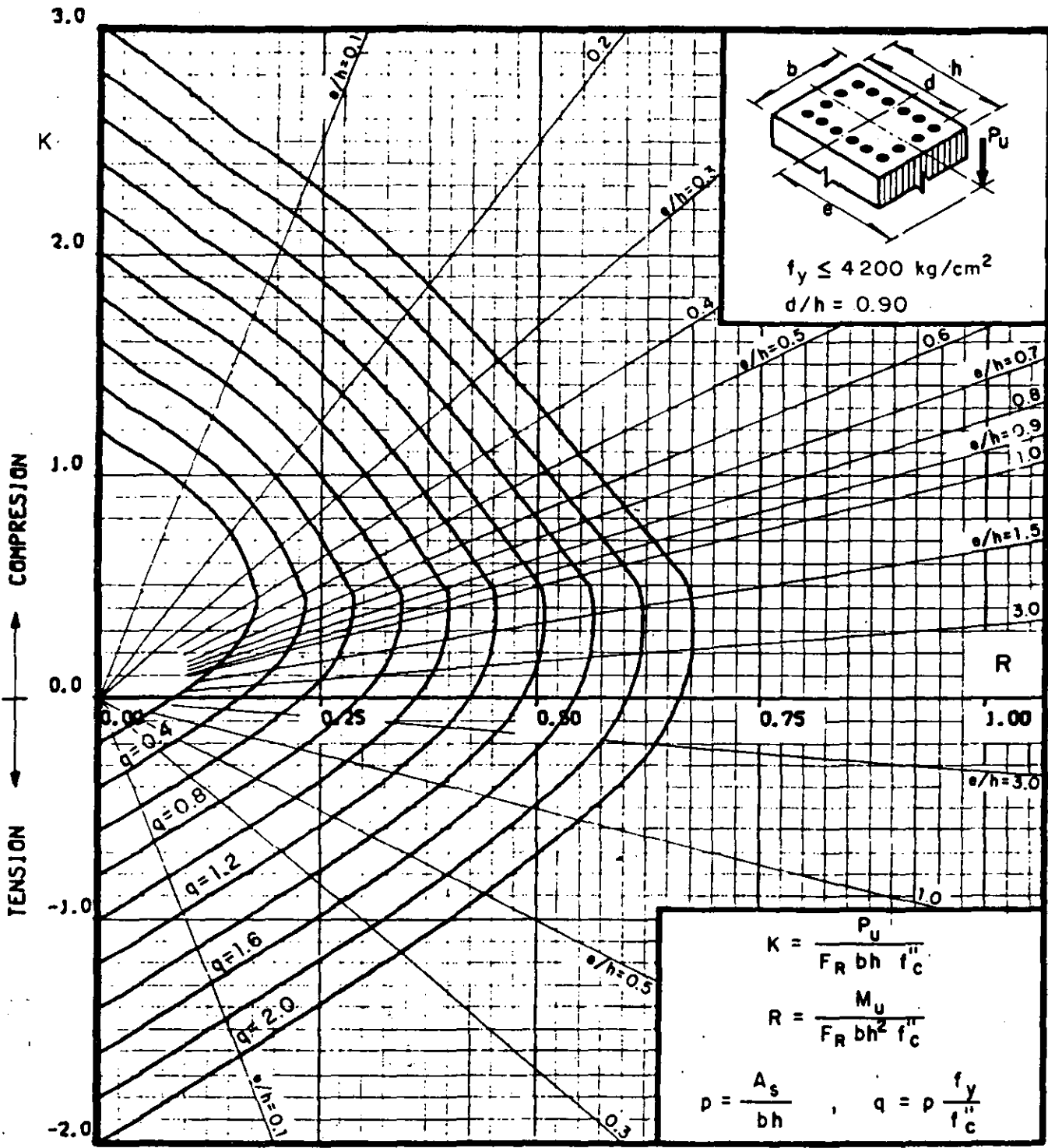
↓
 estos valores se usan en ETABS...

Nota: un cambio en CR, produce cambios de signo en los términos de la matriz K ; además, si un modo de vibración en respecto a un punto para el cual la matriz es singular, se producen problemas numéricos (inestabilidad)

Aun si $\det(K) \gg 0$, si se usan valores de k_{ox} , A , ... muy grandes se pueden tener problemas numéricos

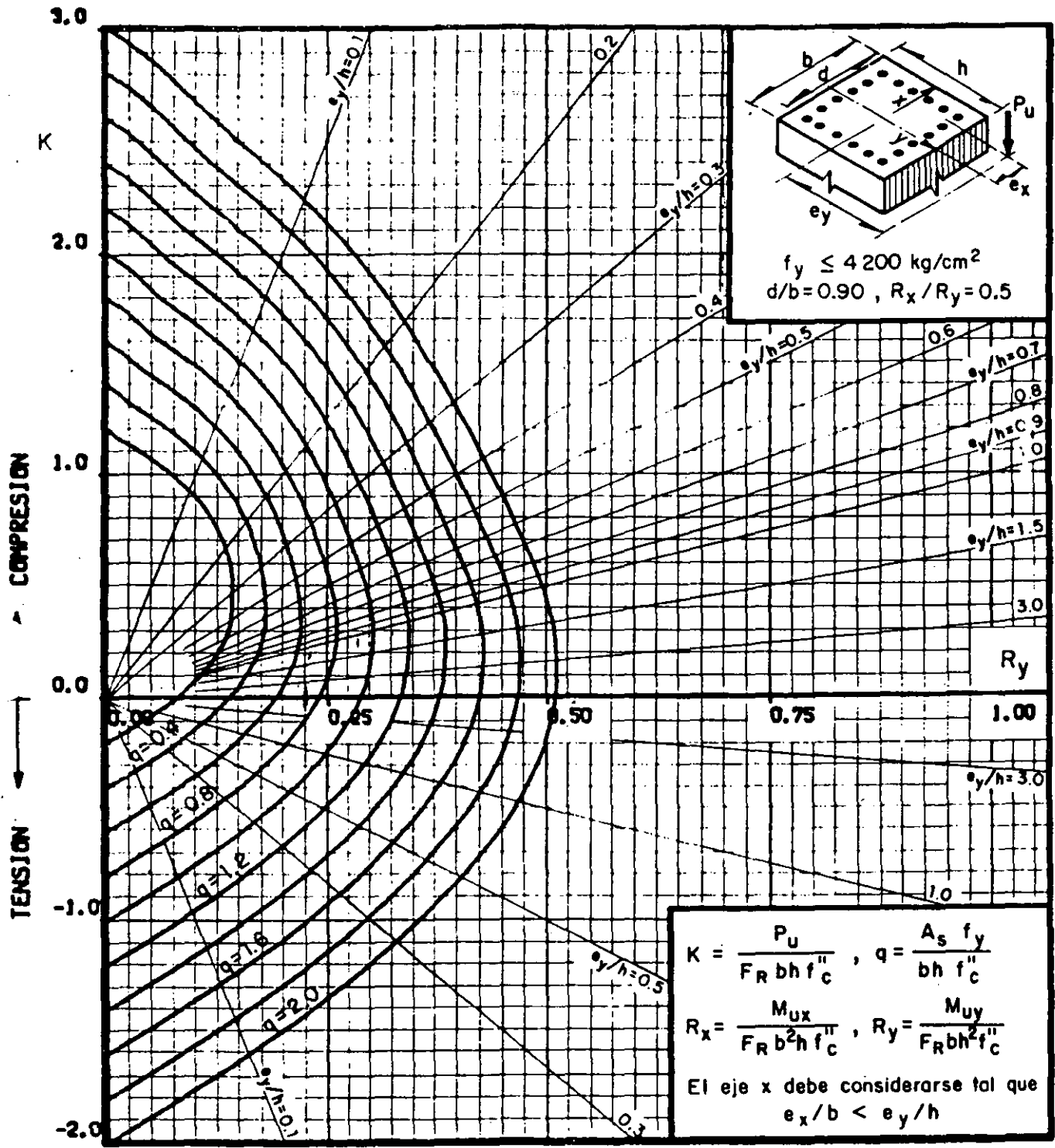
- Puesto que la hora de construcción es flexible, se produce una reducción de la magnitud de desplazamiento lateral de las columnas que puede llegar a causar problemas numéricos.

Para este edificio, el período fundamental aumentó en 20% en relación al calculado suponiendo un caso más rígido



A_s = Area total de refuerzo
 $f'_c = 0.85 f_c^*$, si $f_c^* \leq 250 \text{ kg/cm}^2$; $f'_c = (1.05 - \frac{f_c^*}{1250}) f_c^*$, si $f_c^* > 250 \text{ kg/cm}^2$
 F_R = Factor de reducción de resistencia
 P_u = Carga axial última
 M_{uy} = Momento flexionante último en dirección y = $P_u \cdot e_y$
 M_{ux} = Momento flexionante último en dirección x = $P_u \cdot e_x$

Fig 10



A_s = Area total de refuerzo
 $f_c'' = 0.85 f_c^*$, si $f_c^* \leq 250 \text{ kg/cm}^2$; $f_c'' = (1.05 - \frac{f_c^*}{1250}) f_c^*$, si $f_c^* > 250 \text{ kg/cm}^2$
 F_R = Factor de reducción de resistencia
 P_u = Carga axial última
 M_{uy} = Momento flexionante último en dirección y = $P_u \cdot e_y$
 M_{ux} = Momento flexionante último en dirección x = $P_u \cdot e_x$

Fig 42



FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA

XX CURSO INTERNACIONAL DE INGENIERIA SISMICA

MODULO III: DISEÑO SISMICO DE EDIFICIOS

COMPORTAMIENTO DE ELEMENTOS DE MAMPOSTERIA

ING. OSCAR HERNANDEZ BASILIO

COMPORTAMIENTO DE ELEMENTOS DE MAMPOSTERIA

Oscar Hernández Basilio*

1. INTRODUCCION

La mampostería es uno de los materiales de construcción más antiguos utilizados por el hombre, la noticia más remota que se tiene de su empleo se puede leer en la Biblia, donde en el capítulo del Génesis 11-3,4 dice.....

³Un día dijeron unos a otros "Vamos a hacer ladrillos y a cocerlos en el fuego". Así, usaron ladrillos en lugar de piedra y asfalto natural en lugar de mezcla.⁴ Después dijeron "Vengan vamos a construir una ciudad y una torre que llegue hasta el cielo. De este modo nos haremos famosos y no tendremos que dispersarnos por la tierra ----- así dice el relato donde aparentemente se comienza a emplear las mamposterías como elementos estructurales.

Grandes obras de mampostería han perdurado en el tiempo como símbolo de la grandeza de los pueblos, muestra de ello son, la pirámides en Egipto, México, etc; o más recientemente las viviendas que tienen 500 o más años de antigüedad. Sin embargo, probablemente es por esta razón, que la mampostería en México se asocia generalmente a procedimientos artesanales tanto en la fabricación de las piezas como en los procesos constructivos. Sin embargo, si bien todavía se utilizan ampliamente mamposterías de piedra y adobe de barro o de concreto de baja resistencia, también desde hace muchos años se fabrican piezas de alta resistencia y buen control de calidad, con las cuales se han realizado obras de mampostería cada vez más atrevidas.

* Director General, Proyectos Tensión, S.A. de C.V.

Se fabrican comercialmente en México bloques de barro extruido con resistencia de 400 kg/cm^2 o superior y bloques de concreto en los que pueden lograrse resistencias sobre área bruta superiores a los 200 kg/cm^2 . Con materiales semejantes en zonas de bajo riesgo sísmico como Suiza, Inglaterra y los países Escandinavos, se han construido muchos edificios de entre 15 y 20 pisos a base de muros de carga sin ningún refuerzo. En zonas de mayor riesgo sísmico como el Suroeste de los EEUU, se han construido edificios del orden de 15 pisos con mampostería de bloque de concreto con abundante refuerzo.

En México las construcciones a base de muros de carga de mampostería han sido muy populares en edificios de pocos pisos, principalmente con la modalidad de reforzar los muros con dadas y castillos. El límite usual en edificios ha sido de 5 o 6 pisos.

La ventaja principal del empleo de muros de carga es que el mismo elemento que sirve para subdividir los espacios y para dar aislamiento, tiene función estructural. Otras ventajas son que el sistema constructivo no requiere de equipo elaborado y costoso y es intensivo en uso de mano de obra no muy especializada. Por estas ventajas, la construcción a base de muros de carga de mampostería resulta conveniente cuando el espacio arquitectónico está muy subdividido y la distribución de áreas y elementos de separación es regular tanto en planta como en elevación.

Las desventajas del empleo de muros de carga son la falta de flexibilidad en la subdivisión de los espacios que resulta de la imposibilidad de remover las paredes divisorias; la dificultad de ejercer un control de calidad estricto tanto en el material como en la construcción, y la baja resis-

2

tencia en tensión y la fragilidad ante deformaciones en su plano que obligan al empleo de refuerzo y limitan su aplicación en zonas sísmicas.

Las recomendaciones para el diseño estructural de la mampostería han sido tradicionalmente muy someras, basadas en especificaciones de tipo geométrico, en procedimientos muy burdos de revisión de esfuerzos y en el empleo de factores de seguridad muy altos.

En años recientes se han realizado estudios bastante extensos acerca de las propiedades mecánicas y el comportamiento estructural de la mampostería, la cual ha permitido la elaboración de normas de diseño más racionales. Un ejemplo de ello son las normas para mampostería del reglamento de construcciones para el Distrito Federal.

La mayor parte de los daños materiales y pérdidas de vidas humanas a raíz de temblores importantes se han debido al colapso de construcciones de viviendas de uno a cinco niveles. Las razones principales de estos colapsos han sido: el empleo de materiales de baja resistencia, o cuya resistencia se deteriora rápidamente con el tiempo, el uso de procedimientos constructivos que no permiten una liga adecuada de los muros entre sí y la adopción de soluciones a base de muros muy altos con pocas separaciones interiores y con techos muy pesados o poco rígidos.

En muchos casos la adopción de estas formas constructivas se debe a la falta de recursos económicos que hace que se puedan emplear solo materiales que se pueden obtener prácticamente sin costo en el lugar, como el lodo, la piedra, la madera rolliza etc, y solo permite adoptar procedimientos constructivos que puedan ser realizados directamente por los habitantes. No resulta muy difícil encontrar modificaciones a estos sistemas

de manera que, sin que se requiera un costo adicional significativo y sin cambiar radicalmente las características de las viviendas, se obtenga una seguridad adecuada con el efecto de sismos.

Cuando se trata de viviendas en las que se pueda invertir en materiales comerciales, como el ladrillo, el cemento y el acero, puede obtenerse seguridad adecuada contra sismos, y a la vez condiciones de habitabilidad favorables, mediante el empleo de muros de mampostería, de piezas de barro o de bloque de concreto, reforzados en distintas formas para proporcionar una mayor resistencia y continuidad al conjunto. En años recientes se ha incrementado notablemente el conocimiento del comportamiento sísmico de estos elementos estructurales, lo cual ha permitido la elaboración de recomendaciones específicas para el diseño y construcción de muros de mampostería en zonas sísmicas.

En este trabajo se tratará de resumir los principios del diseño sísmico de las construcciones de mampostería, partiendo del comportamiento sísmico observado y de resultados de ensayos de laboratorio; se recomendarán las formas de estructuración que se consideran más eficientes, se señalarán los defectos que más comúnmente dan lugar a fallas y se darán recomendaciones específicas de diseño. Se incluyen materiales y procedimientos constructivos muy distintos como las construcciones de adobe, las de ladrillo no reforzado, las reforzadas con dalas y castillos y las que tienen refuerzo en el interior de piezas huecas. Se analizarán también algunos nuevos procedimientos de refuerzo que pueden resultar convenientes en algunos casos y se harán algunos comentarios acerca de las formas de reparar las construcciones dañadas.

2. COMPORTAMIENTO SISMICO OBSERVADO DE CONSTRUCCIONES DE MAMPOSTERIA

Construcciones de adobe. La experiencia con este material es definitivamente negativa. La escasa resistencia en tensión del adobe y la poca adherencia que se logra en las juntas con los morteros de lodo son solo algunos de los inconvenientes. Aún con adobes de buena calidad no puede lograrse una buena liga entre los muros transversales; esto aunado al gran peso de los muros, y generalmente de los techos, hace que estos muros fallen generalmente por el efecto de fuerzas normales a su plano, ya sea por volteamiento o por fallas locales por los empujes de los elementos de techo. En muchas ocasiones las fallas de estas construcciones han sido agravadas porque el adobe se encontraba muy debilitado por efecto del intemperismo.

Como recomendaciones generales para mejorar el comportamiento sísmico de estas construcciones se pueden mencionar la selección cuidadosa de los suelos con que se fabrica el adobe, su mejoramiento con fibras o con aditivos estabilizadores, la reducción de la altura de los muros al mínimo admisible para la habitabilidad de la vivienda, la subdivisión de la misma en espacios pequeños por medio de muros ligados entre sí con el mejor cuatrabeo de las piezas posible, el evitar techos muy pesados y el estructurar estos techos para que tengan rigidez en su plano.

Sin embargo, una mejora sustancial en el comportamiento sísmico solo puede obtenerse por medio de algún refuerzo en el adobe que produzca una liga adecuada entre los elementos y proporcione cierto confinamiento y ductilidad a los muros. Algunos de estos procedimientos de refuerzo se describen en la ref 1 .

Construcciones de mampostería no reforzada. Las construcciones de tabique o bloque de concreto sin refuerzo han tenido también un comportamiento sísmico muy deficiente ya que adolecen esencialmente de los mismos defectos que las de adobe: liga pobre y falla muy frágil. Una fuente muy frecuente de daños y colapsos es la presencia de huecos de puertas y ventanas no reforzadas, en los que la concentración de esfuerzos que se presenta en las esquinas provoca la iniciación de grietas diagonales que llevan a la falla a todo el muro. Este tipo de construcción debe evitarse en zonas sísmicas exceptuando quizás construcciones que encierren espacios pequeños y con techos ligeros.

Construcciones de mampostería confinada. Se denomina así a los muros que están rodeados en su perímetro por castillos y dadas que forman un marco que

encierra tableros relativamente pequeños, proporcionándoles una capacidad de deformación mucho mayor que la del muro no reforzado y una liga muy efectiva con los elementos adyacentes. El comportamiento observado de construcciones de este tipo hasta de varios pisos ha sido definitivamente mejor que el de la mampostería no reforzada; se cuentan con criterios para fijar la distribución de los elementos resistentes y de su refuerzo y con procedimientos para el diseño de la mampostería así reforzada. Hay que hacer notar sin embargo, que si con este sistema se reduce mucho la probabilidad de un colapso de la construcción y de daños mayores, no se evita la posibilidad de agrietamientos diagonales en los muros, ya que la resistencia en tensión diagonal de la mampostería no se incrementa apreciablemente por la presencia de las dalas y castillos.

Construcciones de mampostería con refuerzo interior. En años recientes se ha popularizado en diversos países un sistema constructivo que consiste en reforzar los muros de piezas huecas con barras verticales en los huecos de las piezas y horizontales en las juntas o en piezas especiales. La experiencia sobre el comportamiento sísmico de estas construcciones es más o menos amplia, hay evidencia de que con cantidades altas de refuerzo se obtiene un incremento en la resistencia con respecto a la mampostería no reforzada y un comportamiento bastante dúctil. Hay que recalcar que las cantidades de refuerzo necesarias para lograr un comportamiento adecuado son muy altas y que se requieren separaciones pequeñas tanto vertical como horizontalmente. El procedimiento tiene distintas modalidades que llegan en muros de edificios altos hasta el relleno total de los huecos de las piezas con concreto y el colado de muros delgados de concreto entre dos paños de muros de mampostería (cavity wall). La fig 1 muestra las características de algunos procedimientos de refuerzo típicos. En México, el refuerzo interior no es muy popular

debido a la dificultad de supervisión y, cuando se usa, se emplean cantidades de refuerzo mucho menores que las mínimas especificadas en otras partes, con lo cual se ha demostrado, tanto en laboratorio como en estructuras reales, que se tiene un comportamiento sísmico muy defectuoso debido a que la resistencia se deteriora rápidamente por la repetición de cargas alternadas.

Este procedimiento de refuerzo tiene la ventaja, sobre el de confinar con dalas y castillos, de que el refuerzo interior poco espaciado incrementa la resistencia y limita el agrietamiento a espesores pequeños, y de que el muro puede quedar aparente. Tiene sin embargo la desventaja de que las piezas huecas tienden a tener fallas locales por desprendimiento de sus paredes, que la liga que se obtiene entre los distintos elementos es menos efectiva y que la cantidad de refuerzo necesaria para asegurar un buen comportamiento es mayor.

En Estados Unidos y Nueva Zelanda la mampostería con refuerzo interior es bastante popular como sistema constructivo; sin embargo es usual que se llenen completamente los huecos de las piezas con un mortero muy fluido y con abundante refuerzo vertical y horizontal. Con este sistema, en mampostería de bloques de concreto, se obtiene prácticamente un muro monolítico, ya que el concreto colado en los huecos se adhiere perfectamente al bloque; en piezas de barro la eficiencia del procedimiento es menor porque el concreto del colado, al contraerse por fraguado, se separa del tabique; el empleo de aditivos estabilizadores puede evitar este problema.

3. EVIDENCIAS EXPERIMENTALES DEL COMPORTAMIENTO DE LA MAMPOSTERIA.

El diseño de estructuras de mampostería había estado, hasta hace poco tiempo, basado en consideraciones empíricas sin aplicarle en forma racional los prin

ciplos ingenieriles. Ultimamente se han efectuado análisis racionales para predecir la resistencia de mamposterías bajo diferentes sollicitaciones de carga como son flexocompresión, cargas verticales, cargas laterales, etc. Simultáneamente se han llevado a cabo multitud de ensayos para comprobar la validez de dichos análisis.

Para determinar las propiedades básicas de la mampostería, se efectúan diversos ensayos. La prueba de compresión en pilas, fig 2, se emplea para indicar la resistencia axial de compresión (f'_m) debiéndose tomar en cuenta los efectos de esbeltez cuando esta resistencia índice se extrapole a muros. El ensaye en muretes, fig 3, se emplea para determinar el esfuerzo cortante resistente en esta prueba se aplica al espécimen una carga diagonal que induce la falla, encontrándose una buena correlación entre los resultados de esta prueba y muros con características afines. En la parte correspondiente a Diseño de Estructuras de Mampostería se describe con cierto detalle la realización de dichos ensayos.

3.1 Comportamiento bajo distintas sollicitaciones

3.1.1 Flexocompresión. En la fig 4 se muestra la distribución de esfuerzos supuesta para la mampostería en el caso de flexocompresión, para diferentes valores de excentricidad de la carga vertical aplicada al muro.

Se han presentado diversas teorías para calcular la resistencia en flexocompresión de muros tomando en cuenta efectos de esbeltez, la más acertada es aquella en la que se procede en la misma forma que para columnas de concreto, determinándose teóricamente diagramas de interacción carga axial-momento flexionante que como se observa en la fig 5, existe buena correlación entre teoría y resultados de laboratorio.

3:1.2 Flexión y cortante

En estructuras situadas en zonas sísmicas es ventajoso emplear muros para resistir fuerzas laterales por la gran rigidez que tienen estos elementos para cargas en su plano, sin embargo es necesario verificar que su resistencia sea compatible con dicha rigidez. Son tres las formas principales de estructurar a base de muros:

1. De carga, para soportar fuerzas verticales y horizontales, fig 6a
2. Como diafragma, estando confinados en marcos de acero o concreto que le transmiten la fuerza lateral, fig 6b
3. Muro de cortante

El primer tipo de muro es eficiente debido a la presencia de carga vertical que hace que el muro sea más resistente a las fuerzas cortantes y a los momentos de volteo producidos por el sismo.

La principal función de los muros diafragma es tomar la fuerza horizontal que le trasmite el sistema de marcos, que toman las cargas verticales; el muro funciona entonces como un puntal de compresión.

Los muros de cortante, aislados de la estructura de marcos, se construyen de concreto reforzado debido a que la baja carga vertical los hace relativamente críticos, raramente se hacen de mampostería.

Para el diseño sísmico no solo interesa la resistencia de la estructura ante carga lateral sino que también es necesario conocer la capacidad de la misma para absorber la energía introducida por el sismo y amortiguar el movimiento inducido; así como también la alteración de estas propiedades con la periodicidad de la fuerza horizontal.

Las propiedades de rigidez y resistencia pueden calcularse en muros ensayados en carga estática y en ciertos casos en especímenes más pequeños; para tener una idea de la capacidad de amortiguamiento y deterioro de la mampostería, es necesario efectuar pruebas dinámicas cíclicas.

Por lo general en la mampostería se presentan dos tipos de falla: flexión y cortante. La falla por flexión se alcanza cuando fluye el refuerzo vertical con el que se refuerza el muro; la resistencia ante esta sollicitación puede calcularse fácilmente suponiendo un bloque equivalente en compresión en un extremo y que el acero de refuerzo en el otro extremo del muro está fluyendo.

Para alcanzar la falla por cortante es necesario que primeramente no se alcance la de flexión; es decir, solo se obtiene aquella cuando existe abundante refuerzo vertical y/o mucha carga axial o se trata de muros de gran longitud.

Hasta 1965 la mayoría de los ensayos que se realizaban para determinar las características de las mamposterías eran estáticos; de lo observado en los últimos sismos, ha sido evidente que los resultados de esos ensayos monotónicos son de valor limitado para diseño sísmico, por lo que actualmente los procedimientos de diseño que proponen los diversos reglamentos están basados en resultados obtenidos de pruebas ante cargas laterales alternadas, aún cuando no de carácter dinámico. Esto último no parece ser una limitante porque se ha observado que los resultados de ensayos dinámicos proporcionan valores más grandes a los obtenidos bajo cargas laterales alternadas pseudoestáticas, lo que se explica porque las mamposterías son muy rígidas y su velocidad de respuesta ante las excitaciones es baja.

La experiencia a mostrado que las principales variables que influyen en el comportamiento de las mamposterías son: tipo de pieza y mortero; confinamiento; cuantía y disposición del refuerzo; relación altura a longitud; la carga vertical sobre el muro y en ciertos caso el aplanado que se coloca en una o en ambas caras del mismo.

Se puede alcanzar gran capacidad de deformación para valores altos de la relación altura a longitud, bajas cargas axiales y poca cantidad de refuerzo vertical en los extremos del muro. Reduciendo la relación de aspecto del muro, aumentando la carga axial y el acero de refuerzo en los extremos se alcanzan fallas de tipo frágil por cortante a través de grietas diagonales que pueden correr por la juntas de mortero o atravesar las piezas y juntas (tensión diagonal); este último tipo de falla por cortante es indicativo de la máxima capacidad de la mampostería, porque el primero solo indica que se tiene un mortero de baja calidad.

Tanto para flexión como por cortante, el comportamiento observado ante alteraciones de carga puede resumirse en la siguiente forma; para niveles bajos de carga el comportamiento es prácticamente lineal, una vez que se agrieta el muro, tanto para flexión como para cortante, se observa que para un mismo nivel de deformación se tiene un decremento en la resistencia ante alternaciones de carga, siendo mayor para el casos de cortante; también se diferencía la forma de los ciclos histeréticos, ya que para cuando predomina la flexión estos encierran un área mucho mayor que para el caso de cortante. Al incrementar la carga, nuevamente se presenta el fenómeno antes mencionado, hasta que finalmente se llega al colapso para deformaciones pequeñas en el caso de cortante o grandes en el caso de flexión; en las figs 9a y 9b se muestra esquemáticamente el comportamiento antes descrito.

A pesar de ser la falla por cortante la menos deseada porque desarrolla menor capacidad de disipación de energía, es la que más comúnmente se tiene presente en la realidad durante un sismo.

En ambos tipos de fallas, flexión o cortante, se presentan aplastamientos y desprendimientos locales en los extremos de los muros para etapas cercanas a la falla, dichos aplastamientos son debidos a la gran expansión lateral que tiene el mortero para altos niveles de esfuerzo, lo que produce tensiones en las piezas. En diversos países se evita lo anterior colocando placas de acero perforadas en los extremos de los muros en las dos o tres hiladas inferiores y superiores, ref 2, esto resultaría impráctico en nuestro medio, una solución no tan eficiente pero que ha dado muy buenos resultados, aún en mamposterías de piezas huecas, es colocar varilla corrugada de pequeño diámetro (5/32") en las juntas de mortero, este refuerzo también ha probado ser efectivo para resistir fuerza cortante una vez que el muro se agrieta.

En una serie de ensayos estáticos y dinámicos realizados por William y Scrivener, ref 3, en las cuales aplicaron ciclos a diversos niveles de carga y frecuencias, encontraron que en aquellos muros probados estáticamente y que fallaban por cortante, presentaban la misma degradación de carga que aquellos ensayados bajo condiciones dinámicas; sin embargo, en aquellos que fallaron por flexión, los ensayados dinámicamente se comportaron menos satisfactoriamente que los estáticos equivalentes. Esto último es debido por el movimiento violento en el caso dinámico se pierde más rápidamente el material que confina el acero, permitiendo el pandeo y reduciendo la capacidad del muro a flexión; no es el caso de cortante donde la resistencia está básicamente proporcionada por la mampostería.

También se ha observado que es más eficiente para soportar fuerzas cortantes el refuerzo horizontal colocado en las juntas y distribuido en forma uniforme en la altura del muro, que el vertical colocado en los extremos o en el interior de las piezas huecas.

Cuando la mampostería se coloca en el interior de un marco robusto de acero o concreto, se pueden seguir dos caminos:

1. Aislar la mampostería del marco para que aquella no soporte cargas
2. Hacer que trabaje la mampostería al colocarla con contacto con el marco perimetral.

El primer aspecto es muy difícil de realizar además de costoso; en el segundo caso se tiene un gran incremento de la rigidez lateral del sistema y de su resistencia. Ensayes realizados demuestran que es posible tener comportamiento dúctil cuando las columnas tienen refuerzo suficiente por cortante para permitir que desarrollen su momento de fluencia. El refuerzo horizontal colocado entre las juntas de mortero ayuda a repartir mejor la fuerza cortante en toda la altura del muro evitando que se concentre en sus extremos superior e inferior.

3.2 Evidencia experimental realizada en México

En la ref 4 se compila la información experimental que se tenía en México hasta 1972 aproximadamente.

Para carga lateral estática se efectúan dos tipos de pruebas; el denominado en voladizo, fig 7a, donde se presentan momentos flexionantes que pueden llegar a ser críticos; y el ensaye de compresión diagonal, fig 7b donde sólo se inducen deformaciones por cortante. El efecto de pisos superiores se

representa una carga vertical.

La primera forma de ensaye trata de ser representativa de los muros de carga; mientras que para cuando se tiene un marco confinante, el ensaye de compresión diagonal intenta reproducir a un muro diafragma.

Para cargas laterales dinámicas y alternadas también se efectúan las mismas formas de ensaye.

En las figs 8 y 9 se muestran diversas curvas cargas-deformación angular para diferentes formas de ensaye y en la fig 10 la forma típica de falla.

Se tienen en general tres formas de agrietamiento: la debida a flexión se caracteriza porque es una grieta sobre una junta del mortero cerca de la base del muro; la falla por cortante corre alternadamente por las juntas verticales y horizontales y la falla por tensión diagonal atraviesa indistintamente piezas y mortero.

La presencia de alguno de estos tipos depende principalmente de las características de la mampostería así como también de la sollicitación de carga.

En el muro en voladizo la falla se inicia por agrietamiento en la base, presentándose después una falla por agrietamiento diagonal al aumentar las deformaciones. El tener carga vertical aumenta apreciablemente la carga de primer agrietamiento y tiende a llevar a un tipo de falla por tensión diagonal, disminuyendo la ductilidad del muro. El agrietamiento por flexión se reduce también al aumentar el acero de refuerzo en los extremos del muro. El refuerzo interior puede aumentar la resistencia máxima pero no sustancialmente la de agrietamiento.

Para muros en compresión diagonal se presentan fallas de cortante o de ten-

sión diagonal y esto depende de las características de la mampostería; aquí también la carga vertical incrementa la resistencia al agrietamiento y la máxima, pero también la deformabilidad del muro; el acero interior aumenta ligeramente la carga resistente al agrietamiento pero disminuye la deformación correspondiente, aumentando la carga máxima y la deformabilidad post-agrietamiento. El aplanado del muro contribuye en forma importante a la resistencia del mismo. Se ha visto que el confinamiento exterior del muro no influye apreciablemente en la resistencia al agrietamiento, pero sí en la resistencia y ductilidad a la falla.

La presencia de agrietamiento no implica necesariamente la falla del muro sino que esta depende del confinamiento, refuerzo exterior e interior, que este tenga y que puede hacer que el muro resista cargas mayores a la de agrietamiento.

Desde el punto de vista práctico si se refuerza convenientemente los extremos del muro, el problema de flexión desaparece y puede considerarse que la principal sollicitación es una carga diagonal de compresión equivalente, a la que se añade la carga vertical proveniente de pisos superiores.

Los estudios bajo cargas dinámicas y alternadas son bastante complejos; en la fig 11 se muestran las características de respuesta que más nos interesan del muro siendo estas: la capacidad de energía, capacidad de disipación de energía, el factor de ductilidad y el deterioro del muro, el cual se define como la pérdida de rigidez y resistencia debida a la alternación de carga, fig 12.

Para cargas alternadas el deterioro del muro es pequeño cuando se tienen deformaciones angulares menores a la del agrietamiento y después de éste el deterioro depende de la resistencia del marco confinante. El material hue

co es mas sensible al deterioro que una maciza, y es diferente la intensidad del deterioro si la falla es por flexión (dúctil) a que si es por cortante o por tensión diagonal (frágil) siendo mayor en los últimos casos. La carga vertical reduce apreciablemente el deterioro. El deterioro mayor se tiene al pasar al segundo ciclo de carga después del cual permanece casi inalterado. (17)

En la ref 3 se estudió el comportamiento de muros bajo cargas cíclicas dinámicas observándose que el mismo comportamiento que un muro tiene para cargas alternadas se presenta para cargas dinámicas con excepción de la prueba en voladizo sin carga vertical (la de más flexibilidad), en la cual la prueba dinámicas muestra gran deterioro del muro, pero este caso tiene poca importancia desde el punto de vista práctico para una mampostería.

Se realizó recientemente un estudio para tratar de obtener procedimientos económicos para mejorar el comportamiento sísmico de la mampostería de piezas huecas con refuerzo interior (ref 5).

Se estudiaron diversas distribuciones de refuerzo (fig 13) que permitiesen mantener la capacidad de carga del muro después del agrietamiento sin que se viese disminuida por repeticiones de cargas alternadas.

Se encontró que la adición de barras de refuerzo de pequeño diámetro (4mm) y de alta resistencia ($6\ 000\ \text{kg/cm}^2$) en las juntas horizontales, aumenta ligeramente la resistencia, restringe la propagación del agrietamiento del muro y reduce el deterioro ante la repetición de cargas. Este refuerzo puede colocarse también en muros de piezas macizas con castillos, produciendo una distribución más uniforme de los esfuerzos cortantes en toda la longitud del muro y evitando las altas concentraciones de esfuerzos que se producen en los castillos cuando el muro se agrieta diagonalmente. Cuando no se coloca este

refuerzo en las juntas, resulta muy conveniente que los castillos cuenten con refuerzo especial en sus extremos para evitar su falla por corte después de que el muro se agrieta diagonalmente.

4. REGLAMENTACION SOBRE ESTRUCTURAS DE MAMPOSTERIA

Desde tiempo inmemorial se ha tratado de implantar reglamentos de diseño que aseguren buen comportamiento estructural. Del primer reglamento que se tiene evidencia es el que se contempla dentro del Código de Hamurabi, decretado por el Rey de Babilonia, Hamurabi, en el siglo 20 A.C.. En ese código se contemplan diversos tipos de leyes: civiles, penales, técnicas, etc.

Dentro de lo relacionado con el aspecto construcción, el código mencionado establece que si por causa adjudicable al constructor se daña la propiedad, aquel tendrá que pagar la reparación del inmueble; si un esclavo muere por la falla de la construcción, el constructor deberá sustituir el esclavo al dueño de la vivienda; si muere un hijo del propietario por la misma razón se tendrá que matar a un hijo del constructor.....; si muere el propietario, se debe dar muerte al constructor-----, con normas como las anteriores seguramente en nuestro tiempo serían muy pocos los que se dedicarían al diseño y construcción de estructuras.

Afortunadamente los avances de la tecnología han hecho que ahora los reglamentos equilibren los principales aspectos de una construcción: seguridad y economía .

El Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal, ref 6, incluye un capítulo sobre diseño y construcción de estructuras de mampostería, el cual ha sido modificado sustancialmente con respecto a la versión anterior y trata en detalle los requisitos para diseño sísmico.

Uno de los problemas que se enfrentan al elaborar recomendaciones de diseño

para mampostería es la gran variedad de materiales de distintas formas y propiedades que se tiene que cubrir. Si se establecen requisitos generales, hay que fijar criterios comunes para determinar los esfuerzos básicos resistentes de la mampostería (principalmente resistencia en compresión y en cortantes). Con este fin en el reglamento se establecen procedimientos de ensaye relativamente simples para determinar dichas propiedades cuando no se tenga información previa acerca de los materiales en cuestión y se proporcionan, además, valores específicos para los materiales de empleo más común para los cuales se cuenta con un número suficiente de determinaciones; los esfuerzos propuestos representan valores característicos, o mínimos probables, del esfuerzo de falla, determinados con el criterio de que la probabilidad de que no sean alcanzados por los materiales empleados en la estructura sea muy pequeña. Dichos esfuerzos corresponden a la resistencia de la mampostería sin refuerzo. Se considera que la presencia de castillos y dalas incrementa solo ligeramente la resistencia a compresión y a cortantes. El refuerzo interior sí proporciona un aumento apreciable de la resistencia con respecto a la mampostería no reforzada; dicho incremento solo puede determinarse en forma confiable mediante ensayos a escala natural de muros con la misma disposición de refuerzo que se va a emplear en la construcción. En forma conservadora el reglamento permite que los esfuerzos resistentes para la mampostería no reforzada se incrementen en 50% cuando se emplee las cuantías y distribuciones de refuerzo interior especificadas por el reglamento que se describirán más adelante.

Las normas para mampostería del nuevo reglamento especifican dos modalidades para el refuerzo de la mampostería; la que se denomina mampostería confinada es la usual con castillos y dalas para los cuales se fijan separaciones y re-

quisitos de refuerzo similares a los del reglamento anterior. En el otro procedimiento, denominado mampostería con refuerzo interior, se coloca refuerzo vertical en el interior de los huecos de las piezas y refuerzo horizontal en piezas que permitan colocar varillas en las juntas y proporcionarles el recubrimiento necesario para que puedan transmitirse los esfuerzos de adherencia. Las normas admiten también construcciones de mampostería sin refuerzo; sin embargo, exigen que se diseñen con factores de seguridad muy altos, lo cual hace que solo para construcciones de un nivel con alta densidad de muros y techos ligeros, resulte económicamente factible construir muros sin refuerzo.

El reglamento incluye dos procedimientos de diseño con distinto nivel de refinamiento. El método simplificado es aplicable a la mayoría de construcciones para vivienda que cumplen con requisitos no muy estrictos en cuanto a densidad de muros, altura máxima de muros y ausencia de grandes excentricidades de las cargas. El método detallado de diseño es aplicable cuando no se cumplan las condiciones impuestas para el empleo del método simplificado o cuando se quiera obtener un diseño más refinado. Ambos procedimientos están planteados en un formato de diseño por resistencia que es el adoptado en general por el reglamento (hay que revisar que el efecto de las cargas de trabajo multiplicado por un factor de carga, F_c , no exceda de la resistencia calculada multiplicada por un factor de reducción de resistencia, F_R). La conversión a un formato de esfuerzos admisibles es casi inmediata si se agrupan los factores parciales de seguridad en uno solo que afecta al esfuerzo resistente.

La carga vertical resistente se calcula con $P_R = F_R F_C f_m^* A_T$, en que A_T es el área transversal bruta del muro, f_m^* el esfuerzo resistente en compresión y F_E un factor correctivo por la esbeltez del muro y por la excentricidad de la carga para el cual se dan valores fijos en el método simplificado y un procedimientos para su determinación en el método general en función de la esbeltez y excentricidad calculadas. El factor de reducción F_R vale 0.6 para muros reforzados y 0.3 para no reforzados.

El cálculo de la resistencia a cargas laterales está ligada a los métodos de diseño sísmico especificados por el reglamento. Para la mayoría de las construcciones de mampostería es aplicable un método simplificado de diseño sísmico que permite encontrar en forma muy directa las fuerzas laterales para las que hay que diseñar los muros. Se especifican en este método simplificado fuerzas actuantes mayores para muros de piezas huecas que para muros de piezas macizas debido a la diferente ductilidad y deterioro que se tiene en los dos casos. Los requisitos que, según el reglamento, debe cumplir la mampostería confinada en lo que respecta a ubicación de los castillos y dadas y a la cantidad de refuerzo longitudinal y transversal en ellos, se presentan en el manual sobre Diseño de Estructuras de Mampostería. Los requisitos para la mampostería con refuerzo interior, fijan la cantidad total de refuerzo en 0.002 veces el área del muro y su separación máxima en 90 cm.

Para la determinación de fuerza cortante que resiste el muro se especifica en el método simplificado

$$V_R = 0.7 F_R v^* A_T$$

en que v^* es el esfuerzo resistente en cortante y F_R el factor de reducción que debe tomarse como 0.6 para muros confinados o con refuerzo interior y

y 0.3 para muros no reforzados o cuyo refuerzo no cumple con los requisitos mínimos especificados. En el método detallado se especifica una expresión más refinada que toma en cuenta el efecto de la carga axial, en la resistencia al cortante.

Además de la resistencia a fuerza cortante es necesario revisar la resistencia a momento flexionante debido a las cargas laterales, para lo cual puede llegar a necesitarse refuerzo especial en los extremos del muro; en este caso la resistencia se puede calcular con los procedimientos que se emplean para concreto reforzado.

Todo lo anterior se puede ver con más detalle en el manual sobre diseño de estructuras de mampostería⁽⁶⁾.

5. OTROS TOPICOS SOBRE MAMPOSTERIA

5.1 Recomendaciones generales sobre la estructuración de construcciones de mampostería

Las recomendaciones siguientes se refieren a la estructuración de las construcciones, a los materiales y el refuerzo, a los detalles y procedimientos constructivos.

Debe proporcionarse un sistema resistente en dos direcciones ortogonales, este requisito obvio no siempre se cumple; especialmente en casas habitación es frecuente que los elementos resistentes estén alineados en una dirección y que en la normal a ella exista un número muy reducido de muros con grandes aberturas para puertas y ventanas. En cada dirección deberá proveerse una densidad adecuada de elementos para resistir las fuerzas sísmicas.

La distribución de elementos resistentes debe ser aproximadamente simétrica

para evitar problemas de torsiones en planta que aumenten las fuerzas laterales en los muros; esto debe cuidarse especialmente en las construcciones de varios niveles.

Los sistemas de techo y entrepiso deben ser capaces de transmitir las fuerzas laterales a los elementos que tengan resistencia en la dirección de la acción sísmica. Esta condición no se cumple en techos de vigas o armaduras no contraventeadas en su plano, las cuales empujan directamente sobre los muros transversales y provocan fuerzas importantes perpendiculares a los planos de dichos muros, causando frecuentemente su falla por volteamiento. El contraventeo del techo, la colocación de una dala de remate perimetral, la liga entre muros transversales y el anclaje de los muros en su cimentación son factores que eliminan este problema.

La falla por efecto del sismo actuando sobre la masa misma del muro en dirección normal en su plano ocurre con frecuencia en bardas y muros pesados no restringidos en su extremo superior. Es importantes por lo tanto proporcionar un anclaje apropiado a la cimentación y elementos verticales resistentes. En muros apoyados en sus cuatro extremos, la falla por empuje normal al plano es poco frecuente, pero puede presentarse si se emplean morteros muy pobres (por ejemplo, los morteros a base de lodo para pegar adobes) o si se llenan solo parcialmente las juntas (como es usual en algunos lugares para bloques de concreto).

La presencia de aberturas en los muros provoca concentraciones de esfuerzos que favorecen la formación de las grietas diagonales. Es conveniente que exista un refuerzo continuo en la periferia de los huecos.

Debe evitarse el empleo de piezas con altos porcentajes de huecos y paredes delgadas porque esto propicia fallas frágiles y deterioros graves y muy rápidos.

5.2 Nuevas formas constructivas para la mampostería

Se han desarrollado recientemente, o están en la etapa de desarrollo, nuevas técnicas para la construcción y refuerzo de los muros que presentan algunas ventajas sobre las tradicionales. En algunos casos se trata de sistemas radicalmente diferentes a los usuales, en otros, de pequeñas modificaciones que pretenden mejorar el comportamiento estructural de los muros. Algunas de las alternativas más interesantes se describen a continuación.

Refuerzos especiales en la mampostería convencional. Con el fin de mejorar la ductilidad de los muros y reducir el deterioro de su rigidez y resistencia ante el efecto de cargas alternadas se están estudiando detalles de refuerzo aplicables ya sea a muros confinados con castillos o a muros con refuerzo interior o a ambos.

La adición de barras de refuerzo de pequeño diámetro ($\phi = 4\text{mm}$) y de alta resistencia en las juntas horizontales aumenta ligeramente la resistencia, restringe la propagación del agrietamiento del muro y reduce el deterioro ante la repetición de cargas. Este refuerzo puede colocarse también en muros de piezas macizas con castillos, produciendo una distribución más uniforme de los esfuerzos cortantes en toda la longitud del muro y evitando las altas concentraciones de esfuerzos que se producen en los extremos de los castillos cuando el muro se agrieta diagonalmente. Cuando no se coloque este refuerzo en las juntas, resulta muy conveniente que los castillos tengan refuerzo especial en sus extremos para evitar su falla por cortantes después de que el muro se

agrieta diagonalmente. La fig 13 muestra una forma en que puede proporcionarse este refuerzo.

En muros con refuerzo interior también resulta muy conveniente confinar el refuerzo vertical en los extremos de los muros, ligando por medio de estribos, placas o mallas, como se muestra también en la fig 13.

Mampostería con junta seca y con refuerzo en las caras exteriores. La mampostería con junta seca consiste en colocar las piezas sin mortero en las juntas, formando el muro por la simple sobreposición de las piezas. La liga estructural del muro puede lograrse mediante el empleo de piezas machihembradas en las que se produzca un anclaje mecánico de las piezas, o mediante un aplanado en las dos caras del muro que proporcione continuidad al conjunto. La principal ventaja que se aduce para estos procedimientos es la rapidez de la construcción.

En lo que respecta al comportamiento sísmico para la mampostería de piezas machihembradas no se cuenta con información experimental. Para asegurar que se desarrolle la trabazón mecánica parece necesario que los muros estén confinados por dadas y castillos, lo cual elimina en parte las ventajas de la rapidez de construcción. En este procedimiento se requiere que las piezas tengan dimensiones muy uniformes para poder construir el muro a plomo y a nivel sin la ayuda de las juntas de mortero que absorben las diferencias geométricas. Se requiere además que las piezas tengan buena estabilidad volumétrica. Se han empleado para este procedimiento piezas de suelo-cemento, de concreto ligero y de barro macizas o huecas. En la fig 14 se muestran algunas de las formas propuestas. Las piezas huecas machihembradas permiten la colocación de refuerzo en los huecos verticales, lo cual aunado a la trabazón mecánica de las piezas posiblemente dé lugar a un sistema constructivo conve-

niente en zonas sísmicas. Se requiere, sin embargo, estudios adicionales para encontrar las formas, materiales y procedimientos constructivos convenientes para las piezas y para comprobar experimentalmente el comportamiento sísmico. Desde el punto de vista del comportamiento sísmico parece conveniente, y amerita estudio, el empleo de piezas machihembradas con junta de mortero, con lo cual al anclaje mecánico de las piezas se suma a la adherencia del mortero para mejorar la resistencia al cortante.

Recientemente se ha introducido comercialmente un mortero a base de cemento, aditivos que proporcionan alta adhesividad y fibra de vidrio, el cual colocado como aplanado en muros con junta seca, les proporciona una alta resistencia en tensión. Se han realizado diversos ensayos (ref 7) para estudiar el comportamiento estructural de este material, aplicado principalmente a muros de bloque de concreto. Se ha observado que, con respecto a la de un muro del mismo material juntado con mortero, la resistencia a carga axial de los muros así contruidos es ligeramente menor, la resistencia a cargas normales al plano del muro es varias veces superior, la resistencia a fuerza cortante es ligeramente mayor y la ductilidad es mayor para las mismas condiciones de confinamiento. Si se coloca algún refuerzo interior en los huecos extremos para proporcionar liga entre los muros y para mejorar la ductilidad, se considera que este procedimiento da lugar a una seguridad aceptable contra sismo en construcciones de uno a dos niveles. El costo del producto, patentado, para el aplanado es relativamente alto; sin embargo, se requieren espesores muy pequeños para los aplanados (3mm). Se afirma que el costo total es competitivo con el de un muro convencional con aplanado de yeso en ambas caras.

Parece prometedor el estudio del empleo de otros materiales para proporcionar al muro continuidad y resistencia en tensión por medio de un aplanado, aplicado ya sea a las piezas colocadas con mortero o con junta seca. El uso de fibras minerales o vegetales (henequén, bambú, etc) más económicos que las de

vidrio y la sustitución del cemento por el azufre son alternativas que se han sugerido pero que no han sido suficientemente estudiadas.

Un procedimiento de este tipo que ha sido ampliamente usado y que resulta muy eficiente es el de reforzar los muros con una malla de acero (electrosoldada o tela de gallinero) anclada perfectamente al muro y recubierta por un aplanado de mortero de cemento. Este procedimiento se ha empleado esencialmente para refuerzo de muros agrietados.

Mampostería con morteros de alta adherencia. Cuando se emplean piezas de buena calidad (tabiques extruidos y bloque de concreto tipo pesado) la resistencia al cortante del muro está regida por la adherencia entre el mortero y las piezas en las juntas; si se mejora dicha adherencia se puede alcanzar la máxima resistencia del muro que está regida por la falla en tensión de las piezas.

Se han estudiado diversos aditivos para el mortero a base principalmente de resinas epóxicas y se han obtenido incrementos muy sustanciales en la adherencia. En algunos países estos morteros de alta adherencia se producen comercialmente, pero su empleo aumenta radicalmente el costo de los muros.

Mampostería postensada. La capacidad de carga de muros de mampostería está limitada por su baja resistencia a esfuerzos de tensión producidos por flexión o fuerzas cortantes. La resistencia a estos efectos puede mejorarse sustancialmente si se introducen en los muros esfuerzos de compresión mediante técnicas de postensado. Aunque el postensado reduce la capacidad útil de los muros a carga axial, esta rara vez es crítica en zonas sísmicas y normalmente son mucho más importante las ventajas que el presfuerzo proporciona,

que son las siguientes: se evita el agrietamiento por flexión en muros, se incrementa la resistencia a fuerza cortante porque se reducen los esfuerzos de tensión diagonal y se logra una distribución de carga más uniforme en la cimentación. El postensado ha sido poco usado hasta la fecha principalmente por el desconocimiento de las pérdidas de presfuerzo que se pueden tener y por las dificultades del procedimiento.

Algunos ensayos realizados en el Instituto de Ingeniería, ref 8, han demostrado que las pérdidas de presfuerzo son del mismo orden de las que se obtienen en estructuras de concreto (entre 10 y 20%) y son menores en piezas de barro que en bloques de concreto, que deben evitarse los sistemas de anclaje a base de cuñas y que resulta conveniente el empleo de un sistema de postensado como el mostrado en la fig 15 en el que los cables pueden tensarse en etapas de acuerdo con el proceso constructivo, reduciendo así, o eliminando, las pérdidas de presfuerzo.

5.3 Reparación y refuerzo de la mampostería

Cuando una construcción ha sufrido daño por efecto de un sismo no es suficiente normalmente con repararla (reintegrar su resistencia original) sino que es necesario reforzarla, o sea incrementar su resistencia con respecto a la que tenía antes de la ocurrencia del daño, para que este no ocurra nuevamente si se presenta la misma sollicitación.

Los procedimientos de refuerzo implican casi siempre una restructuración de la construcción mediante la adición de nuevos elementos resistentes, o la rigidización, el confinamiento, el anclaje y el refuerzo de los elementos existentes. En general hay que hacer que la estructura cumpla con los requisitos descritos en los capítulos anteriores. El refuerzo de construcciones de mampostería implica operaciones bastante laboriosas como el colado de dalas y cas

do actual de conocimientos acerca del diseño de mampostería ante diversas sollicitaciones de carga ha avanzado notablemente.

Para el caso de flexocompresión se pueden elaborar diagramas de interacción que se ha visto experimentalmente dan valores acertados del comportamiento de la mampostería.

Las estructuras rígidas, como las mamposterías, son más sensibles a los efectos producidos por un sismo; sin embargo, el criterio elástico que se ha estado empleando y que consiste en diseñar la mampostería para que resista un sismo intenso sin que esta sufra daño es irracional. La tendencia actual del diseño sísmico de mamposterías debe ser el diseñar la estructura para soportar sin sufrir daño en sismo moderado y resistir sin llegar al colapso para un movimiento intenso aprovechando así el comportamiento inelástico de la mampostería reforzada.

Para este criterio de diseño las estructuras dúctiles son las más adecuadas; se puede diseñar una mampostería suficientemente dúctil después de agrietamiento suponiendo al muro como un voladizo y diseñado como viga mediante una teoría de resistencia última similar a la del concreto reforzado, asegurando al mismo tiempo que no se exceda de la resistencia al corte o tensión diagonal de la mampostería. Es implícito que se tendría que limitar la cantidad de acero de refuerzo para evitar una falla frágil al igual que en flexión en concreto.

Una vez reforzado convenientemente por flexión, un muro debe ser capaz de resistir la fuerza cortante con muy poco daño siendo ahora representativo el estado de compresión diagonal. Por este estado de carga se pretende que de la prueba en muretes se obtenga el índice de resistencia de la mampostería que forma al muro hasta el agrietamiento; asimismo se puede valorar el

efecto de la carga vertical del refuerzo interior, y en forma indirecta la contribución del aplanado en el muro.

Es conveniente que los reglamentos de construcción contemplen la idea de que la mampostería convenientemente reforzada tiene comportamiento inelástico, con la finalidad de aumentar el factor de reducción por ductilidad de este tipo de estructuras; esto porque el actual Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal es más estricto que el anterior en cuanto a los requisitos de diseño sísmico para construcciones de mampostería. Las fuerzas sísmicas de diseño se hacen depender de la ductilidad de los sistemas estructurales y, como los distintos sistemas a base de muros de mampostería tradicionales son poco dúctiles, deben diseñarse para fuerzas mucho mayores que las que corresponden, por ejemplo, a una estructura a base de marcos de concreto. Las fuerzas de diseño que se especifican en la nueva versión son en algunos casos hasta dos veces mayores que los que se empleaban con el reglamento anterior. Por otra parte, los esfuerzos resistentes de diseño que se han deducido de la información experimental, son más bajos para algunos materiales que los que se emplean usualmente.

Lo anterior va a hacer más crítica la construcción de edificios de varios niveles a base de muros de mampostería, obligando a proyectos con una mayor densidad de muros, al empleo de materiales de resistencia mayor y más controlada y a procedimientos de refuerzo que proporcionen mayor resistencia y ductilidad. Con estas precauciones se considera que es posible seguir construyendo, en forma segura y económica, edificios de habitación a base de muros de carga de mampostería ya sea confinada o reforzada interiormente.

Un problema de la construcción en mampostería muy distinto a los tratados hasta aquí es el de la vivienda rural. La mayor parte de daños materiales y pérdi-

das de vidas a raíz de temblores se debe al colapso de construcciones de vivienda de bajo costo. En estas construcciones se emplean materiales de baja resistencia o que se deterioran rápidamente con el tiempo. Se usan además -- procedimientos constructivos que no permiten una buena liga de los muros entre sí y con el techo. Afortunadamente, también a este problema se le ha encontrado solución favorable (ver ref 1).

REFERENCIAS

1. Hernández, O. et.al. "Refuerzo de vivienda rural en zonas sísmicas. Estudios experimentales", Instituto de Ingeniería, UNAM, en prensa (1981)
2. Priestley, H., Bridgeman, D.O, "Seismic resistance of brick masonry walls", Bulletin New Zealand Society for Earthquake Engineering, Vol 7, No 4 (dic 1974)
3. William, D., Scrivener, J., "Response of reinforced masonry shear walls to static and dynamic cyclic loading", Proc. 5WCEE. Roma (jun 1973).
4. Mell, R., "Comportamiento sísmico de muros de mampostería", Instituto de Ingeniería, UNAM, Informe No 352 (abril 1975)
5. Hernández, O. y Mell, R., "Modalidades de refuerzo para mejorar el comportamiento sísmico de muros de mampostería", Instituto de Ingeniería, UNAM, Informe 382 (dic 1976)
6. "Diseño y construcción de estructuras de mampostería, normas técnicas complementarias del Reglamento de construcciones para el Distrito Federal". Instituto de Ingeniería UNAM, Informe 403 (jul 1977)
7. Hernández, O., "Mampostería de bloque unida con mortero a base de fibra de vidrio. Comportamiento y diseño", Instituto de Ingeniería, UNAM, Informe 394 (jun 1977)
8. Hernández, O. y Aguilar, H., "Deformaciones diferidas en mamposterías postensadas. Recomendaciones preliminares de diseño", Instituto de Ingeniería, UNAM, en prensa (1981)

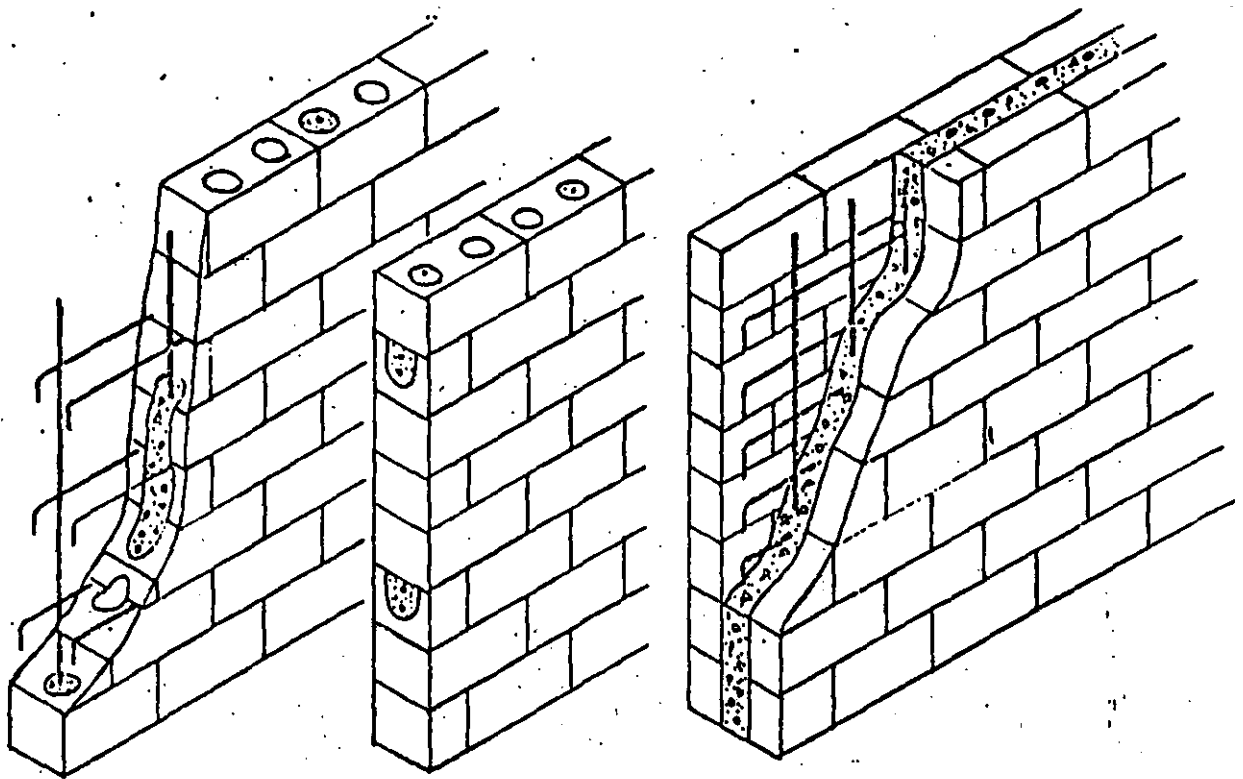


Fig1 Diferentes formas de colocar refuerzo interior

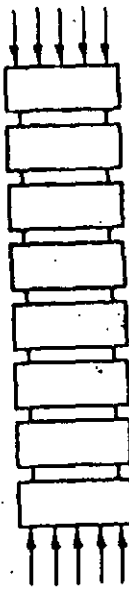


Fig 2 Ensayo de compresión en pilo

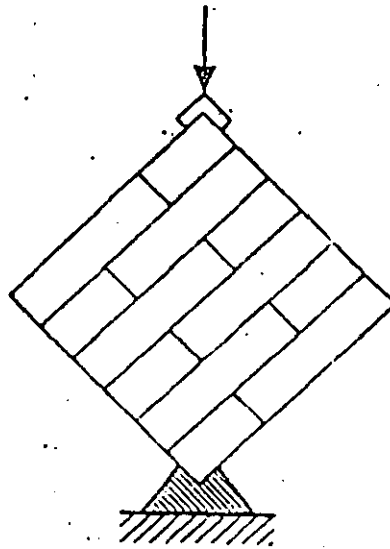


Fig 3 Ensaye de compresión diagonal

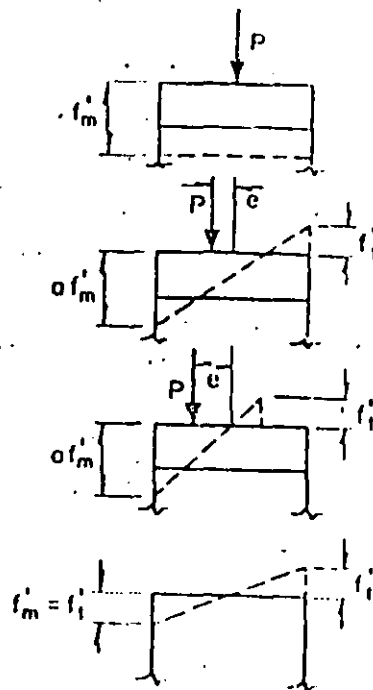


Fig 4 Distintas distribuciones de esfuerzos para carga axial y flexión

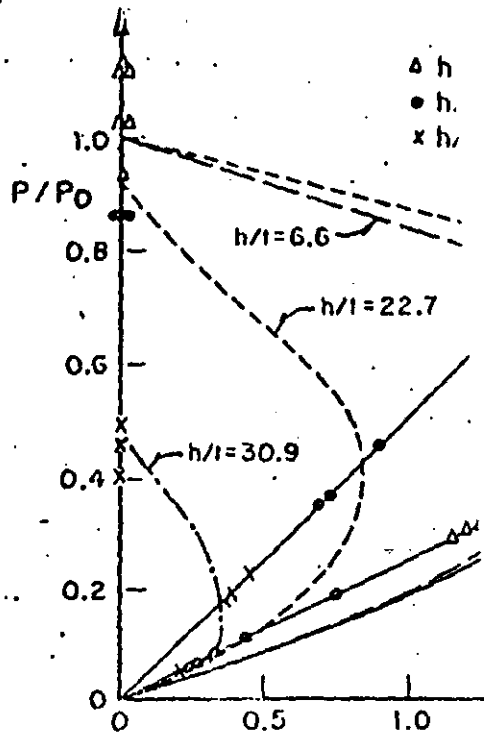
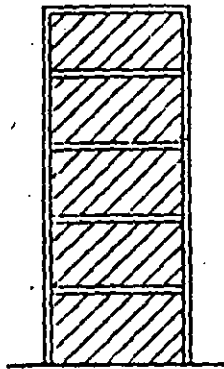


Fig 5 Diagrama de interacción en la relación de esbeltez



a) de carga

Fig 6 Estructuración a

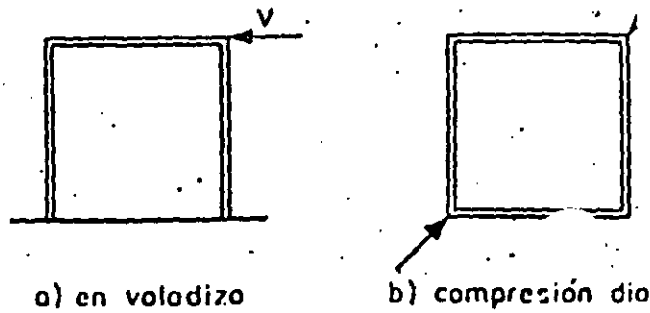


Fig 7 Diversas formas de ensc

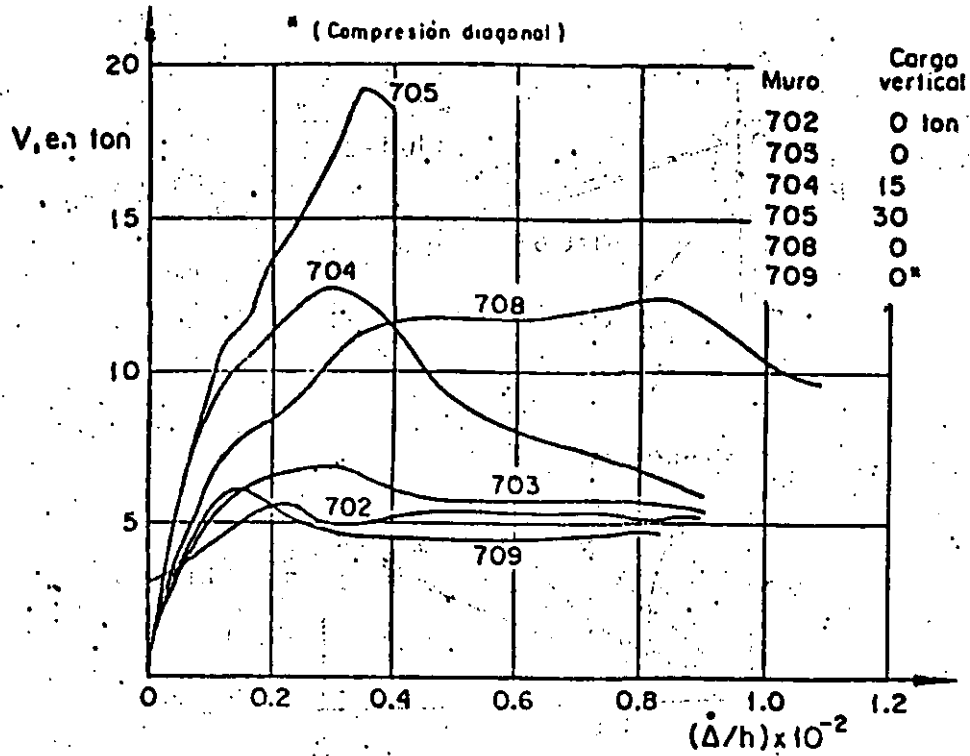
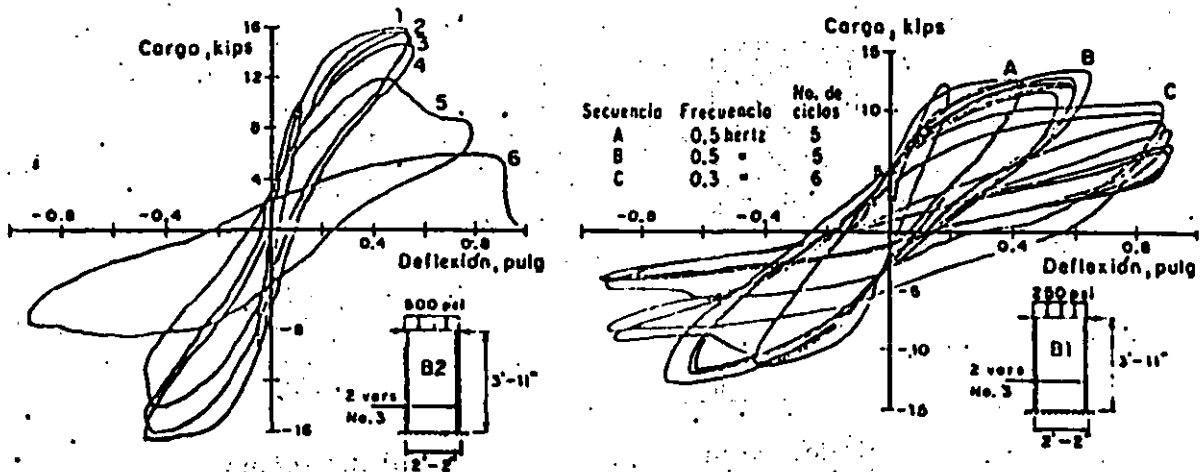
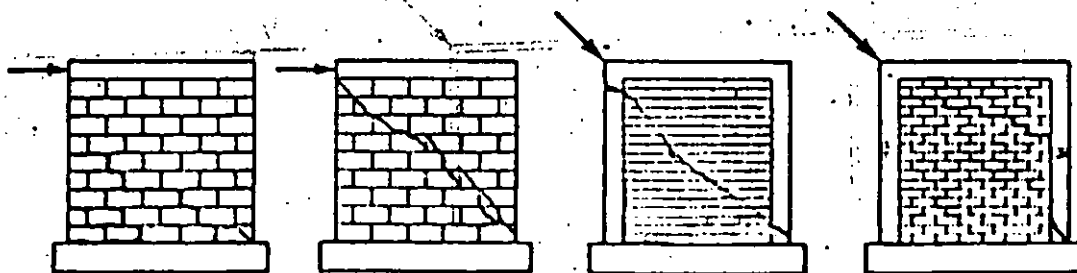


Fig-8 Ensayes a carga estática



a) Cargas alternadas b) Cargas dinámicas

Fig 9 Curvas carga deformación



a) Flexión b) Tensión diagonal (refuerzo interior) c) Tensión diagonal d) Cortante

Fig 10 Fallas típicas de muros

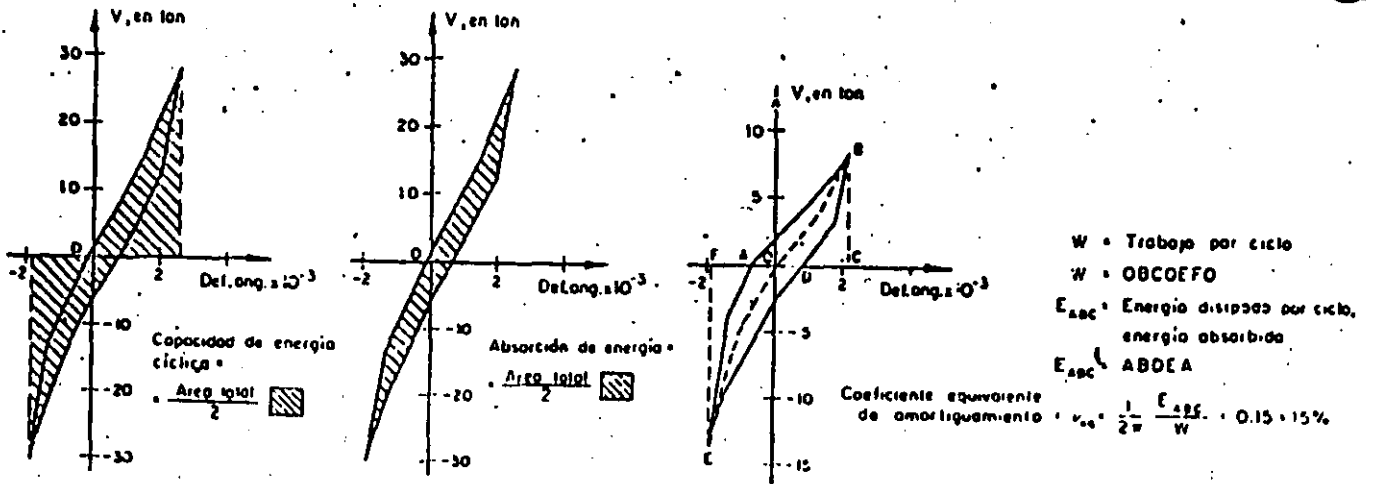


Fig 11 Propiedades de muros de mampostería ante alternación de cargas

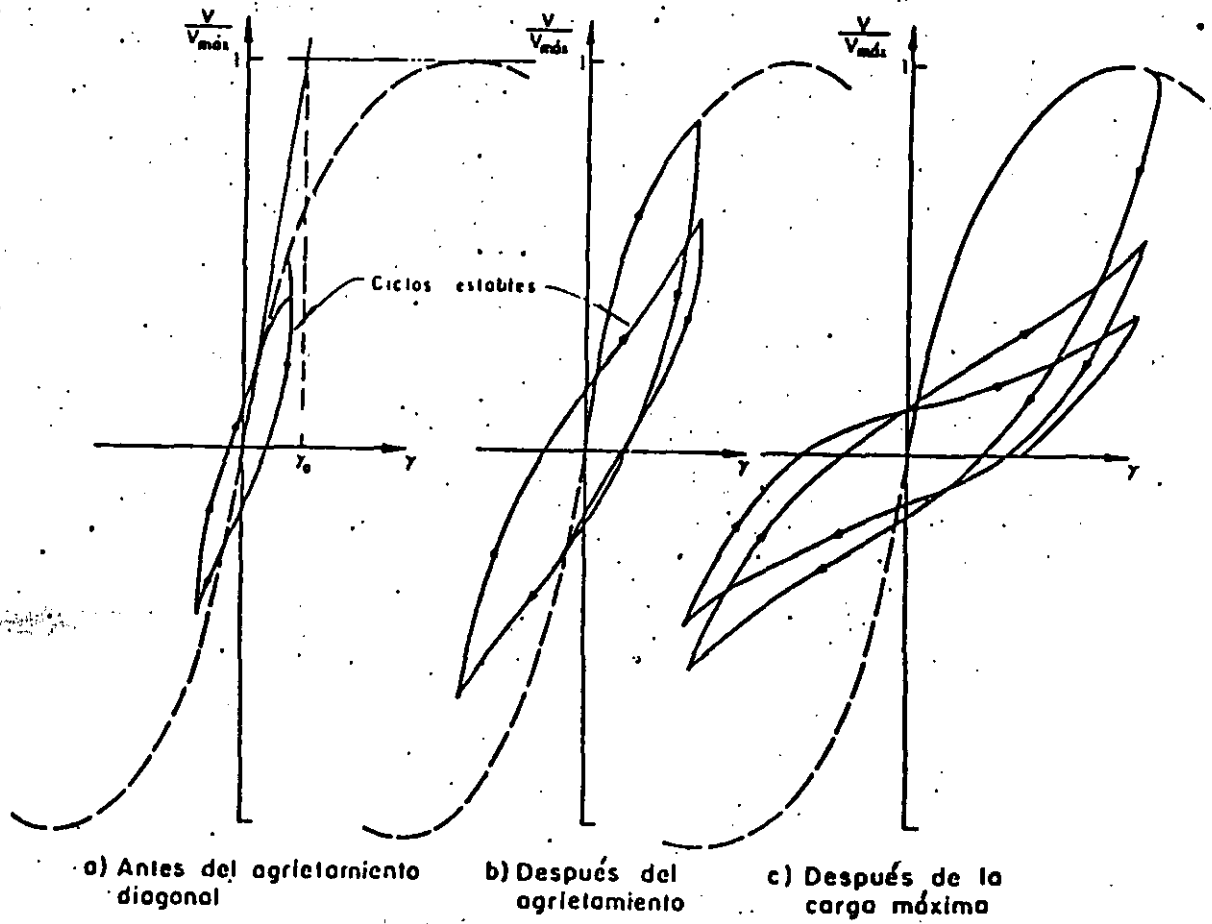
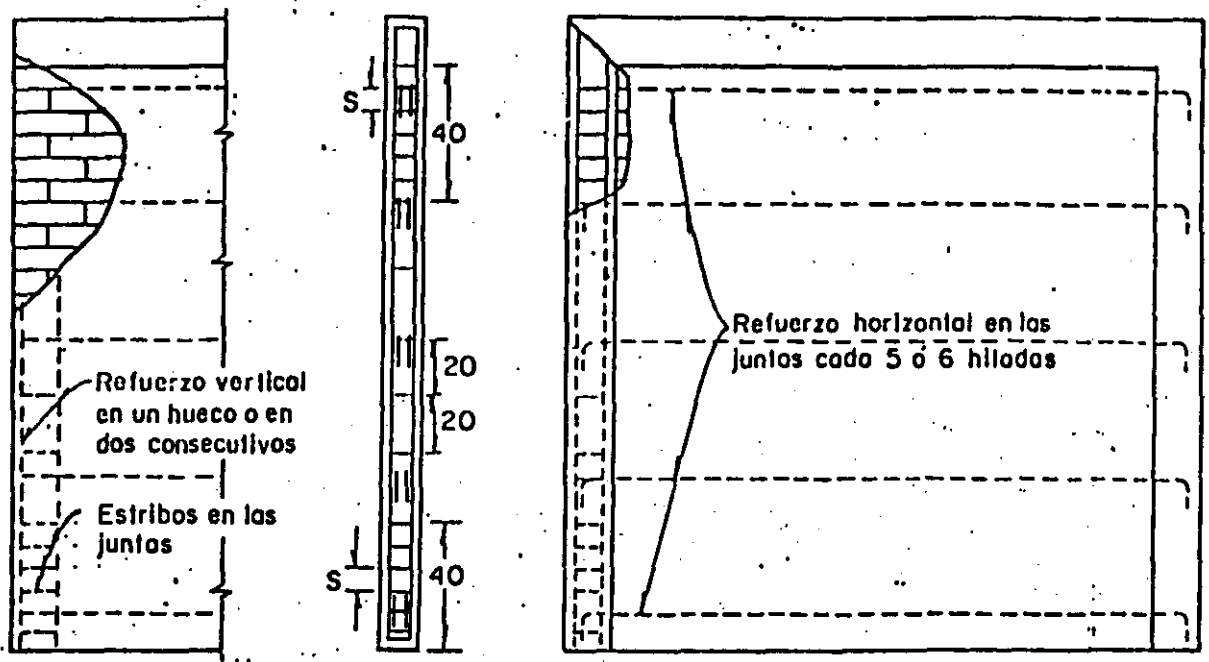


Fig 12 Deterioro del muro

Dimensiones en cm



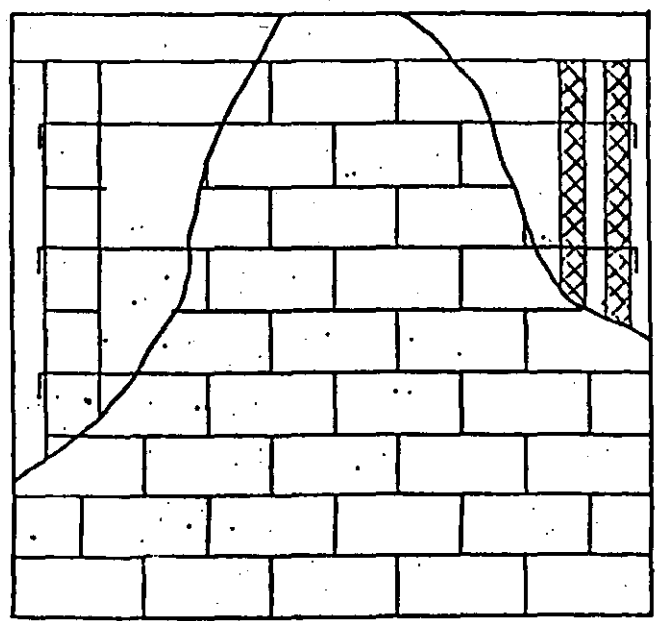
Con refuerzo interior

Confinado con dolas y castillos

Muros de tabique extruído

Variantes :

- Con refuerzo horizontal cada 2 hiladas o sin el
- Refuerzo vertical en un hueco o en dos consecutivos con estribos o cada hilada
- Dos huecos consecutivos confinados con malla de metal desplegado
- Castillo Integral



Muros de bloques de concreto

Fig 13. Detalles generales de refuerzo

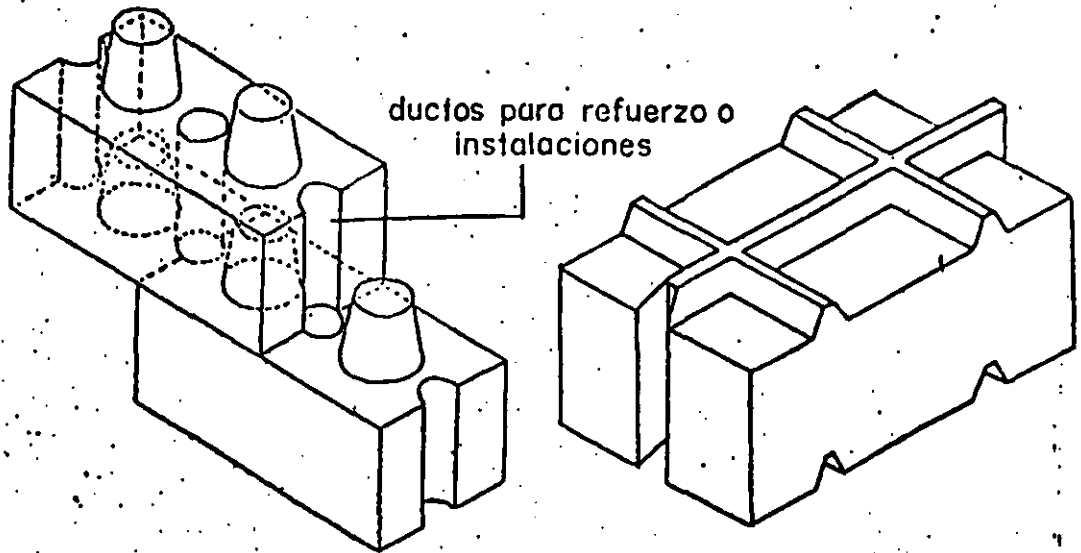


Fig 14 Piezas machiembradas

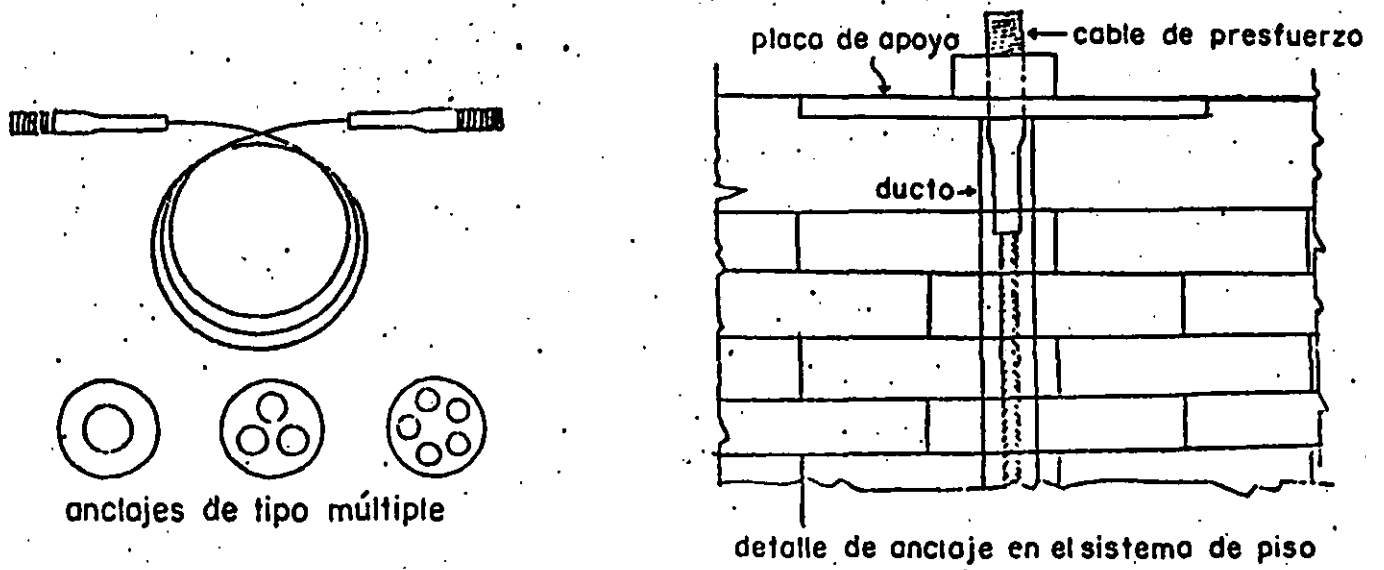


Fig.15 Aplicación del sistema de postensado RAMSA en mampostería.

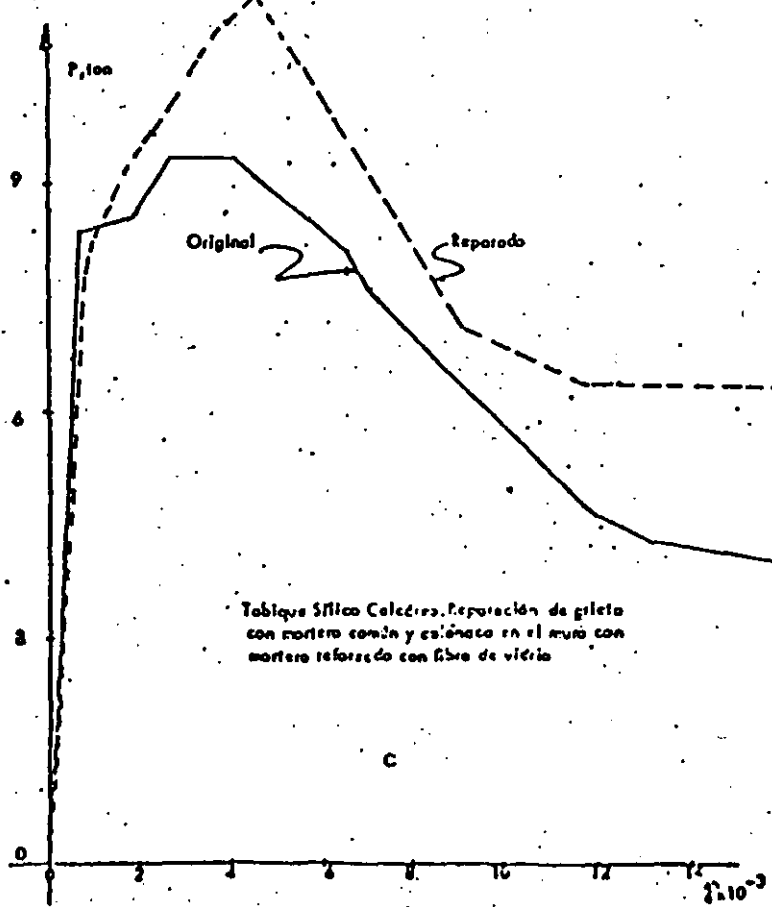
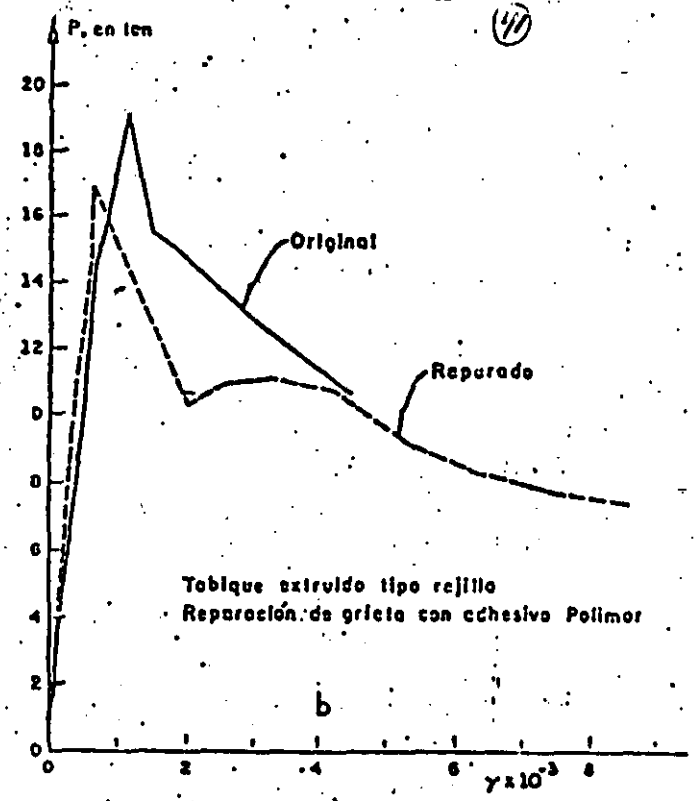
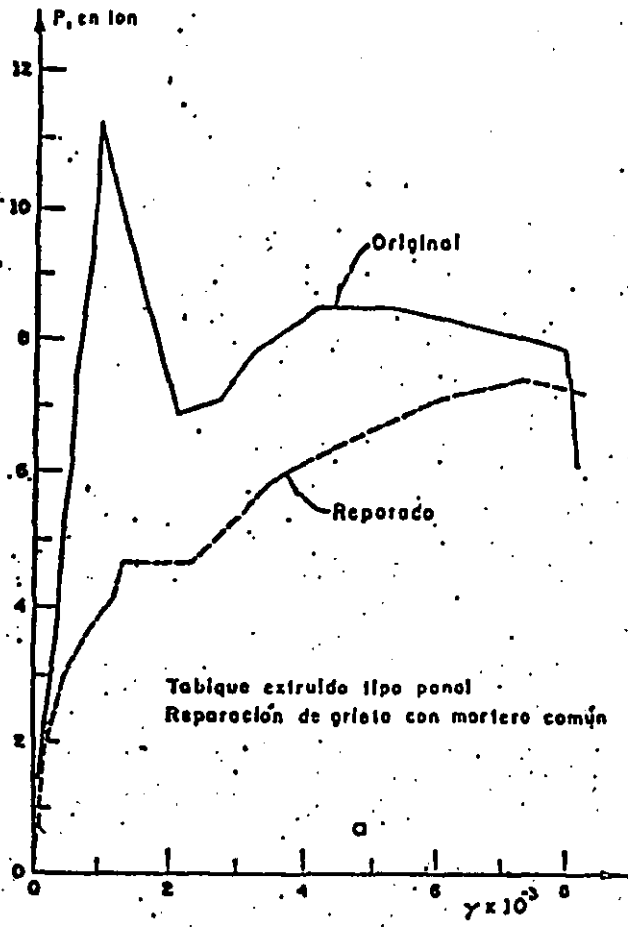


Fig 16 Eficiencia de diferentes formas de reparación de muros

No se ha incluido en ningún reglamento un procedimiento para calcular explícitamente la contribución del refuerzo a la resistencia por considerar que éste solo actúa cuando la mampostería se ha agrietado. Después del agrietamiento, el refuerzo deberá ser capaz de resistir la fuerza cortante total en el tablero; un procedimiento que se ha observado proporciona buena aproximación para calcular la capacidad del muro después de agrietado es el que a continuación se menciona.

Para calcular la resistencia del muro después de agrietado se harán las siguientes suposiciones:

- 1) El refuerzo del muro funciona una vez que éste se agrieta.
- 2) La grieta es única.
- 3) La resistencia a fuerzas cortantes va a ser proporcionada por el acero horizontal, V_h , los estribos en los castillos, V_{cast} , y la fricción desarrollada en la grieta, V_f .

Con las suposiciones anteriores, la resistencia del muro después de agrietado estará dada por la siguiente expresión

$$V_R = V_h + V_{cast} + V_f$$

sin embargo, debido a que no es posible que se llegue a desarrollar totalmente la capacidad del acero de refuerzo por el deterioro progresivo que sufre el muro ante las alternaciones de esfuerzos, y a que se introducen esfuerzos por flexión en las barras de refuerzo en adición a las de tensión, la fórmula anterior puede escribirse en la siguiente forma:

$$V_R = K (V_h + V_{cast}) + v_f A_T$$

donde

- v_f es el refuerzo promedio que puede desarrollarse por fricción y
- A_T el área transversal bruta del muro
- K la constante toma en cuenta lo expresado en el párrafo anterior.

La contribución de la fricción en la resistencia se supondrá independiente del tipo de material, mortero y refuerzo que forman el muro.

La constante K y el esfuerzo debido a la fricción v_f se determinaron a partir de los datos experimentales, resultando

$$V_R = 0.34 (V_h + V_{\text{cast}}) + A_T \quad (1)$$

donde

$V_h = (A_{sh}/st) f_y A_T$ A_{sh} es el área de acero horizontal colocado a una separación s en el espesor t del muro; f_y es el esfuerzo de fluencia y A_T el área bruta de la sección transversal del muro.

V_{cast} Capacidad del castillo, interior o exterior, para resistir cortante; es igual a la suma de lo que resiste el concreto más la contribución del refuerzo transversal (estribos). La capacidad del concreto es igual a $A_c f'_c$, donde A_c es el área del castillo y f'_c la resistencia a compresión del concreto. La contribución de los estribos se calcula en igual forma que para vigas. Hay que tomar en consideración a todos los castillos que confinan al muro y que entran en una longitud menor que la altura del muro.

se observa que la fricción contribuye a la resistencia con un esfuerzo promedio de 1 kg/cm^2 , aproximadamente. El coeficiente de variación de la relación de valores calculadas con la expresión anterior, a valores experimentales resultó del 10 por ciento.

La anterior expresión permite diseñar el refuerzo de un muro para que sea capaz de soportar la fuerza cortante de diseño.

A manera de ejemplo se calculará el refuerzo necesario, horizontal y en los castillos, para que bajo alternaciones de esfuerzos un muro sea capaz de resistir una fuerza cortante igual a la que indujo el agrietamiento; suponiendo que este esfuerzo de agrietamiento sea de 2.3 kg/cm^2 , y el muro tenga un área de 2290 cm^2 , la fuerza cortante actuante que lo produjo es

$$V = 2.3 \times 2290 = 5270 \text{ kg}$$

Esta fuerza es la que tiene que resistir el refuerzo del muro. Se tienen tres alternativas de refuerzo: usar solo refuerzo en los castillos, usar solo refuerzo horizontal, o emplear una combinación de ambos refuerzos. Se resolverán a continuación las tres alternativas, en ellas se considera que las dimensiones de los castillos son 12 x 14 cm; se utilizará para los estribos alambraón No. 2 con $f_y = 2500 \text{ kg/cm}^2$ y se despreciará la contribución del concreto a esfuerzos cortantes; como refuerzo horizontal se supondrá que se emplean varillas de 5/32 pulg de diámetro y $f_y = 6000 \text{ kg/cm}^2$.

a) Solo refuerzo en los castillos; de la expresión 1

$$V_R = 5270 = 0.34 (V_{\text{cast}}) + A$$

$$V_{\text{cast}} = 8760 \text{ kg}$$

Cada extremo del castillo deberá ser diseñado para resistir una fuerza cortante de

$$V'_{\text{cast}} = 8760/2 = 4380 \text{ kg}$$

la separación de los estribos es

$$S = \frac{2 \times 0.32 \times 2500 \times 12}{4382} = 4.4 \text{ cm}$$

$$S = 10 \text{ cm si } f_y = 6000 \text{ kg/cm}^2$$

Estos estribos se colocarán en las partes extremas de los castillos en una longitud de 40 cm a partir del vértice interior. En los castillos que confinan al muro puede aceptarse una separación de los estribos mayor que $d/2$ pero menor que d ; esto debido al tipo y trayectoria de las grietas que se presentan en los castillos.

b) Solo refuerzo horizontal

$$V_h = 8760 \text{ kg} = \frac{A_{sh}}{s} f_y A_T$$

$$A_{sh} = 8760 \frac{st}{f_y A_t}$$

suponiendo una separación de 30 cm (a cada 5 hiladas) y $t = 12$ cm

$$A_s = 0.23 \text{ cm}^2;$$

$$2 \text{ varillas } 5/32 \text{ pulg} = 0.24 \text{ cm}^2$$

el muro se reforzaría con 2 varillas 5/32 cada 5 hiladas

c) Combinando refuerzo en los castillos con horizontal

Aplicando la expresión 1 resulta

$$V_h + V_{cast} = 8760 \text{ kg}$$

suponiendo que cada uno de los refuerzos deba resistir la mitad de la carga se determina, siguiendo pasos similares a los incisos a y b, los estribos No. 2 deberán ir espaciados a cada 8.5 cm y el refuerzo horizontal consistirá en 2 varillas de 5/32 pulg cada 9 hiladas (o una varilla cada 4 hiladas).

En el caso de un muro de tabique rojo de 4 m de longitud, el refuerzo necesario para sostener la fuerza cortante resistente a un esfuerzo $v^* = 3 \text{ kg/cm}^2$; consistiría en estribos de alambroón No. 2 espaciados a cada 2.5 cm, 7 cm en caso de usar alambroón con $f_y = 6000 \text{ kg/cm}^2$; otra opción es reforzar el muro con estribos en los castillos a cada 7 cm y añadir 2 varillas 5/32 pulg (alta resistencia) cada 8 hiladas.

Si las piezas que forman el muro son huecas, se pide en diversos reglamentos colocar una cierta cantidad mínima de refuerzo interior. Generalmente se establece (probablemente sin una base sólida, sino más bien -- por extrapolación de resultados en muros de concreto) que la cuantía de refuerzo vertical y horizontal del muro no será menor de 0.2 por ciento, debiendo colocar una tercera parte de esta en cualquier dirección. Esta última cantidad, colocada como refuerzo horizontal representa una cuantía 25 por ciento mayor a la que necesitaría el muro analizado en el pá

rafo anterior, suponiendo que está formado de piezas huecas y reforzado solo con acero horizontal. En general, se observa que dicha cantidad mínima de refuerzo horizontal está en exceso de la necesaria para desarrollar la capacidad del muro; sería necesario que la mampostería de un muro de las mismas características anteriores tuviera un esfuerzo nominal de diseño, v^* , igual a 3.4 kg/cm^2 , para que con solo el refuerzo horizontal fuera capaz de sostener la fuerza cortante resistente una vez que el muro se agrieta. Con lo discutido anteriormente se quiere hacer ver que la especificación sobre cuantía mínima de refuerzo para mampostería de piezas huecas está en exceso para la mayoría de los materiales a los que hacen mención los reglamentos mencionados; sin embargo, a falta de mayor información y estudio sobre el particular se sugiere respetar dicha disposición.

5.2.3 Resistencia a flexocompresión en el plano del muro

Es importante recordar que las cargas laterales producen no solo fuerzas cortantes en los muros, sino también momentos flexionantes que frecuentemente requieren de refuerzo especial por flexión en los extremos del muro.

La resistencia a flexión y a flexocompresión en el plano del muro se calculará, para muros sin refuerzo, según la teoría de resistencia de materiales suponiendo una distribución lineal de los esfuerzos en la mampostería. Se considerará que la mampostería no resiste tensiones y que la falla ocurre cuando aparece en la sección crítica un esfuerzo de compresión igual a f_m^* .

La capacidad a flexión o a flexocompresión en el plano de un muro con refuerzo interior o exterior se calculará con un método de diseño basado en las hipótesis vistas para el caso de carga vertical excéntrica.

Para muros reforzados con barras colocadas simétricamente en sus extremos las fórmulas simplificadas siguientes dan valores suficientemente aproximados y conservadores del momento resistente de diseño.

En caso simple, el momento resistente se calculará como

donde

A_s es el área de acero colocada en los extremos del muro
 d' la distancia entre los centroides del acero colocado en ambos extremos del muro

Cuando exista carga axial sobre el muro, el momento de la sección se modificará de acuerdo con la ecuación.

$$M_R = M_0 + 0.30 P_u d \quad ; \text{ si } P_u \leq \frac{P_R}{3}$$

$$M_R = (1.5 M_0 + 0.15 P_R d) \left(1 - \frac{P_u}{P_R}\right); \text{ si } P_u > \frac{P_R}{3}$$

donde

P_u es la carga axial de diseño total sobre el muro, que se considerará positiva si es de compresión.

d el peralte efectivo del refuerzo de tensión

P_R la resistencia a compresión axial

F_R en este caso igual a 0.6

Estas fórmulas simplificadas se deducen al considerar que el diagrama de interacción en flexocompresión (representación gráfica de las combinaciones de carga axial y momento flexionante que ocasiona la falla del elemento) está formado por dos tramos rectos.

REPARACION DE DAÑOS ESTRUCTURALES ELEMENTOS DE MAMPOSTERIA

Oscar Hernández B^{I,II}

INTRODUCCION

Dada la gran actividad sísmica que se presenta en México, se considera de gran importancia conocer el efecto de los sismos sobre las estructuras, los daños que les producen y la forma de lograr que éstas recuperen o superen sus características de resistencia y capacidad de deformación.

Al examinar los daños que ocasiona un sismo se encuentra que en general éstos pueden ser de dos tipos: estructurales y no estructurales; éstos últimos, como agrietamientos de muros de relleno y caída de acabados, son arreglados en forma rápida aunque en ocasiones a costos elevados.

Los daños estructurales corresponden a una categoría que es mucho más importante que la otra; en este caso es necesario rehabilitar la estructura tomando en cuenta diversos aspectos cuyo análisis y descripción constituye el objetivo del presente trabajo. Entre los aspectos que se considerarán están la identificación de las fallas que se producen en estructuras convencionales y las causas que las originan, la prescripción de métodos para evitarlas y los procedimientos para reparar y reforzar elementos estructurales y estructuras completas. Lo anterior se efectuará para estructuras de mampostería.

EVALUACION DEL DAÑO EN ESTRUCTURAS

Aspectos generales. A pesar de los avances de la ingeniería sísmica, en opinión de muchos investigadores y profesionistas, el diseño y construcción de estructuras resistentes a sismos es parte de un arte y parte ciencia. Un hecho que ha mejorado el juicio de los ingenieros ha sido el observar el comportamiento, bueno o malo, de las estructuras después de que ha ocurrido un sismo; esto ha proporcionado invaluable ayuda para mejorar los códigos y métodos de análisis y dimensionamiento.

Entre los problemas de la ingeniería estructural que constituyen un reto está el definir qué acción debe tomarse cuando una estructura es dañada por un sismo, ya que se tiene que decidir si es susceptible de repararse o si debe condenarse a ser demolida.

En principio, cualquier estructura dañada que permanece en pie es reparable, pero influirán en la decisión de hacerlo aspectos de tipo económico, social y, en algunas circunstancias, aspectos políticos.

La reparación y refuerzo de estructuras es una actividad a la que sólo eventualmente se le ha dado importancia, generalmente después de que un sismo ha ocurrido; en algunos países se legisla acerca de la necesidad de que las estructuras con varios años de uso cumplan con los nuevos códigos de diseño, forzando incluso a realizar el refuerzo de las mismas aun cuando no hayan tenido daños durante temblores previos.

Después de la ocurrencia de un sismo severo, generalmente se procede a hacer una

I Director General, Proyectos Tensión, S.A. de C.V.

II Profesor, División de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, UNAM.

evaluación superficial de los daños y a la reparación de la estructura; en la mayoría de los casos esta reparación consiste en la remoción y sustitución del material dañado, sin realizar estudios acerca de la conveniencia de reestructurar la construcción, dejándola en condiciones precarias ante otro sismo. Por lo anterior, es necesario que se forme mayor conciencia de lo peligroso y anti-económico que resulta proceder en esta manera, y que es necesario entender mejor el porqué de las fallas, la manera de evitarlas y, en su caso, la forma de proceder a reparar el daño.

Procedimiento para evaluar el daño. El problema principal radica en establecer la magnitud del daño en la estructura y decidir si esta debe demolerse o repararse, y en este último caso, recomendar el procedimiento de reparación adecuado.

Para tomar esta decisión es necesario que el ingeniero haga uso de sus conocimientos y experiencia en la forma más razonada posible, aún cuando dispone de poco tiempo para hacerlos, porque por motivos económicos y sociales las estructuras tienen que volver a su uso a la brevedad posible.

El problema de diagnóstico y evaluación de los daños consiste en determinar la resistencia de la estructura en una situación actual y revisar si tiene un factor de seguridad adecuado; es decir, si la relación entre su resistencia y la intensidad de las cargas que puedan afectarla es suficientemente grande para cubrir con seguridad la posibilidad de un eventual colapso ante sismos futuros. Para esto, la primera acción a tomar es realizar una inspección detallada de la estructura para localizar los daños estructurales y no estructurales existentes, especificar el tipo de daño y elaborar planos con la información que al respecto se recabe; esto es indispensable para tener una visión de conjunto del comportamiento que tuvo la estructura, con el fin de establecer las causas de los daños.

Como segunda acción a tomar, o en paralelo con la primera, es indispensable analizar los planos estructurales y arquitectónicos de la estructura en su concepción original, con el propósito de determinar su estructuración, dimensiones y refuerzo de los elementos estructurales, localización de elementos no estructurales, propiedades de los materiales, etc., así como también las magnitudes de las cargas vivas y muertas de diseño. Cuando no se cuenta con los planos mencionados (situación muy frecuente), se debe llevar a cabo un levantamiento físico para recabar los datos necesarios incluyendo calas para determinar cantidades de refuerzo existente, así como obtención de muestras de concreto, mampostería y acero de refuerzo para pruebas de laboratorio.

Con lo anterior, se procede al análisis de la estructura en condiciones originales (antes del daño) bajo cargas verticales y horizontales, con el fin de comparar los elementos mecánicos resultantes con los daños observados y registrados en el levantamiento previo y llegar a conclusiones sobre la posible causa de los daños; si esta no es grave y los daños no son de gran magnitud, éstos pueden repararse localmente. Si la causa de los daños es grave, estos son numerosos y de consideración la estructura es insegura y se procede a rediseñarla a la brevedad posible; dejarla tal como está, efectuando únicamente reparaciones locales, es peligroso porque se presentarían daños ante otro movimiento sísmico, posiblemente con mayores consecuencias.

Para este propósito y tomando en cuenta las causas de la falla, hay que procurar un mejor comportamiento de la estructura. Si tenía una excesiva flexibilidad, deben incluirse suficientes elementos resistentes a cargas laterales distribuidos en forma más o menos uniforme para no introducir excentricidades indeseables.

Con la nueva estructuración y secciones propuestas debe efectuarse otro análisis para dimensionar los miembros estructurales adicionales y, si así resulta necesario, proceder al refuerzo de los ya existentes.

Finalmente viene otro aspecto que es difícil de determinar: la eficiencia de la reparación, refuerzo o reestructuración. La manera más conveniente de verificar lo anterior es mediante pruebas de carga, tanto verticales como laterales; desafortunadamente en muchos casos no se cuenta con el sistema para proporcionar cargas laterales de la magnitud deseada, quedando entonces la duda acerca de la eficiencia de los procedimientos utilizados para restaurar o aumentar la resistencia y rigidez.

Una manera de lograr una idea burda acerca de la rigidez es midiendo el periodo de vibración de la estructura para oscilaciones pequeñas; si este periodo disminuye quiere decir, si no se ha incrementado la masa, que se ha aumentado la rigidez lateral de la estructura.

Por todo lo comentado con anterioridad y por las incertidumbres que se tienen durante el proceso de rediseño debe buscarse que se tenga un alto margen de seguridad entre la resistencia calculada y la necesaria según los nuevos análisis.

DAÑOS MAS COMUNES EN ESTRUCTURAS DE MAMPOSTERIA

En esta parte del trabajo se indican los daños más comunes que presentan distintos tipos de construcciones, las causas que los originan y la manera de evitarlos. La forma de reparar esos daños se verá en detalle más adelante, donde se describirán distintos procedimientos que se han estudiado en México.

Mampostería de adobe. El adobe es el material más empleado para los muros en la vivienda rural en México y muchas otras partes del mundo. Las viviendas más comunes se caracterizan por un cuerpo principal de un solo piso, planta rectangular alargada de 30 a 50 m² de área, muros de 3 a 3.5 m de altura con espesores de 40 a 60 cm sin refuerzo, frecuentemente sin muros divisorios, y escasa restricción de la parte superior de los mismos. Todo ello hace que el comportamiento esté regido por la flexión de los muros en dirección normal a su plano.

En la fig la se muestran los sistemas de techos más comunes y en la fig lb la falla característica de estas viviendas.

Al vibrar los muros durante un sismo, se inducen momentos flexionantes críticos en las esquinas superiores de los mismos, los cuales se agrietan progresivamente hacia abajo, de manera que el muro frontal comienza a vibrar como en voladizo, ocurriendo el volteamiento cuando la altura agrietada del muro es suficiente para que la resultante de las fuerzas caiga fuera de la sección del muro. El volteamiento ocurre casi siempre hacia afuera, ayudado por el coque del techo; este modo de falla es el que se ha observado con mayor frecuencia a causa de sismos.

En viviendas en las que la longitud no soportada de muros es pequeña o en las que los techos proporcionan restricción a la flexión, o en las de más de un piso, la falla suele ocurrir por cortante a través de grietas diagonales. Este modo de falla es propiciado con frecuencia por la existencia de aberturas importantes en los muros.

Se ha observado que el colapso se inicia en ocasiones por la caída del techo, ya sea por fallas locales en las conexiones o en la madera misma por encontrarse muy deteriorada, o por deslizamiento de los elementos del techo sobre los muros, a los

que están fijados en forma muy precaria. —

4

Son diversas las soluciones que se han propuesto en la literatura para evitar el daño en viviendas de adobe. Como recomendaciones generales para mejorar el comportamiento sísmico de estas construcciones se pueden mencionar:

1. Hacer una selección cuidadosa de los suelos con que se fabrica el adobe y su mejoramiento con fibras o con aditivos estabilizadores.
2. Reducir la altura de los muros al mínimo admisible para la habitabilidad de la vivienda.
3. Subdividir los espacios interiores mediante muros ligados entre sí con el mejor cuatrapeo posible de las piezas.
4. Evitar techos pesados y estructurar éstos para que tengan rigidez en su plano.

Si se siguieran las recomendaciones anteriores, se aliviarían algunos inconvenientes como son la escasa resistencia en tensión del adobe y la poca adherencia que se logra en las juntas con los morteros de lodo. Sin embargo, aún con adobes de buena calidad, no puede lograrse una buena liga entre los muros transversales, por lo que es probable que los muros fallen por el efecto de fuerzas normales a su plano, ya sea por volteamiento o por fallas locales debidas a los empujes de los elementos de techo. En muchas ocasiones las fallas de estas construcciones aumentan porque el adobe se encuentra muy debilitado por efecto del intemperismo. En consecuencia, una mejora importante en el comportamiento sísmico sólo puede obtenerse por medio de al g ú a refuerzo en el adobe que proporcione una liga adecuada entre los elementos y cierto confinamiento y capacidad de deformación a los muros. La manera como esto puede lograrse se verá más adelante.

Elementos de mampostería de piedras artificiales. Existen diferentes modalidades para construir muros de mampostería, desde la no reforzada hasta las modalidades más conocidas como son la mampostería confinada y la mampostería con refuerzo inte rior.

Las mamposterías de tabique y bloque sin refuerzo han tenido un comportamiento deficiente ante el efecto de sismo o de movimientos de las cimentaciones; adolecen de dos defectos graves: la liga que se logra entre muros transversales por el simple cuatrapeo de las piezas, no es suficiente para impedir el volteamiento de los muros ante empujes en su plano, y la falta de confinamiento y refuerzo hace que pueda ocurrir una falla frágil por el efecto de las cargas en el plano del muro. Su comportamiento sísmico es similar al de las construcciones de adobe.

El comportamiento sísmico de construcciones cuyos muros están confinados con dalas y castillos ha sido definitivamente mejor que al de la mampostería no reforzada. Al estar rodeados por un elemento perimetral de concreto, los muros tienen una ca pacidad de deformación mucho mayor y no fallan bruscamente al agrietarse. Los castillos y dalas permiten realizar además una liga eficaz de los muros entre sí y de estos con los sistemas de piso.

Hay que hacer notar que a pesar de que con este sistema se reduce la probabilidad de un colapso de la construcción, no se evita los agrietamientos diagonales en los muros, ya que la resistencia en tensión diagonal de la mampostería no se incrementa apreciablemente por la presencia de las dalas y castillos.

Para la mampostería con refuerzo interior, tanto el comportamiento sísmico observado en estructuras reales como los ensayos de muros en el laboratorio indican que, si se coloca únicamente refuerzo vertical muy espaciado y no se proporciona refuerzo horizontal, el comportamiento sísmico es deficiente debido a la falla local de las piezas huecas.

Los daños que puede presentar las mamposterías son principalmente debidas al inadecuado refuerzo o liga con los elementos que las confinan, por las torsiones causadas al estructurar en forma deficiente la construcción o por la falla del suelo debida a asentamientos diferenciales, momentos de volteo o a la licuación del suelo.

En términos generales, en la mampostería se pueden presentar tres tipos de fallas: compresión, flexión y cortante. La primera de ellas es muy raro que llegue a ocurrir y por lo tanto no se hablará más de ella; la falla por flexión se identifica por las grietas horizontales que se abren en un extremo del muro sobre las juntas de mortero situadas en la parte inferior, mientras que en el otro extremo del muro ocurre el aplastamiento de las piezas y/o elemento que confina al muro; ocurre una variante de la falla por flexión que se identifica por grietas verticales en la parte inferior del muro, esta se debe básicamente a hundimientos del terreno ocurridos en un lapso considerable de tiempo.

Mucho más frecuente que los dos tipos de falla antes descritos es el debido a fuerzas cortantes producidas ya sea por fuerzas laterales externas (sismo principalmente) o por hundimientos diferenciales del terreno; fácilmente se identifica esta falla porque son grietas diagonales sobre el muro que pueden seguir dos trayectorias: 1) sobre las juntas del mortero, en cuyo caso se dice que es una falla por cortante y 2) sobre piezas y juntas, dando lugar a la denominada falla por tensión diagonal.

En el caso de falla por tensión diagonal prácticamente se puede decir que se ha agotado la resistencia de la mampostería, por lo que de requerirse el reforzamiento de la misma implicará necesariamente el uso de acero de refuerzo o cambiar la mampostería por otra más resistente. No es así el caso cuando se tiene falla por cortante (por las juntas) en donde, como se verá posteriormente, se pueden utilizar otros procedimientos para aumentar su resistencia ante fuerzas cortantes.

PROCEDIMIENTOS DE REPARACION Y REFUERZO

La filosofía de diseño más aceptada establece que para sismos de intensidad moderada se deben diseñar las estructuras para que no presenten daños estructurales, aunque tal vez se tengan algunos daños no estructurales si la construcción es muy flexible; y para el sismo de diseño, la estructura debe quedar en pie aun cuando presente graves daños en sus elementos estructurales. Para sismos de intensidad intermedia la estructura pueda presentar algunos daños estructurales debido a malos detalles constructivos, deficiente calidad de los materiales, etc., surgiendo entonces la necesidad de reparar los daños. Se pueden establecer tres niveles de reparación:

1. Se resanan superficialmente los elementos estructurales. Esto ocurre con frecuencia en construcciones de personas de bajos recursos, o se hace por ignorancia en otros tipos de estructuras; como consecuencia, quedan debilitadas para eventos futuros.

2. La estructura se repara para recuperar su resistencia y rigidez original. Esto generalmente se trata de conseguir mediante la reparación local de los miembros dañados; sin embargo, se ha observado que casi nunca se alcanza, quedando la estructura susceptible de presentar los mismos daños, o más graves, ante sismos de la misma intensidad.
3. Se rediseña la estructura. A este nivel, además de la reparación local se procede a rediseñar la construcción para asegurar su supervivencia para sismos más intensos que el que produjo el daño.

De las alternativas anteriores; la tercera es la más conveniente a seguir, aun cuando la segunda es en ocasiones aceptable, sobre todo cuando están muy localizados los daños; la reparación superficial debe evitarse.

Los procedimientos de reparación y refuerzo que actualmente se emplean son empíricos, ya que han sido desarrollados con base en experiencia acumulada. Cuando se procede sólo a reparar localmente debe quedar muy claro el objetivo a lograr, pero en la mayoría de las ocasiones, se tiene que reestructurar la construcción en vista del comportamiento inadecuado observado para un sismo de menor intensidad al de diseño. En estos casos, el ingeniero depende de los resultados de la inspección, del análisis y, en un alto porcentaje, de su criterio, conocimiento y experiencia para hacer el diagnóstico adecuado.

También es conveniente tener en consideración que existen diversos elementos estructurales que, por su forma o por sus condiciones de sollicitación, pueden presentar falla de tipo frágil; ejemplo de esto lo constituyen las fallas por cortante en muros. En estos casos será necesario que el procedimiento de reparación además de restaurar la resistencia, proporcione capacidad de deformación al miembro estructural y a la estructura.

Cabe decir que los materiales que se utilicen para la reparación deben alcanzar altas resistencias a temprana edad porque en este caso la rapidez de ejecución es muy importante. También es importante mencionar que el sentir general de los expertos en el tema de reparación de estructuras es que la construcción más problemática de rehabilitar es la formada a base de elementos de mampostería, los cuales son capaces de soportar altas cargas laterales, pero tienen poca reserva de resistencia; además, se ha observado que por lo general el costo de su reparación es mayor al de otras construcciones con sistema de estructuración diferente.

Mampostería de piedras artificiales sin refuerzo. En el caso que la estructura dañada presente falla por las juntas puede no ser necesario utilizar refuerzo para aumentar su seguridad a niveles adecuados, a continuación se resumirá un estudio realizado por el autor para tratar de establecer como se puede incrementar la resistencia de este tipo de mampostería.

Se ensayaron diversos tipos de mampostería (piezas y morteros) provocando los tipos de falla típicos ante fuerzas cortantes, después de lo cual se repararon como a continuación se menciona: 1) mediante un aplonado de mortero rico en cemento (1:0:3 cemento, cal, arena); 2) llenado con mortero los huecos de las piezas y 3) combinar los dos procedimientos anteriores. Cabe mencionar que en ningún caso se volvió a pegar las juntas donde el espécimen falló originalmente, sino solo se superpuso las piezas y se aplicó el procedimiento de reparación; lo anterior se hizo para que los resultados obtenidos estuvieran dentro de la seguridad al ser aplicados por lo general se acostumbra "rajuelar" la zona dañada de las mamposterías.

Los especímenes ensayados (muretes) eran de aproximadamente 60 x 60 cm y se les aplicaba una carga en una de sus diagonales, lo que producía una falla de cortante o tensión diagonal en el murete. Las características de las diferentes mamposterías antes y después de reparados se pueden ver en la tabla 1. En dicha tabla solo se presentan los valores medios y sus coeficientes de variación; mientras que en la tabla 2 se muestran los valores mínimos probables que se calcularon con la expresión propuesta por el Reglamento para construcciones del D.D.F., dicha expresión es

$$v^* = \frac{\bar{v}}{1 + 2.5 \text{ C.V.}}$$

donde

v^* valor de diseño que tiene una probabilidad de no ser alcanzado del 2%
 \bar{v} valor medio obtenido del ensaye
 C.V. coeficiente de variación de la muestra

La interpretación de los resultados se hará con base en esta última tabla con la finalidad de tomar en cuenta la variabilidad de los datos y referirse a valores que tengan una probabilidad muy baja de que no se alcancen.

Debido a lo limitado del estudio en cuanto a número de variables: piezas y morteros, la interpretación que se realice deberá tomarse con reserva, y servir únicamente como guía en caso de tratar de extrapolar los resultados del estudio.

Considerando lo anterior, analizando los valores mostrados en la tabla 2 y el comportamiento observados de los especímenes durante su ensaye, se pueden hacer los siguientes comentarios:

- Si la capacidad de la mampostería está limitada por la baja calidad del mortero (falla por las juntas), se puede lograr un incremento sustancial de la resistencia empleando un mortero de buena calidad ya sea como aplanado o relleno de los huecos de las piezas.
- A mejor calidad del aplanado mayor incremento de la resistencia. Aún cuando por lo limitado del estudio no se puede determinar, debe haber un límite para lograr este efecto en forma óptima; es decir, debe existir alguna relación entre resistencia del aplanado, capacidad alcanzada y/o capacidad original.
- El aplanado aumenta la resistencia a cortante cuando hace que cambie el tipo de falla de la mampostería; esto generalmente sucede cuando el mortero del aplanado es de mucho mejor calidad del que se tiene en las juntas. El incremento esperado en estas condiciones es cuando menos del 40 por ciento.
- En el caso de llenar los huecos, se ve de la tabla 2 que el incremento es del orden del 50 por ciento, prácticamente independiente del tipo de pieza (porcentaje de huecos) y mortero utilizado; se observa también que cambia el tipo de falla. Este tipo de reparación sería adecuado cuando se quiere conservar la resistencia de las piezas y la falla haya sido por las juntas.
- El combinar el llenado de los huecos con un aplanado en las caras laterales aumenta sustancialmente la resistencia; incluso, se nota una cierta influencia del porcentaje de huecos de las piezas que componen la mampostería. La fig 2 muestra dicha variación para los resultados de este estudio; en el eje vertical se tiene

el factor por el que se incrementa el valor postera, mientras que en el horizonte el p por los valores promedio para el bloque de c una línea recta que también pase por el punto za sólida (0 por ciento de huecos), se obser bre una recta haciendo ver que el incremento porcional al área de huecos.

Lo expresado en el párrafo anterior es cierto s mente los siguientes aspectos:

- a) La mampostería original no presenta una fall riría que está agotada totalmente la capaci
- b) Se llenan completamente todos los huecos.
- c) Se utiliza un mortero de buena calidad tanto do de los huecos. Cumpliendo con lo anterior datos de este estudio para calcular el incre es

$$F = 1 + 0.03 H_x$$

donde F es el factor que incrementa la resist de huecos de las piezas. Debe tenerse present ría original tiende a ser por las piezas (o c tencia es menor cuando la resistencia a m ejemplo, comparar la mampostería de bl de con aquella con mortero 1:0:3 AB; en el prime por ciento respecto a la resistencia original solo del 30 por ciento. En el caso del tabiqu (2.35 versus 2.15) para los mismos criterios rior.

- Se observa también que el emplear un buen morte solo llenar los huecos.

Como conclusión de esta fase experimental puede d sustancialmente la capacidad de mampostería sin r ción de un aplanado a base de morteros de buena c de las piezas huecas. En el caso de que las mampo nado y el tipo de falla sea por las juntas, la co mejor calidad seguramente incrementará su capaci muro, con o sin aplanado, es por tensión diagonal resistencia mediante aplanados reforzados con mal. mamposterías de piezas huecas el llenar los hueco: en el caso que la falla hubiera sido de tensión d: cuando más recuperará su capacidad, pero como por do, seguramente incrementará su resistencia. Estas valuarlas experimentalmente.

Mampostería de adobe. En diversos estudios, es l mientos para reforzar y aumentar la seguridad ante tinuación se describen los que se consideran más c

1. Una viga de concreto en la parte superior de los muros, como se muestra en la fig 3. Con este procedimiento se logra una liga adecuada con el adobe y con el techo mediante detalles constructivos sencillos (ref 2); se mejora sustancialmente el comportamiento si, además, se colocan tensores verticales en los extremos de los muros.
2. Otra opción es emplear una viga de alma abierta de madera (ref 3), como se muestra en la fig 4a.
3. Una forma muy sencilla de ligar los muros es mediante barras de acero tensadas, fig 4b; este procedimiento se ha empleado para reforzar viviendas de mampostería de piedra dañadas a raíz del temblor de Skopje, Yugoslavia (1963) y los del Friuli, Italia (1975); el empleo de tensores verticales mejora sustancialmente el comportamiento.
4. Un procedimiento que tiende a lograr refuerzo, rigidización y liga de los muros, así como su protección de la intemperie es el que se muestra en la fig 5 consiste, ref 4, en colocar un recubrimiento de mortero de cemento sobre una malla de acero de refuerzo cuidadosamente fijada al muro por ambas caras, formando un elemento compuesto de adobe y mortero reforzado.

Se tiene evidencia experimental de los sistemas de refuerzo 1, 3 y 4, que proporcionarán una mejoría notable de su comportamiento y resistencia ante sismo (cuando menos se duplica); en la ref 1 se describe con detalle al ensaye de modelos de vivienda reforzada con los procedimientos antes descritos.

Estos criterios de refuerzo también pueden aplicarse a construcciones de mampostería de tabiques de barro o de concreto sin refuerzo.

Mampostería de piedras artificiales con refuerzo. En algunos países como Estados Unidos y Nueva Zelanda la mampostería con refuerzo interior es bastante popular como sistema constructivo; sin embargo, es usual que se llenen completamente los huecos de las piezas con un mortero muy fluido y con abundante refuerzo vertical y horizontal. Con este sistema, en mampostería de bloques de concreto, se obtiene prácticamente un muro monolítico porque el concreto colado en los huecos se adhiere perfectamente al bloque; en piezas de barro, la eficacia del procedimiento es menor porque el concreto o mortero empleado para llenar los huecos, al contraerse por fraguado, se separa del tabique; el empleo de aditivos estabilizadores puede evitar este problema. En general la reparación de mampostería con refuerzo interior resulta, si no imposible de realizar, sí muy complicada.

El procedimiento de reparación a seguir depende del tipo de pieza y mortero que se tenga; por lo general es necesario añadir refuerzo al muro después de reparar localmente la grieta. A continuación se mencionan algunos estudios que se han realizado en esta dirección.

En la ref 5 se describe el empleo de mallas de acero en ambas caras del muro como sistema de refuerzo; también se describe la reparación local de las grietas.

En este último caso se observó que la resistencia original se recupera casi totalmente y en el caso de mampostería de piedra, aumenta aproximadamente al doble, esto, lo explica el autor, es debido a que la mampostería absorbe parte del material que se utiliza para reparar las grietas.

El refuerzo con malla de acero se realizó uniendo al refuerzo de ambas caras mediante alambres y cubriéndolas después con mortero que tenía un espesor de 3 cm; además, se reparó localmente la grieta. Con este procedimiento se sobrepasó la resistencia original.

En el Instituto de Ingeniería de la UNAM se realizó un programa experimental exploratorio tendiente a determinar los procedimientos más efectivos para la reparación de mampostería dañadas por sismo o hundimientos diferenciales.

Se repararon ocho muros que habían sido previamente llevados a la falla; seis de ellos se ensayaron bajo carga monotónica, como parte de otra investigación, y dos se probaron recientemente ante cargas laterales alternadas. Los seis primeros eran de tabique extruido con castillos en sus extremos; la falla consistía en una grieta de tensión diagonal en el muro la cual se prolongaba también sobre los castillos. En general, los muros se llevaron a un estado muy avanzado de falla y su capacidad estructural quedó prácticamente anulada. Los dos últimos muros eran de tabique rojo y quedaron en las mismas condiciones.

En la tabla 3 se presentan las características originales de los muros y las que se determinaron después de la reparación. El ensaye de los muros reparados se efectuó bajo las mismas condiciones que el original.

La reparación por tanto se hizo en el marco confinante y en la mampostería. En todos los casos los castillos se resanaron con un mortero de alta resistencia; en la mampostería la reparación se efectuó de diversas maneras.

El muro 1 sufrió falla de cortante (grietas por las juntas); se reparó rellorando las grietas con un mortero comercial denominado Polimor (de alta adherencia). En el muro 2 la reparación se efectuó resanando las grietas que se habían desarrollado con un mortero de cemento que contenía un aditivo para aumentar la adherencia; después se volvió a colocar el aplanado que originalmente tenía. El muro 3, que falló por tensión diagonal, (la grieta atraviesa tanto las juntas como las piezas), se reparó mediante rajueleo con mortero de cemento, colocando después malla de alambre, tipo gallinero, en un lado del muro; finalmente se cubrió la malla con un aplanado de yeso. El muro número 4 solamente se reparó en la zona de falla con mortero de cemento. En el muro 5 se reparó la zona dañada con mortero común, se colocó después una malla de alambre entrelazada de 7 cm por lado, que se fijó mediante taquetes al marco perimetral y al muro; finalmente, se añadió un aplanado de yeso y cemento. En el muro 6 se eliminó el aplanado de yeso que tenía para colocarle una malla tipo gallinero, después de haber rajueleado la zona de falla con un mortero de cemento; finalmente se volvió a colocar un aplanado de cemento y yeso. El muro 7 y 8 eran idénticos, al primero se le colocó, después de resanar la grieta con mortero de alta resistencia, una capa de malla electrosoldada 6 x 6 - 14/14, por ambas caras, que se cubrió con un aplanado de cemento-arena en proporción 1 a 3 (en volumen) el muro 8 tenía el doble de refuerzo.

Las figs 6 a 11 muestran las curvas carga diagonal deformación angular (desplazamiento en la parte superior del muro dividido por su altura) para los seis primeros muros, tanto para el muro original como para el reparado, y en las figs 12 y 13, los dos últimos ensayos; sobre el eje vertical se representa el esfuerzo cortante promedio.

El muro 1 recuperó su resistencia y rigidez originales casi totalmente; la falla del muro reparado le ocasionó una grieta diferente a la del muro original, la cual da fe de las buenas características de adherencia del material empleado.

En los muros 2 a 6 se presentó la misma configuración de agrietamiento que en el muro original.

El muro 2 conservó hasta la falla la misma rigidez que el agrietamiento que en el muro original.

El muro 3 alcanzó casi totalmente la resistencia original y conservó la misma rigidez; se considera que el aplanado es el que contribuyó esencialmente a proporcionar la resistencia y rigidez al muro reparado y que el acero de refuerzo trabajó solo después del agrietamiento, proporcionando ductilidad al muro para cargas menores a la del agrietamiento original; lo anterior se debió a la baja cantidad de refuerzo empleado y a que el tipo de malla usada no es eficiente para estos fines.

El comportamiento del muro 4 demuestra que resanar simplemente las grietas con mortero común no es eficiente como método de reparación; la rigidez y la resistencia se reducen drásticamente.

El muro 5 conservó la rigidez original hasta el agrietamiento, el que se presentó cuando se rebasó la contribución del aplanado (comparar muro 3 con 5); no disminuyó la resistencia por la malla de refuerzo.

Con el muro 6 se trató de ver el efecto de la malla de refuerzo; originalmente el muro tenía aplanado de cemento. Se observó que el muro no conservó su rigidez original, debido a que el aplanado que se utilizó después de reparar las grietas fue de menor calidad al que tenía originalmente. La malla de alambre comenzó a funcionar después que se agrietó el muro, incrementando la resistencia hasta que se dañó el marco perimetral; no se llegó a igualar la resistencia original probablemente por la poca cuantía de refuerzo y por el tipo de malla utilizada.

Durante esta serie de seis muros se observó que, para deformaciones grandes, el aplanado se despega del muro haciendo que la malla se desprenda sobre la diagonal de compresión, dando lugar a una disminución de la resistencia. Sería conveniente, por lo tanto, utilizar algún aplanado que se adhiera mejor a la mampostería, o bien sujetar mejor el refuerzo al muro para ayudar a este propósito. Esto se hizo en los muros 7 y 8 donde las mallas de refuerzo de ambas caras se sujetaron entre sí, evitando el desprendimiento del aplanado y mejorando el comportamiento, como se observa en las figs. 12 y 13.

Del análisis del comportamiento de los muros, del estudio de las figs 6 a 13 y de la tabla 4.2, se extraen las siguientes conclusiones:

- a) La rigidez del muro reparado es casi la misma que la del original hasta el instante de agrietamiento, siempre y cuando se utilicen morteros resistentes para resanar la grieta.
- b) El comportamiento de muros en los que sólo se resana la grieta con mortero común, resulta muy inferior al del muro original.
- c) El aplanado ayuda a retardar la aparición del agrietamiento en muros reparados con mortero común.
- d) El acero de refuerzo colocado en forma de malla y cubierto por un aplanado de yeso o cemento, es efectivo una vez que se agrieta el muro.

- e) La presencia del acero hace dúctil y resistente al muro después del agrietamiento.
- f) Con los sistemas de reparación empleados nunca se igualó la resistencia original, pero se llegó a valores bastante cercanos cuando se utilizó mortero de alta resistencia para resanar la grieta y porcentajes bajos de acero de refuerzo en forma de malla.
- g) Para las mamposterías aquí empleadas, la malla de alambre tipo gallinero parece ser suficiente para restaurar la resistencia original, y usándola por ambos lados del muro daría mejor resultado.
- h) Después de agrietada la mampostería, la resistencia disminuye notablemente - cuando se daña el marco perimetral y no existe otro tipo de refuerzo.
- i) La resistencia después del agrietamiento es función del porcentaje de refuerzo.

Por lo anterior sería conveniente seguir con estos estudios que tendrían los siguientes objetivos:

- 1) Determinar procedimientos para calcular la cantidad de acero necesaria para alcanzar cierto porcentaje de la resistencia original y dar capacidad de deformación al muro reparado.
- 2) Probar aditivos que permitan aumentar la resistencia de la junta fallada para que también se recupere la rigidez original.
- 3) Ensayar diversos tipos de armado con el objeto de encontrar el recomendable para evitar la falla del marco perimetral.

CONCLUSIONES

El comportamiento de una estructura de mampostería reparada depende en gran medida de la elección del procedimiento de reparación, al que se debe seleccionar - después de estudiar las causas que produjeron los daños, la naturaleza de éstos y la estructuración de la obra.

Generalmente los elementos de mampostería sin refuerzo son los más dañados cuando ocurre un sismo. Desde hace tiempo se ha tratado de establecer métodos de reparación que restituyan o superen la resistencia y rigidez originales; de estudios recientes se desprende que esto es posible siempre y cuando se emplee un procedimiento adecuado que considere lo establecido en el párrafo anterior. Generalmente habrá necesidad de colocar refuerzo en el muro, bien sea en forma de malla o dispuesto diagonalmente sobre el muro o amarrando al elemento de mampostería, pudiendo ser sobre una o las dos caras del muro. Es dudosa la efectividad del rajueo de las grietas como método de reparación. Al momento no existe - criterio alguno para calcular la cantidad de refuerzo necesaria para hacer que - la mampostería alcance cierta resistencia predeterminada y aumente su capacidad de deformación; el autor trabaja sobre el particular y espera que muy pronto pueda establecerse un criterio racional que permita llegar a determinar la cuantía de refuerzo necesario para que un muro de mampostería sea capaz de soportar cierto nivel de fuerza cortante incrementando al mismo tiempo la capacidad de deformación de la mampostería.

REFERENCIAS

- 1 Hernández O., Valencia E. (1980), "Refuerzo de la vivienda de bajo costo en zonas sísmicas", Instituto de Ingeniería UNAM, Informe de Investigación del proyecto 0701.
- 2 Escalante C, Merrifield C (1977), "Casas de adobe antisísmicas", Reporte interno de la Dirección General de Servicios Técnicos SAHOP.
- 3 "Asismicidad en vivienda económica" (1959), Centro Interamericano de Vivienda y Planteamiento, Bogotá.
- 4 Malí R, y Hernández O., (1976), "Recomendaciones sobre el empleo de la mampostería en construcciones para vivienda en zonas sísmicas", Ingeniería Sísmica N° 14.
- 5 Sheppard P y Tervelj S., (1980), "The effect of repair and strengthening methods for masonry walls", Proceedings 7WCEE, Vol. 6, pag 255-262, Estambul, Turquía
- 6 Makino M. et al" (1980), "An investigation for the design of framed structures with infill walls", Proceedings 7WCEE, Vol 4, pag 369-372, Estambul, Turquía.

TABLA 1 RESULTADOS PROMEDIO

Material	O R I G I N A L				R E P A R A C I O N			
	f_p a)	Mortero	\bar{v} b)	C.V.	Mortero	Tipo	\bar{v} b)	C.V.
TAPIQUE	109	0:1:3	2.47	21	A	aplanado	2.68	32
					B	aplanado	4.72	44
		1:0:3	5.59	8	B	aplanado	6.32	32
TAPIQUE EXTRUIDO	241	1:2:9	4.43	23	A	aplanado	5.7	4
					B	aplanado	6.0	22
					B	huecos	6.1	16
					A-B	aplanado-huecos	10.36	23
		1:0:3	5.02	19	A-B	aplanado-huecos	11.29	22
BLOQUE CONCRETO	102	1:2:9	3.54	21	A	aplanado	4.93	11
					B	aplanado	5.74	18
					B	huecos	6.70	38
					A-B	aplanado-huecos	7.37	30
					A-B	aplanado-huecos	7.69	20

* A mortero 1:1:6
 B mortero 1:0:3
 A-B mortero A en aplanado y B en huecos

a) resistencia a compresión, kg/cm²
 b) resistencia a cortante, kg/cm²

TABLA 2 VALORES DE DISEÑO (C.V. \geq 15%)

Material	O R I G I N A L				R E P A R A C I Ó N				
	n° a)	Mortero*	+	Y° b)	+	Mortero*	Tipo	Y° b)	Y°/Y°
TABIQUE	66	6:1:3	J	1.62	J	A	aplanado	1.49	0.92
					Y	B	aplanado	2.25	1.39
					Y	B	aplanado	3.51	0.86
TABIQUE EXTRUIDO	175	1:2:9	J	2.81	J	A	aplanado	4.15	1.47
					C	B	aplanado	3.87	1.38
					C	B	huecos	4.36	1.55
					Y	A-B	aplanado-huecos	6.58	2.34
					Y	A-B	aplanado-huecos	7.28	2.14
BLOQUE CONCRETO	69	1:2:9	J	2.32	C	A	aplanado	3.59	1.41
					C	B	aplanado	3.96	1.70
					C	B	huecos	3.43	1.48
					Y	A-B	aplanado-huecos	4.21	1.81
					Y	A-B	aplanado-huecos	5.1	1.32

* tipo de falla
 J por las juntas
 Y por las piezas
 C combinada

Mortero*
 A 1:1:6
 B 1:0:3

a) resistencia a compresión, kg/cm²
 b) resistencia a cortante, kg/cm²

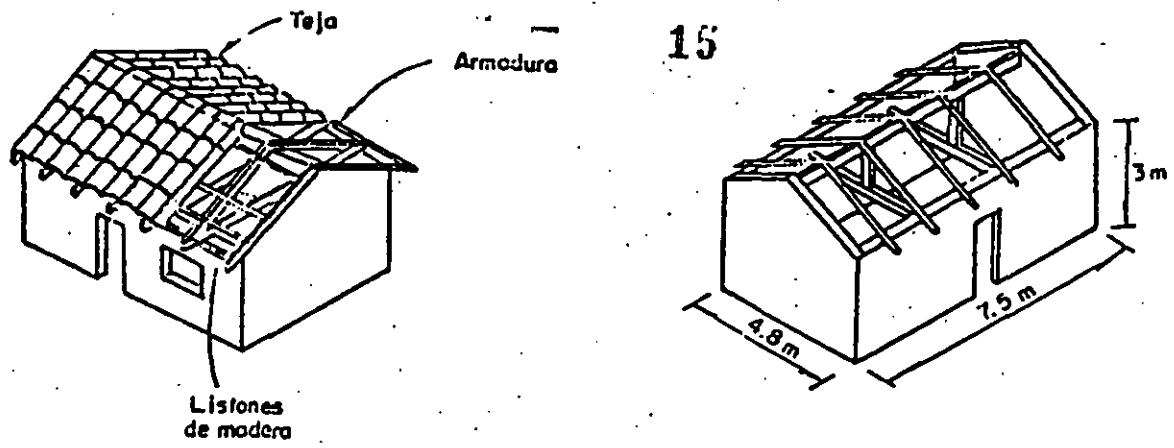
A-B mortero A en aplanado y B en huecos.

TABLA 3 COMPARACION DE PROPIEDADES

Muro No	Características adicionales en el muro reparado	Porcentaje de acero	1) P _{med}		2) Y _{med} 10 ³	
			I	II	I	II
1	Reparación de grieta con mortero Polímer	0	19.20	16.9	0.83	0.61
2	Reparación de grieta con mortero Adhesión	0	24.8	13.2	1.15	0.63
3	Reparación con mortero común malla de gallinero y recubrimiento de yeso	.0008	14.1	13.0	1.03	1.02
4	Reparación de grieta con mortero común	0	11.2	7.4	0.98	7.29
5	Reparación con mortero común, malla trenzada y recubrimiento	.001	22.8	16.1	1.99	3.79
6	Reparación con mortero común y malla de gallinero	.0008	14.8	12.2	1.73	1.52
7	Reparación con mortero 1:0:3 (cemento, arena) y malla de acero	.0008	5.7	13.0		
8	Símilar al 7	.0013	5.8	>>13.0		

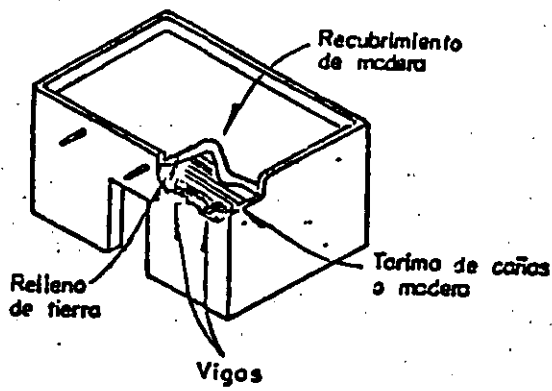
1. Carga, ton
 2. Distorsión

I. Muro original
 II. Muro reparado



a) Armaduras de madera

b) Vigas y puntales



c) Terrado

Fig 1a Tipos comunes de vivienda de adobe

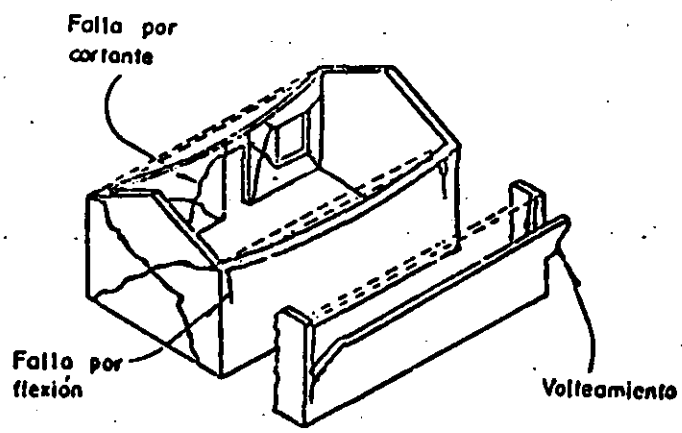


Fig 1b Modos de falla de viviendas de adobe

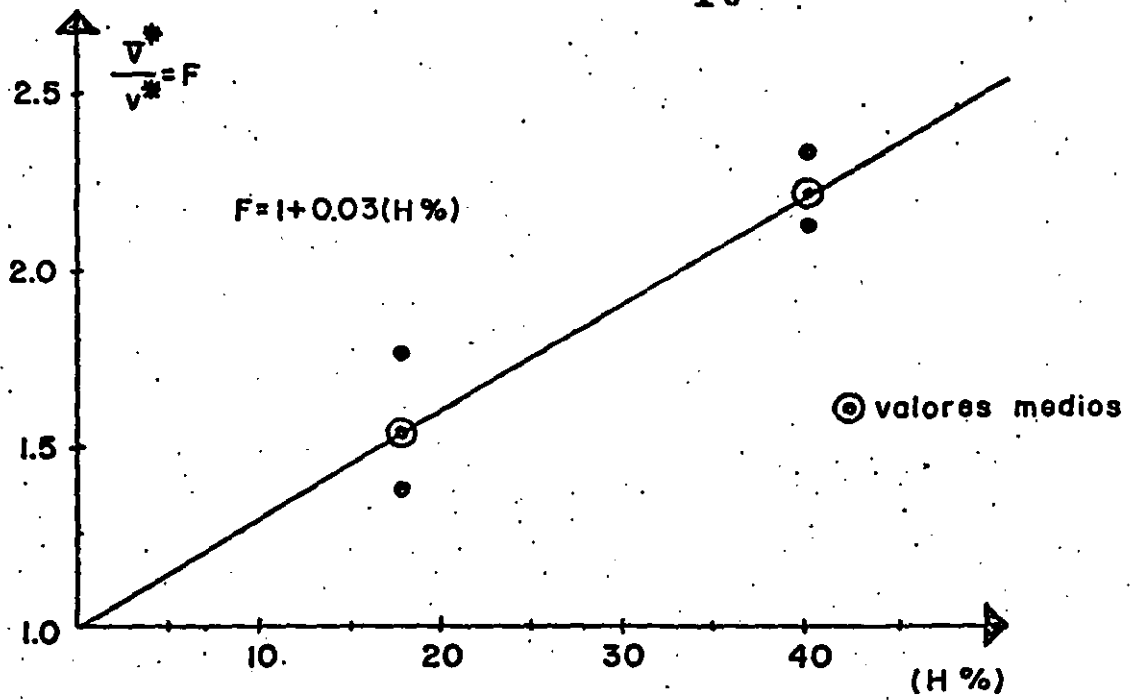


Fig.2 Aumento de la resistencia con el llenado de huecos y aplando en las caras laterales.

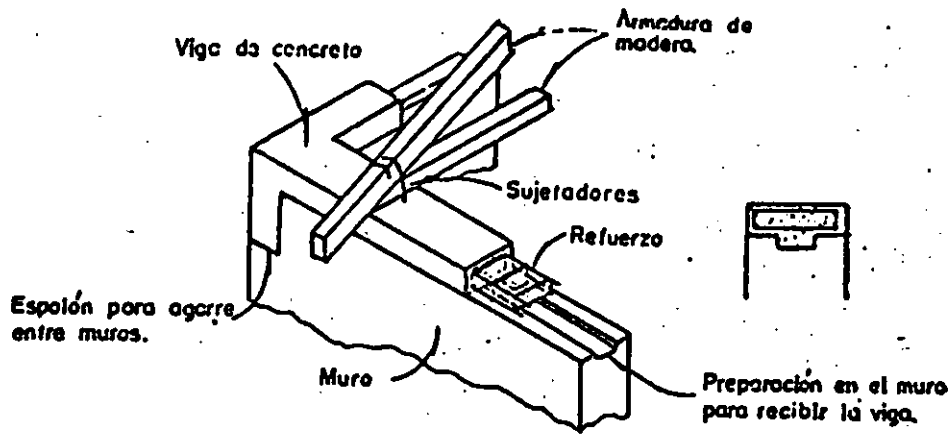
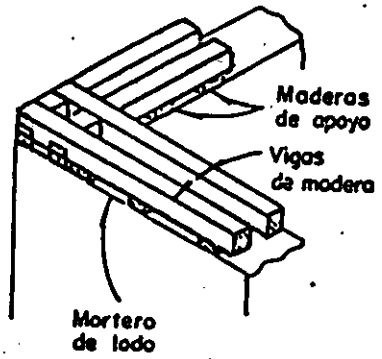
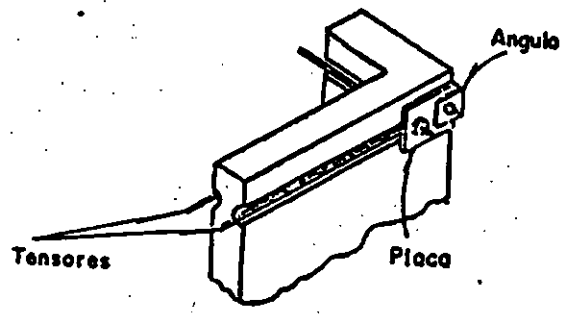


Fig 3 Refuerzo con viga - cadena de concreto

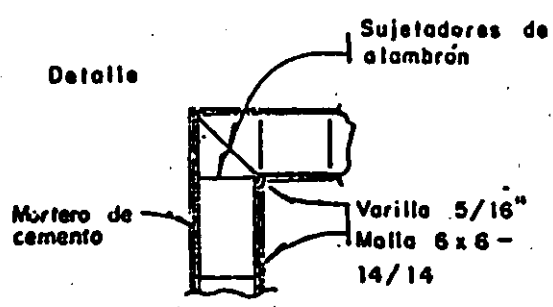


(a) Refuerzo con viga de madera

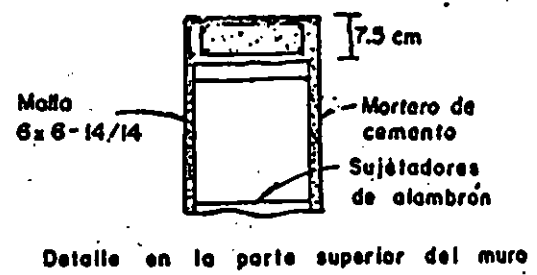


(b) Refuerzo con tensores de acero

Fig 4 Otros procedimientos



PLANTA



ELEVACION

Fig 5 Recubrimiento de mortero sobre malla

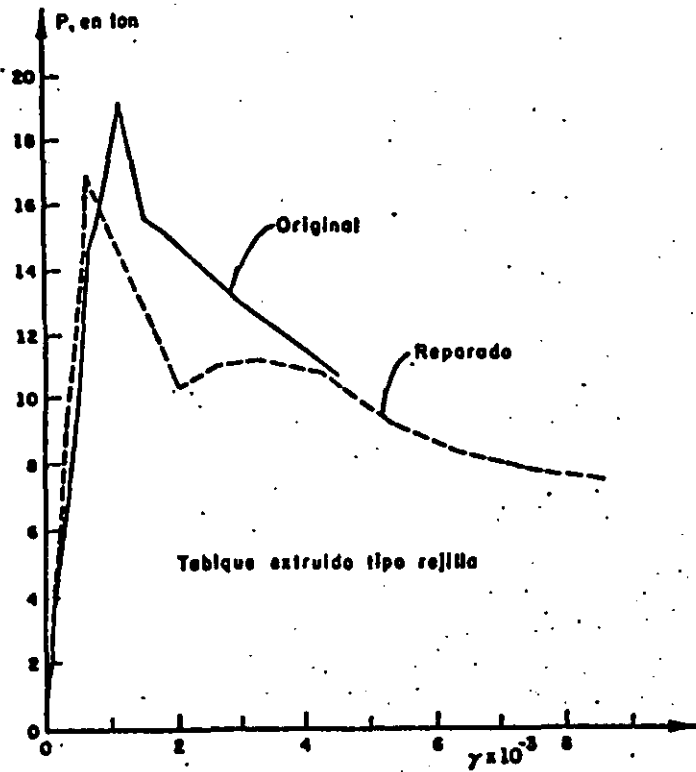


Fig 6 Muro 1. Reparación de grieta con adhesivo Polimor

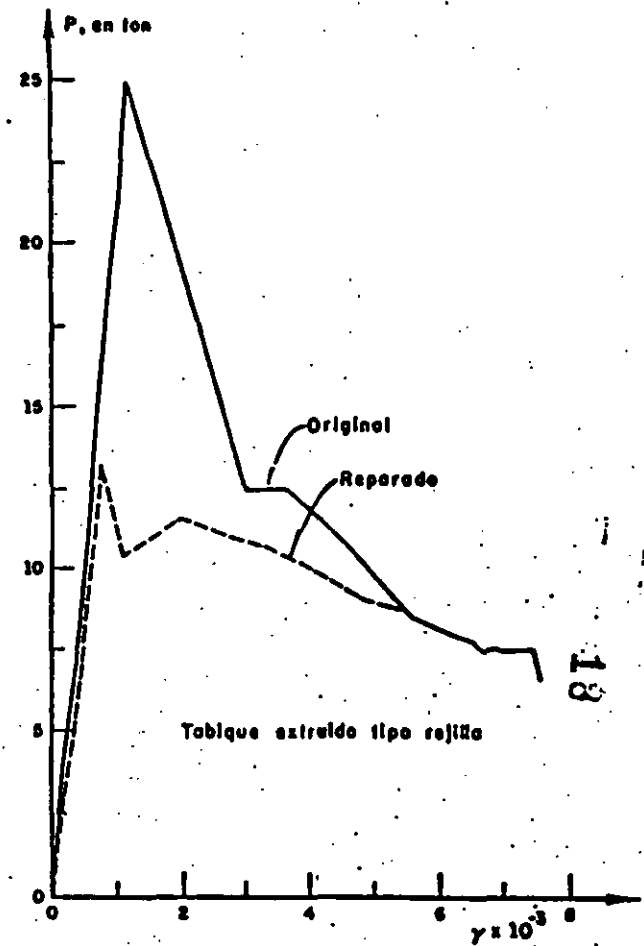


Fig 7 Muro 2. Reparación de grieta con Adhención

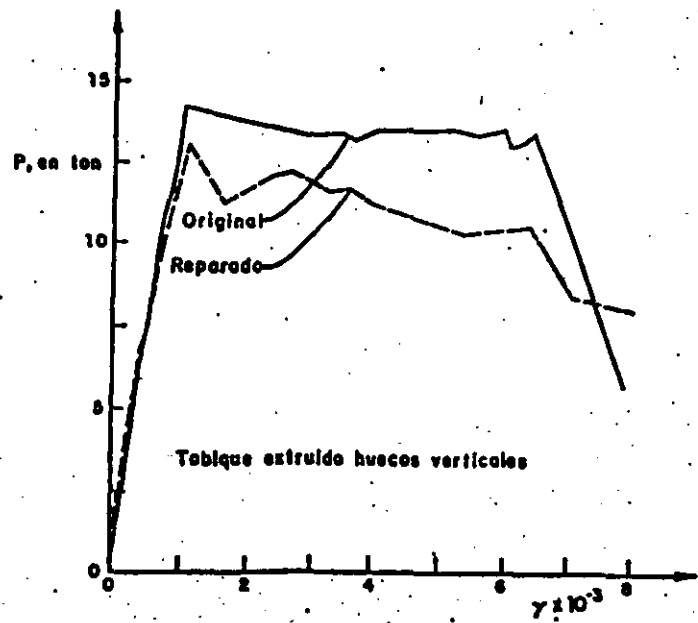


Fig 8 Muro 3. Reparación de grieta con mortero común, malla de gallinero y aplanado de yeso y cemento

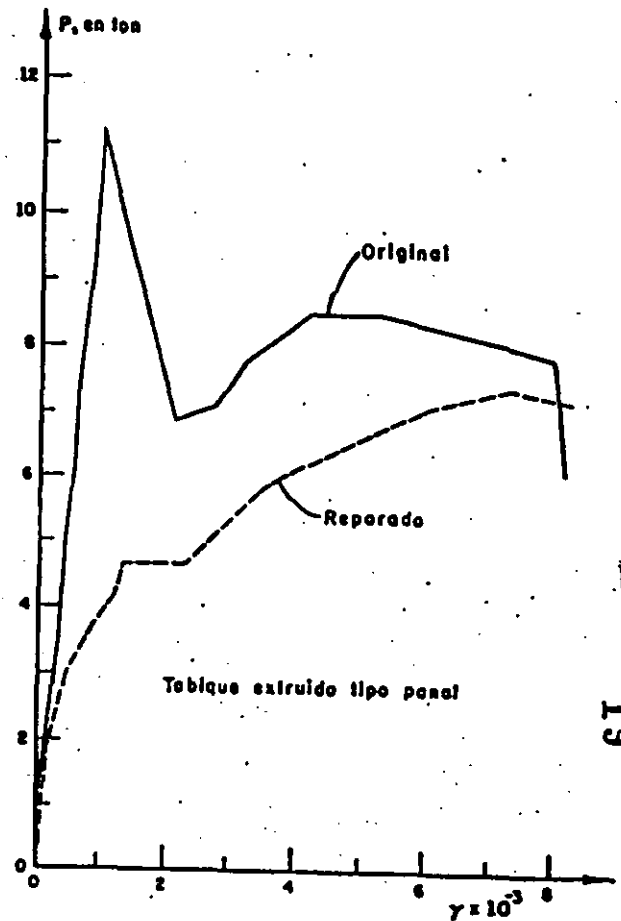


Fig 9 Muro 4. Reparación de grieta con mortero común

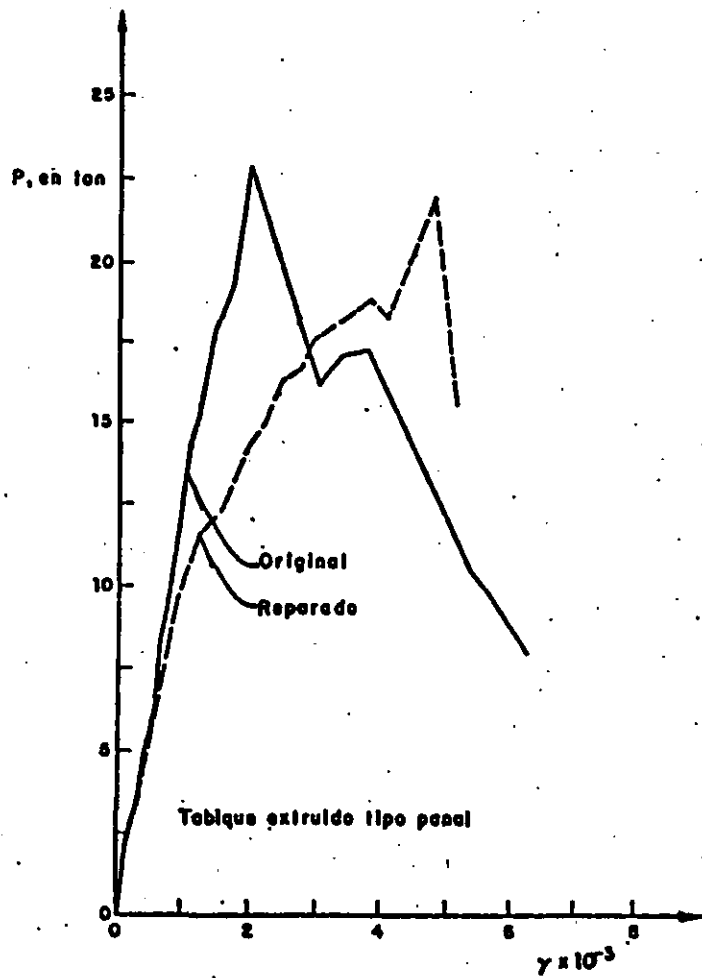


Fig 10 Muro 5. Reparación de grieta con mortero común, malla trenzada y aplanado de mortero

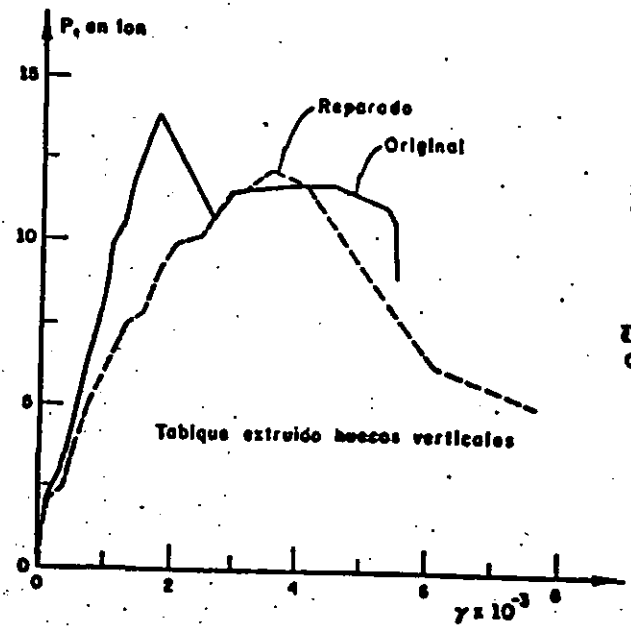


Fig 11 Muro 6. Reparación de grieta con mortero común, malla de gallinero y aplanado de yeso y cemento

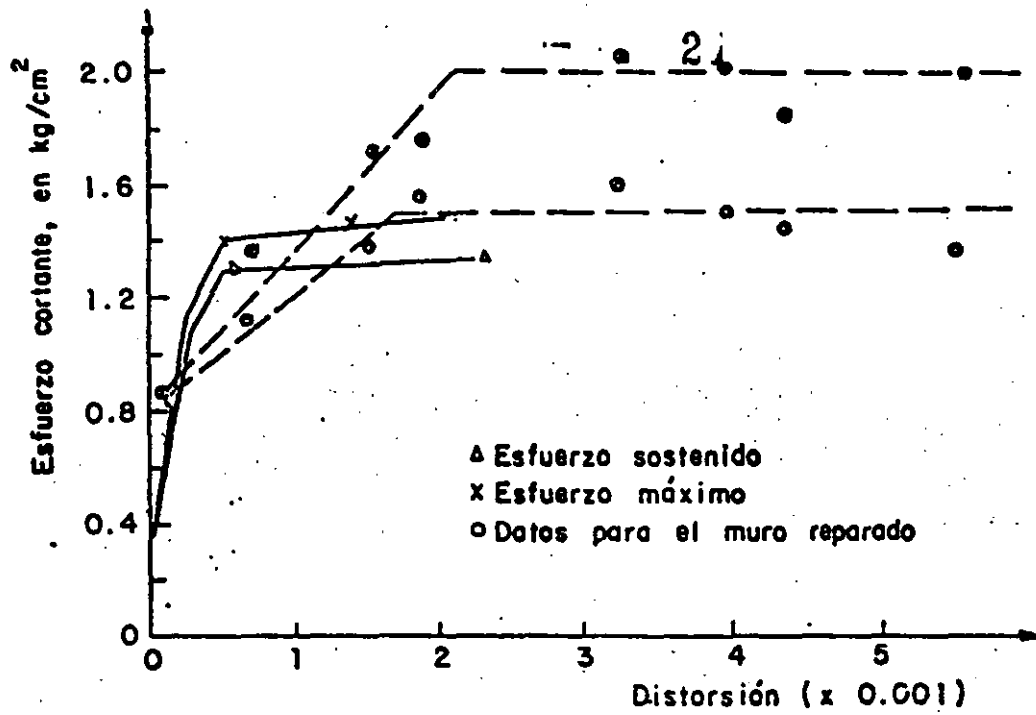


Fig 12. Envolventes de esfuerzos del muro 7

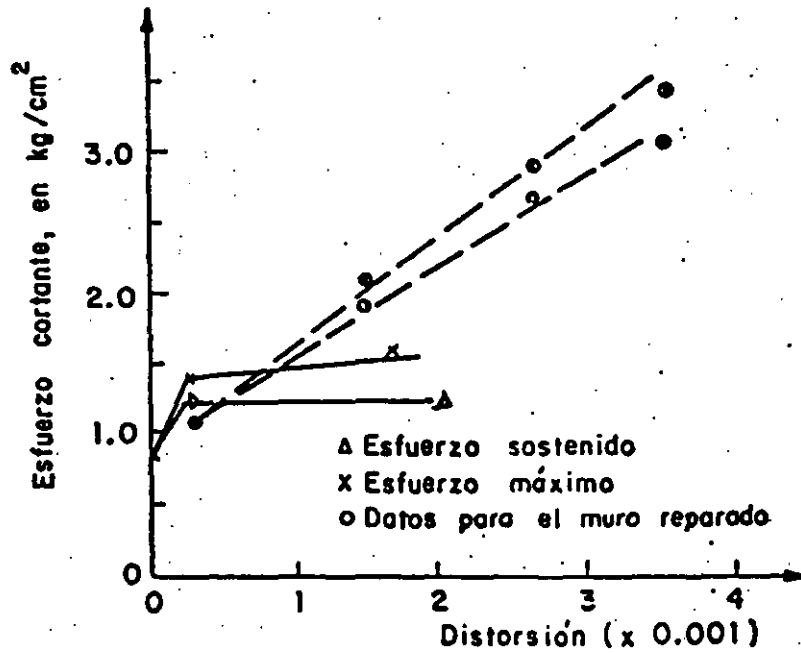


Fig 13. Envolventes de esfuerzos del muro 8.

LAS NORMAS TÉCNICAS PARA DISEÑO Y CONSTRUCCION DE
ESTRUCTURAS DE MAMPOSTERIA DEL REGLAMENTO DE
CONSTRUCCIONES PARA EL DISTRITO FEDERAL

Roberto Meli

BASES Y ALCANCE DE LAS MODIFICACIONES

La revisión del Reglamento y de sus Normas Técnicas tuvo como objetivos principales incorporar las lecciones derivadas del comportamiento de los edificios en los sismos de septiembre de 1985 y actualizar los distintos documentos con base en la experiencia adquirida por su aplicación en los más de diez años de su vigencia y en los nuevos conocimientos que sobre el tema se han generado en el país y en el extranjero.

Las normas de mampostería de 1976 representaron un cambio radical con respecto a la práctica de diseño anterior, por su presentación en un formato de diseño moderno y racional basado en las propiedades mecánicas del material y en los resultados experimentales así como en la evidencia del comportamiento de estructuras reales. Esas normas sirvieron de modelo para diversas recomendaciones y reglamentos de otros países sobre la materia. En la nueva versión no se consideraron necesarias modificaciones radicales al documento; solamente se procuró la reorganización de las disposiciones para hacerlas más claras, la simplificación de algunos métodos de diseño que resultaban de un grado de complejidad poco justificado en vista de las,

incertidumbres involucradas y el ajuste de algunos valores de diseño.

En términos generales la evaluación de los efectos de los sismos de 1985 indica que el comportamiento de las construcciones de mampostería fue satisfactorio. Los daños observados en muros de mampostería pueden agruparse en tres categorías:

a) Falla de muros de relleno en edificios con estructura de concreto o de acero. La destrucción de estos elementos fue notable y se derivó de una incompatibilidad entre la flexibilidad de la estructura principal y la fragilidad de los elementos de mampostería. Estos no eran generalmente considerados como elementos estructurales y por tanto no eran tomados en cuenta en el diseño. En muchos casos la falla de estos muros contribuyó a disipar la energía introducida en la estructura por el movimiento de su base y evitó el colapso de la estructura principal. Por otra parte cuando los muros de mampostería tenían una distribución y cantidad adecuada en dos direcciones ortogonales y una liga apropiada con la estructura principal, el comportamiento de los edificios fue satisfactorio.

b) Falla de viviendas de materiales débiles. Un número importante de fallas parciales o colapsos se presentaron en viviendas de adobe o de piedra de uno o dos pisos, especialmente en las colonias Guerrero y Morelos. Los daños se debieron esencialmente a las condiciones extremas de

deterioro de los materiales que constituyeran los muros y los techos, debido al intemperismo y a las filtraciones. No pueden considerarse estas viviendas representativas de las construcciones que se obtendrían aplicando las normas de 1976.

- c) Agrietamiento de viviendas de bloque y tabique. Numerosos fueron también los daños que se detectaron en viviendas de tabique con características similares a las requeridas por las normas recientes, sobre todo en las colonias Alamos, Obrera y Doctores. De las decenas de construcciones de este tipo que se revisaron en detalle, se concluyó que en su gran mayoría los agrietamientos existían previamente al sismo y eran debidos a hundimientos diferenciales. Los casos en que el daño era claramente atribuible al sismo mostraban una debilidad manifiesta ante cargas laterales en general por escasez de muros en una dirección. Por el contrario fueron numerosos los casos de viviendas con resistencia claramente inferior a la requerida por las normas vigentes y que tuvieron comportamiento satisfactorio.

Por otra parte los registros del movimiento del terreno obtenidos en la zona del lago indican que las aceleraciones fueron sustancialmente superiores a las previstas en el reglamento anterior, lo cual condujo a que en la nueva versión se impusiera un incremento en los coeficientes sísmicos tanto en dicha zona como en la de transición. Para reflejar la diferente

4

vulnerabilidad mostrada por distintos tipos de estructuras ante sismos de la naturaleza de los que son típicos en la zona del lago se modificaron, además de los coeficientes sísmicos, otros factores que inciden en el nivel de resistencia que es necesario proporcionar a una estructura, como los factores de comportamiento sísmico (Q), los factores de reducción de resistencia (F_R) y los requisitos de calidad de materiales, de refuerzo y de construcción.

En estructuras de concreto los factores antes mencionados se modificaron de manera de obtener un incremento sustancial de la seguridad con respecto a lo prescrito en el reglamento anterior; en estructuras de acero los cambios han sido menores pero también tendientes a obtener un incremento adicional de resistencia; por el contrario en estructuras de mampostería los cambios han sido en sentido opuesto, tendientes a reducir el efecto del incremento en el coeficiente sísmico que se consideró para este material excesivo. Así se aumentó el factor de reducción para cálculo de la capacidad a fuerza cortante para los casos usuales de 0.6 a 0.7 y se permiten esfuerzos cortantes resistentes mayores cuando se coloca refuerzo horizontal en los muros. El saldo es inevitablemente hacia requisitos mayores de resistencia sísmica para las zonas de lago y de transición, lo que no afectará sensiblemente los proyectos usuales para viviendas de uno o dos pisos que cuentan con cantidades suficientes de muros en ambas direcciones para cumplir con los nuevos requisitos. Sin embargo para edificios de cuatro o más

niveles los efectos son significativos; por ejemplo diversos de los proyectos de vivienda multifamiliar de cinco pisos que se han empleado extensamente hasta la fecha deberán ser modificados para lograr el incremento en su resistencia a carga lateral que exige la nueva normativa.

En otros aspectos las modificaciones principales se encuentran en el método de diseño por cargas verticales y en la reorganización de los capítulos sobre métodos de diseño por cargas verticales y horizontales. Estos cambios no deberían redundar en diferencias significativas en los resultados del diseño. En las secciones siguientes de este artículo se comentarán los cambios a cada capítulo específico de las normas.

CAPITULO 1. CONSIDERACIONES GENERALES

Al igual que en la versión anterior las normas cubren tanto la mampostería de piedras naturales como la de piedras artificiales (bloques, ladrillos, tabiques). Aunque lo relativo a propiedades mecánicas es de aplicación general, los procedimientos de diseño y requisitos de refuerzo sólo se refieren a muros que cumplan una función estructural; no se incluyen recomendaciones específicas para bóvedas, arcos, vigas o columnas de mampostería.

Existe un gran número de materiales y procedimientos de construcción para muros de mampostería. Solo se incluyen los

muros de piezas unidas con morteros convencionales (de arena con cemento, cal o cemento de albañilería). No se tratan los muros de piezas machimbradas o unidas con otro tipo de mezclas aglutinantes. Se dan valores numéricos específicos de las propiedades mecánicas solo para las combinaciones más usuales de piezas y morteros, para las que hay información experimental y experiencia práctica disponibles. Para otros materiales se indican las pruebas necesarias para determinar dichas propiedades. Algunas de estas pruebas están especificadas por una norma oficial; cuando este no es el caso se describe en las normas el procedimiento de ensaye y su interpretación.

El procedimiento de diseño prescrito es el general del reglamento (de estados límite) en el que se requiere que los efectos de las acciones de diseño, multiplicados por factores de carga, no excedan de la resistencia de diseño que incluye un factor de reducción de resistencia. Además de la revisión cuantitativa de la seguridad ante los distintos estados límite, se imponen requisitos geométricos y de refuerzo que están basados principalmente en la experiencia de comportamiento de estructuras reales.

CAPITULO 2. MATERIALES PARA MAMPOSTERIA DE PIEDRAS ARTIFICIALES

2.1 Piezas

La distinción entre los muros construidos por piezas macizas y los de piezas huecas (fig 1) es importante en el comportamiento

sísmico. Los muros de piezas macizas tienen, ante esta sollicitación, un comportamiento menos frágil que los de piezas huecas, en las que la falla de las paredes da lugar a una pérdida brusca de capacidad. Es por ello que en las normas de diseño por sismo se especifica que para muros de piezas macizas, que cumplan con los requisitos de refuerzo impuestos para muros diafragma, confinados o con refuerzo interior, se reduzcan las fuerzas sísmicas por un factor de comportamiento $Q = 2$, mientras que para las piezas huecas debe usarse $Q = 1.5$, lo que implica fuerzas de diseño 33% mayores que en el caso anterior.

La resistencia en compresión de las piezas es el parámetro más importante del que dependen las propiedades mecánicas de los muros de mampostería. Por ello se requiere su determinación para fines de control de calidad y para deducir las otras propiedades cuando no se cuenta con determinaciones directas de las mismas.

El valor de diseño de la resistencia en compresión de las piezas se determina como un valor mínimo probable tomando en cuenta la variabilidad de la propiedad en cuestión. En función de la media y coeficiente de variación determinados en los ensayos se calcula con la fórmula especificada en esta sección, un valor de diseño que corresponde aproximadamente a una probabilidad de 2% de no ser alcanzado.

2.2 Morteros

La función del mortero es permitir la sobreposición de las piezas formando un conjunto que tenga una liga fuerte y duradera. Sus propiedades más importantes son: manejabilidad, resistencia a compresión y tensión y adherencia con las piezas. Estas propiedades varían según el tipo de cementante empleado, la relación entre arena y cementante y según la cantidad de agua en la mezcla, aunque esto último no se suele controlar en obra.

La resistencia a compresión es el índice de calidad del mortero generalmente aceptado y se determina según la norma NOM C61. Debe tenerse en cuenta que esta resistencia no corresponde a del material colocado entre las piezas de un muro, donde las condiciones de confinamiento y de curado son muy diferentes de las que se tienen en el ensaye estándar.

Los proporcionamientos admitidos descartan el uso de la cal como único cementante del mortero en elementos que tengan función estructural, debido a la baja resistencia y poca durabilidad que se obtiene en los morteros a base únicamente de cal. Se limita la relación volumétrica arena-cementante a un valor entre 2.25 y 3 con el fin de poder lograr una mezcla compacta donde la pasta llene los vacíos del agregado y alcanzar así una adherencia máxima entre pieza y mortero.

En la tabla del inciso 2.2 se consignan resistencias mínimas que

debe cumplir el mortero en obra para diferentes proporcionamientos; estos valores son fácilmente alcanzados si se efectúa un control razonable en la elaboración del mortero.

2.3 Acero de refuerzo

Para el refuerzo que debe colocarse en castillos y dadas o como refuerzo interior en juntas o en huecos de las piezas se admiten las barras convencionales para refuerzo de concreto, pero también los alambres corrugados con esfuerzo de fluencia nominal de 6000 kg/cm^2 y las mallas electrosoldadas incluyendo el refuerzo de alambre soldado tipo "escalera". Es recomendable emplear barras y alambres de pequeño diámetro para asegurar un recubrimiento adecuado y facilitar el correcto llenado de los espacios donde se coloca el refuerzo.

2.4 Mampostería

Para la resistencia de diseño en compresión del conjunto piezas-mortero se proporcionan, en la tabla de la fracción c) de esta sección, valores indicativos para los materiales más comunes sobre los cuales existen suficientes resultados experimentales. Para casos no cubiertos en esa tabla o cuando se quiera obtener una determinación más confiable, será necesario recurrir al ensayo de los materiales específicos que se vayan a emplear.

La forma más confiable para determinar la resistencia a compresión de la mampostería es mediante el ensaye de pilas formadas con las piezas y morteros que se van a emplear en la construcción (fig 2). Las otras opciones que se presentan son menos confiables y obligan, por tanto, a fijar valores más conservadores de la resistencia nominal a compresión.

Cuando se haga la determinación de la resistencia a partir del ensaye de pilas es aconsejable emplear especímenes con relación de altura a espesor del orden de cuatro; para esbelteces menores se presenta el efecto de confinamiento de los apoyos de la máquina de ensaye; para relaciones mayores de cuatro comienzan a ser importantes los efectos de esbeltez. Cuando no sea factible este tamaño, puede recurrirse al ensaye de pilas con otra esbeltez, multiplicando los resultados obtenidos por los factores que se indican en la tabla del inciso 2.4.1 de las recomendaciones. No se pretende que estos ensayos se empleen para fines de control de calidad en obra; su función es obtener un índice de resistencia de la mampostería formada con una combinación de piezas y mortero para la cual no se tenga una determinación previa. La verificación posterior en obra podrá hacerse sobre la calidad de las piezas y del mortero únicamente. La resistencia de diseño a compresión de la mampostería se determina con el criterio estadístico ya mencionado y que toma en cuenta la variabilidad de la resistencia de las pilas.

La opción presentada en la fracción b) permite determinar la

resistencia de la mampostería a compresión a partir de tablas que están en función de las propiedades de los materiales componentes. La resistencia de la mampostería depende principalmente de la resistencia de la pieza y en menor grado de la del mortero. Se ha observado de ensayos de laboratorio, que la relación entre la resistencia de la pila y de la pieza es aproximadamente lineal. El factor de proporcionalidad es, sin embargo, variable para las distintas piezas, dependiendo principalmente de su forma, del material de que están hechas y de la regularidad de sus dimensiones. Este factor de proporcionalidad es mayor para bloques que para tabiques debido a un número menor de juntas en el muro de bloque. Por ello se tienen tablas distintas para los dos tipos de piezas.

Los castillos y dadas que se colocan en la mampostería confinada contribuyen significativamente a la resistencia en compresión de los muros solo cuando la mampostería es de baja resistencia; por ello se acepta que se incremente la resistencia en compresión en una cantidad fija que es significativa para mampostería débil y poco importante para piezas de alta resistencia. Para la mampostería con refuerzo interior que cumple con los requisitos de cuantía y distribución especificados en la sección 3.4, se permite un ligero incremento de capacidad que es una fracción de la resistencia de la mampostería sin refuerzo. Cuando las cantidades de refuerzo sean sustancialmente superiores a los mínimos especificados será válido calcular la resistencia en compresión con base en las hipótesis de flexocompresión esbozadas

en el inciso 4.2. o con base en evidencia experimental y alcanzar así resistencias muy superiores a la de la mampostería sin refuerzo.

Para la resistencia en cortante se proporcionan también valores indicativos para las combinaciones más comunes de piezas y mortero. Para los casos no incluidos se especifica que la resistencia debe determinarse mediante la prueba de compresión diagonal en muretes; la que constituye un procedimiento relativamente sencillo y confiable (fig 2) que ha sido usado ampliamente en la investigación y en la práctica. Deberá tenerse cuidado en el manejo de los especímenes para no debilitar la junta entre piezas y morteros antes de la prueba.

En cuanto al módulo de elasticidad, este puede obtenerse de la curva esfuerzo-deformación medida en un ensayo de pilas en compresión. Una estimación aproximada se obtiene con los factores que multiplican a la resistencia en compresión proporcionados en el inciso 2.4.5. Estos factores se han incrementado con respecto a los que se proponían en la versión anterior de las normas, por considerar que se aplican a la resistencia de diseño la cual ya incorpora factores de seguridad importantes con respecto al valor promedio; estos factores de seguridad no se justifican en el módulo de elasticidad.

CAPITULO 3. SISTEMAS ESTRUCTURALES A BASE DE MUROS DE MAMPOSTERIA

En este capítulo, que no existía en la versión anterior, se han agrupado los requisitos que deben cumplir los muros para ser catalogados en algunas de las cuatro categorías consideradas en las normas.

Los muros diafragma son los que se colocan para cerrar las cruñas formadas por las vigas (o losas) y columnas de marcos de concreto o acero y constituyen un diafragma que incrementa notablemente la rigidez del conjunto ante cargas laterales. Es práctica común ligar estos muros a la estructura principal sobre todo en muros de colindancia y en núcleos de escaleras y servicios. No es admisible ignorar el efecto de estos muros en el análisis por cargas laterales, ya que la gran rigidez que estos proporcionan altera significativamente la distribución de las fuerzas entre los distintos elementos resistentes. Procedimientos prácticos para tomar en cuenta los muros diafragmas en el análisis de marcos se proponen en la ref 1. La gran rigidez que estos muros proporcionan hace que pueda ser perjudicial que se encuentren colocados con una distribución asimétrica en la planta de la estructura o en cantidades radicalmente distintas de uno a otro piso.

Cuando se excede de la capacidad en tensión diagonal de los muros, estos se agrietan pero mantienen una rigidez

significativa y tienden a concentrar fuerzas cortantes importantes en los extremos de las columnas (fig 3). Por ello se requiere proporcionar en estas zonas de las columnas una resistencia a fuerza cortante igual a la capacidad total del muro, distribuida en partes iguales entre las dos columnas.

Cuando no puede lograrse una distribución uniforme de muros de relleno o cuando la estructura es muy flexible, es preferible desligar estos muros de la estructura principal, evitando su trabajo como diafragma. Deben en este caso proveerse holcuras generosas y elementos de refuerzo o fijación que eviten la posibilidad de volteo del muro en dirección normal a su plano sin dejar de permitir el desplazamiento relativo del muro y la estructura. Nuevamente puede recurrirse a la ref 1 para detalles al respecto.

Los muros confinados, o sea los formados con castillos y dalas, han demostrado dar lugar a un comportamiento sísmico muy aceptable en edificios de muros de carga de varios pisos (fig 4). Estos elementos de refuerzo permiten una buena liga de los muros entre sí y con los sistemas de piso, a la vez que proporcionan un confinamiento que evita la falla frágil de los muros una vez que se agrietan por tensión diagonal. Los requisitos que se fijan para la distribución y refuerzo de castillos y dalas son los que se derivan de la práctica establecida. No se admite incremento alguno a la resistencia en cortante de la mampostería por la presencia de dalas y

castillos, solo un ligero aumento en la resistencia en compresión, según se establece en 2.4.1d). La única forma de incrementar la resistencia en cortante de la mampostería es con refuerzo horizontal colocado en la junta en la forma que se especifica en la sección 3.4.

El refuerzo de muros de piezas huecas con barras verticales colocadas en los huecos de las piezas y con barras horizontales ubicadas en las juntas entre hiladas o en piezas especiales, es un procedimiento de construcción que se está empleando con frecuencia en diversos países aun en zonas sísmicas y en edificios de cierta altura (fig 5). En México la difusión de este procedimiento, conocido como mampostería reforzada, ha sido limitada principalmente por la desconfianza de que puedan realizarse adecuadamente la colocación del refuerzo y el llenado de los huecos, operaciones que son difíciles de supervisar. Los requisitos que se especifican en las normas se derivan de lo que contienen los reglamentos de los EUA y de Nueva Zelanda; las cuantías de refuerzo horizontal y vertical especificadas son las mínimas para las cuales puede esperarse se logre evitar la falla frágil del muro y proporcionar cierta ductilidad. Nuevamente, no se pretende con estos refuerzos lograr un incremento sustancial en la resistencia de la mampostería, solamente un comportamiento más favorable. Es importante observar el requisito del párrafo final de esta sección, el cual indica que para poder emplear los valores de resistencia y factores de seguridad correspondientes a este tipo de mampostería es

en estructuras de vigas y columnas. Además la heterogeneidad de los materiales componentes, las holguras y los aplastamientos y agrietamientos locales entre mortero y piezas y entre estas y el concreto hacen que existan deformaciones inelásticas desde niveles pequeños de carga, lo que altera los resultados de los análisis elásticos. Por ello es aceptable recurrir a simplificaciones drásticas basadas en consideraciones de equilibrio y en la experiencia de comportamiento adecuado.

Para el análisis por cargas verticales es válido suponer que la junta entre muro y losa tiene suficiente capacidad de rotación para liberar al muro de los momentos que podría transmitir la losa debido a la asimetría de la carga vertical y se puede considerar que el muro está sujeto a carga vertical únicamente. Deben, sin embargo, tomarse en cuenta los momentos que no pueden ser redistribuidos por la rotación de la losa, como los que son debidos a voladizos empotrados en el muro o a una posición excéntrica del muro del piso superior, y, en muros extremos, por la excentricidad de la carga que transmite la losa que se apoya directamente sobre el muro, mediante el criterio ilustrado en la fig 6.

Es muy recomendable que la estructura cumpla los requisitos indicados en los incisos a) hasta d) de esta sección, para evitar situaciones que puedan dar lugar a la aparición de momentos flexionantes importantes o a efectos de esbeltez significativos. Cuando se cumplen dichos requisitos basta

determinar las cargas verticales sobre cada tramo de muro mediante una bajada de carga convencional y tomar en cuenta los efectos de esbeltez y excentricidad mediante el factor correctivo, F_E , que se determina directamente con las reglas indicadas en 4.2.2.

El análisis por cargas laterales enfrenta también dificultades para modelar al sistema tridimensional. En la referencia 1 se encuentran recomendaciones detalladas y ejemplos al respecto. El procedimiento más idóneo es el de modelar los muros como columnas anchas con el mismo momento de inercia y área de cortante que los muros. Estas columnas están acopladas por vigas con el momento de inercia de la losa en un ancho equivalente, al cual deberá sumarse el momento de inercia de pretilas y dinteles.

Nuevamente es muy recomendable que la estructuración de las construcciones de muros de carga de mampostería cumpla con los requisitos de las fracciones I a III del inciso 4.1.3, para que sea aplicable el método simplificado de análisis sísmico según el cual se ignoran las deformaciones de flexión y se asigna a cada muro una fracción de la carga lateral que es proporcional a su área transversal, solo se requiere revisar la capacidad a cortante de los muros y se admite ignorar los efectos de torsión. Aunque la hipótesis de que pueden ignorarse las deformaciones de flexión y los momentos de volteo parece poco fundada cuando la relación altura a ancho de los muros no es muy

baja, el comportamiento observado de edificios diseñados con este método ha sido excelente y es indudable que la cantidad de área transversal de muros que se tiene en cada dirección es el parámetro decisivo en definir la capacidad sísmica de construcciones de este tipo.

4.2 Resistencia a cargas verticales

La expresión para el cálculo de la carga vertical resistente es la misma de la versión anterior; según ella la capacidad es igual al área transversal del muro por el esfuerzo resistente en compresión de la mampostería; el producto es afectado por un coeficiente de reducción que toma en cuenta las diferencias en excentricidad y esbeltez entre un muro y la pila en que se basa la determinación de f^* . El resultado debe multiplicarse por el factor de resistencia que se considera igual a 0.6 para muros confinados o reforzados interiormente y a 0.3 para muros no reforzados, ya que en estos últimos se requiere de un factor de seguridad muy superior por el carácter frágil de su falla y por su sensibilidad a los efectos accidentales.

Cuando se cumplen los requisitos de regularidad y de relaciones geométricas anteriormente mencionados pueden usarse los valores directamente especificados para el factor por excentricidad y esbeltez, F_E , según se trate de muros interiores o exteriores. En caso contrario, F_E debe determinarse con una expresión que es más sencilla que la de la versión anterior y que está derivada

de la que tradicionalmente se ha aplicado para el diseño por carga vertical de muros de concreto. La expresión de la versión anterior se ha eliminado porque daba lugar a la posibilidad de resultados poco confiables cuando no se elegían adecuadamente los parámetros de momento de inercia, módulo de elasticidad y otros.

Para muros con refuerzo vertical con una cuantía significativa y colocado de manera adecuada, se pueden obtener incrementos sustanciales en la capacidad de carga vertical calculada si se aplica el criterio general de 4.2.4 que corresponde a las hipótesis comúnmente adoptadas para el diseño en flexocompresión de elementos de concreto reforzado.

4.3 Resistencia a cargas laterales

Las expresiones para el cálculo de la resistencia a fuerza cortante de muros no han cambiado con respecto a la versión anterior. Para los muros diafragma el esfuerzo medio resistente es 85 por ciento del que corresponde a muretes, v^* , ya que la distribución de esfuerzos en el muro es muy similar a la que se obtiene en los ensayos de muretes; la reducción es esencialmente por el efecto desfavorable del mayor tamaño del muro. Para los otros muros, sean confinados, reforzados interiormente o no reforzados, el esfuerzo resistente se reduce a la mitad del obtenido en muretes, por el efecto desfavorable de los esfuerzos de tensión por flexión. Sin embargo este esfuerzo resistente

puede incrementarse hasta tres veces cuando se toma en cuenta el efecto favorable de la carga axial de compresión que contrarresta los esfuerzos de tensión generados por el cortante y por la flexión.

El factor de reducción, F_R , se ha incrementado de 0.6 a 0.7 tomando en cuenta que en los sismos de 1985 la mampostería mostró tener una resistencia significativamente superior a la calculada.

Las dalas y castillos que se colocan en la mampostería confinada tienen por objeto proporcionar cierta ductilidad a los muros pero no modifican significativamente la carga que produce el agrietamiento diagonal del muro y, aunque aumentan la capacidad máxima, este incremento se pierde cuando se aplican ciclos de carga alternadas. Por tanto no se admite incremento de capacidad por este concepto. De manera similar el refuerzo vertical y horizontal mínimo que se requiere colocar en los muros de mampostería con refuerzo interior no modifica sustancialmente la carga de agrietamiento diagonal, solo permite mantener esa capacidad para deformaciones algo mayores que la de agrietamiento, aun cuando estas se repiten cierto número de veces.

Los ensayos realizados en muros de distintas características (ref 2) muestran que para poder sostener cargas superiores a la de agrietamiento diagonal se requiere de refuerzo horizontal en

el muro. Es por ello que se admite, tanto en la mampostería confinada como en la reforzada interiormente, un incremento de 25% en la capacidad a cortante cuando se coloque una cuantía de refuerzo horizontal, igual al menos a la que se obtiene en la ecuación propuesta en esa sección.

Es importante recordar que las cargas laterales producen no solo fuerzas cortantes en los muros, sino también momentos flexionantes en el plano del muro los que frecuentemente requieren la colocación de refuerzo vertical en los extremos del muro. Los resultados experimentales han demostrado que el criterio general cálculo de la capacidad en flexocompresión de elementos de concreto reforzado es válido para la mampostería. Para evitar la complejidad de la determinación de la capacidad con el criterio general, se admite el uso de las expresiones expuestas en 4.3.3, las que se deducen de algunas hipótesis simplificativas sobre las condiciones de falla y de la suposición que el diagrama de interacción para flexocompresión está formado por tramos rectos entre el punto de flexión pura y el de falla balanceada, así como entre este y el de carga axial.

CAPITULO 5. CONSTRUCCION

Los requisitos de este capítulo se basan en la práctica de México y los EUA para garantizar una calidad aceptable de los materiales y de la ejecución de la obra. No se han hecho modificaciones importantes a la versión anterior. Cabe realizar

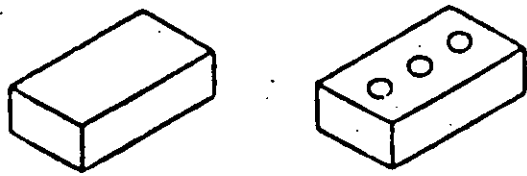
la necesidad de una supervisión continua y calificada especialmente en la construcción de muros de mampostería reforzada.

CAPITULO 6. MAMPOSTERIA DE PIEDRAS NATURALES

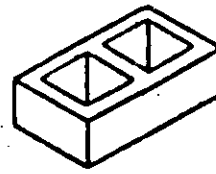
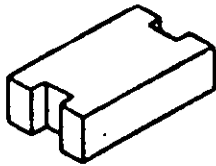
Tampoco este capítulo ha sido modificado con respecto a la versión anterior. El procedimiento de cálculo de la resistencia es congruente con el que se especifica para la mampostería de piedras artificiales. La información de que se dispone sobre las propiedades mecánicas de la mampostería es muy escasa. Los valores propuestos se suponen conservadores para la calidad de la mampostería comúnmente usada en México.

REFERENCIAS

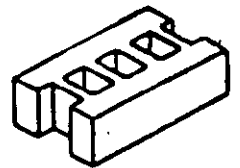
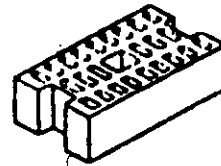
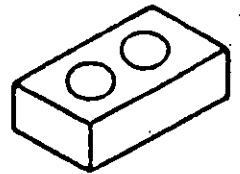
1. Bazán, E. y R. Meli "Manual de Diseño Sísmico de Edificios" LIMUSA, México, 1985, 241 pp
2. Hernández, O. y R. Meli "Modalidades de refuerzo para mejorar el comportamiento sísmico de muros de mampostería" Instituto de Ingeniería, UNAM, Publ No. 382, México, D.F., dic 1976, 32 pp.



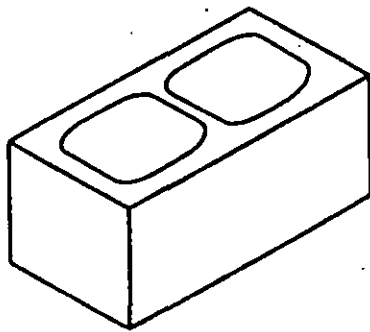
a) Ladrillos de barro macizos



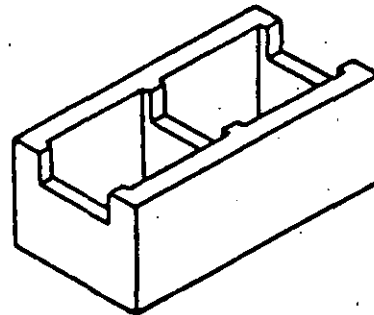
b) Ladrillos de barro huecos



24
 macizo es un ladrillo
 s/o de huecos < 25%



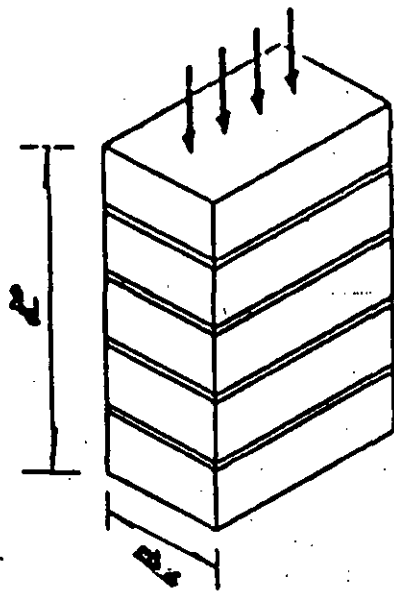
1) Piezo estándar



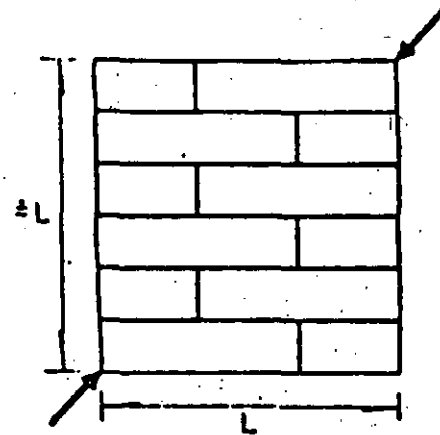
b) Piezo para refuerzo horizontal

c) Bloque de concreto

Fig 1 Tipos comunes de piezas para mampostería



a) Compresión simple



b) Compresión diagonal

25

Fig 2 Ensayes para determinación de propiedades mecánicas de la mampostería

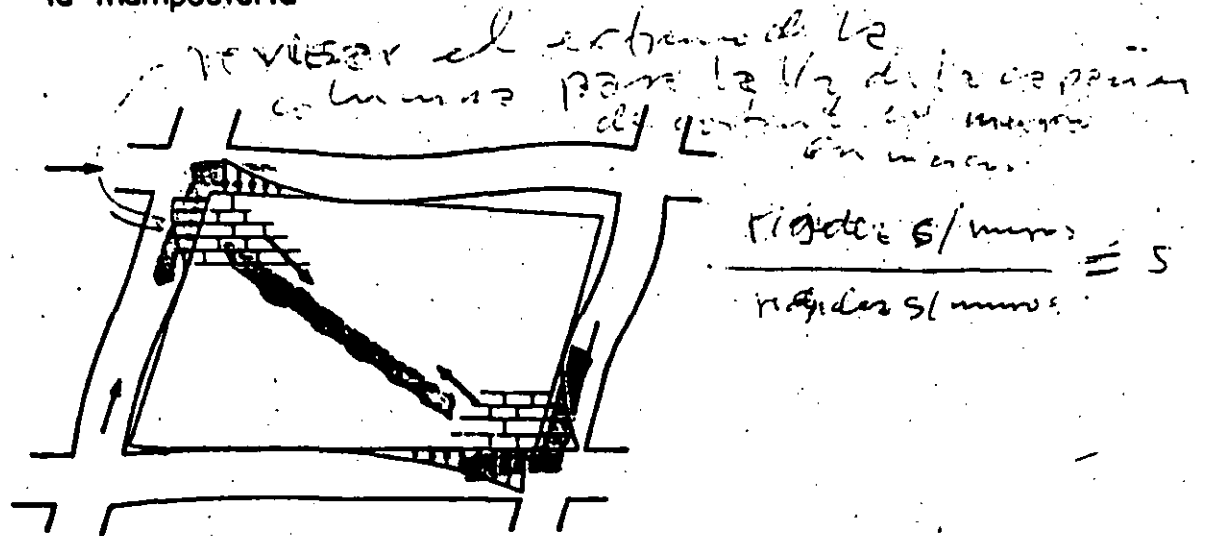
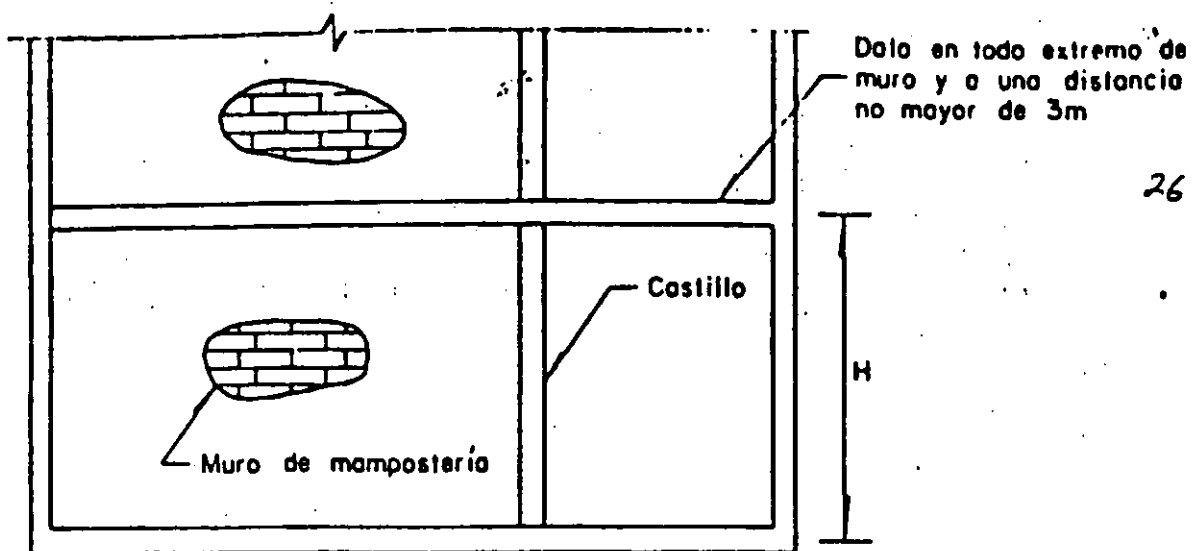
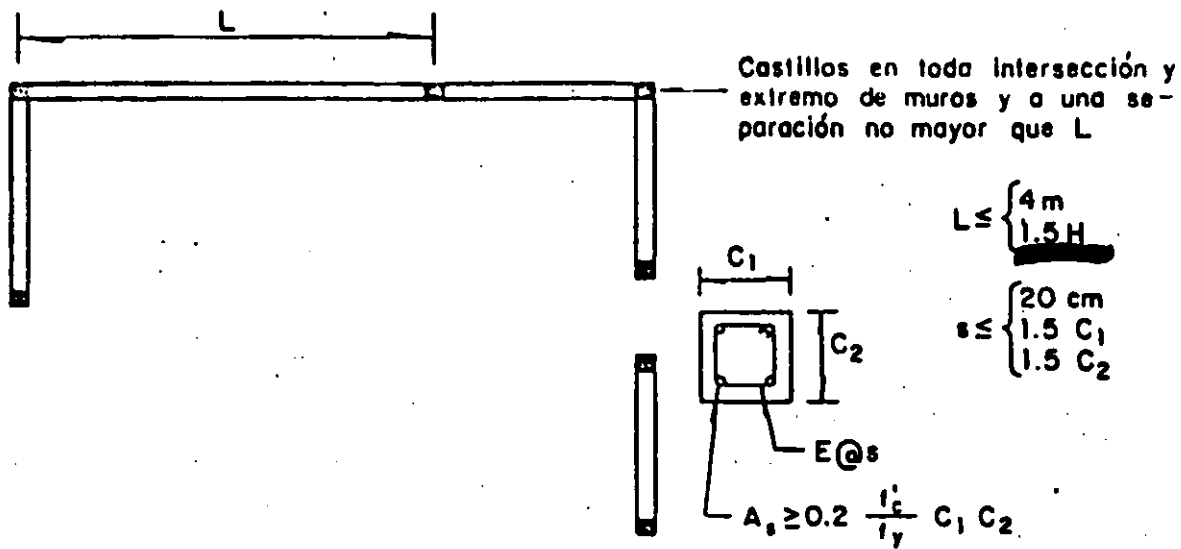


Fig 3 Interacción entre un muro-diafragma y el marco que lo rodea

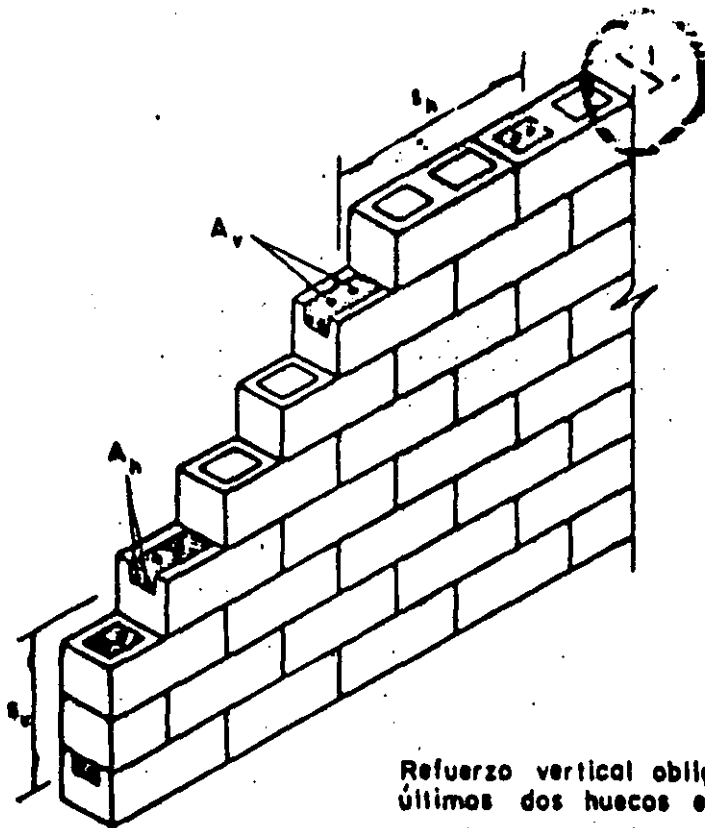


Distribución en elevación de elementos de refuerzo, verticales (castillos) y horizontales (dalas)



Distribución en planta de elementos verticales de refuerzo (castillos)

Fig 4 Características de la mampostería confinada



$$P_h = \frac{A_h}{s_v l}$$

$$P_v = \frac{A_v}{s_h l}$$

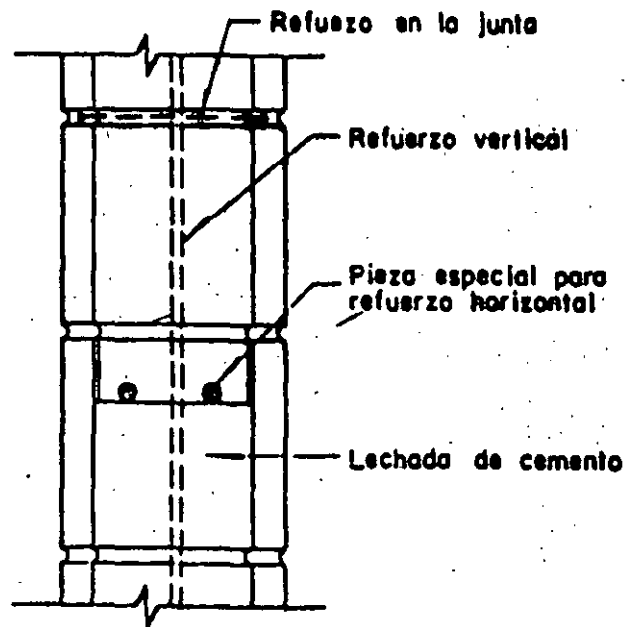
$$P_h, P_v \geq 0.0007$$

$$P_h + P_v \geq 0.0020$$

$$s_h, s_v \leq \begin{cases} 61 \\ 60 \text{ cm} \end{cases}$$

Reforzo vertical obligatorio en los últimos dos huecos extremos

a) Requisitos de refuerzo



b) Modalidades de colocación del refuerzo

Fig 5 Características de la mampostería reforzada

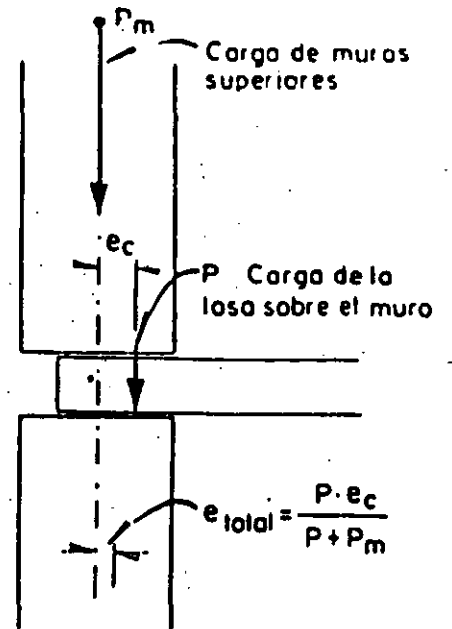
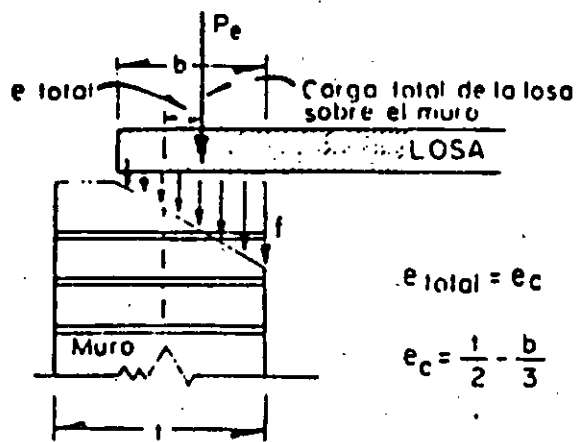


Fig 6 Excentricidad de la carga vertical transmitida a un muro



**FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA**

CURSOS ABIERTOS

XX CURSO INTERNACIONAL DE INGENIERIA SISMICA

*MODULO III:
DISEÑO SISMICOS DE EDIFICIOS*

A N E X O

AUTOR Y PROFESOR:

DR. HERNANDEZ BASILIO

ANEXO

En el artículo se dan diversos criterios generales para mejorar el comportamiento, principalmente ante sismo, de construcciones sin refuerzo construidos con adobe, piedra y tabique. A continuación se darán reglas conservadoras que asegurarán la supervivencia de una construcción tipo rural; así como un método para realizar un análisis simplificado de este tipo de construcciones

A) Relaciones geométricas.

La tabla que a continuación se muestra limita la geometría de la construcción en función de los parámetros H/t (relación de altura a espesor de muros) y $L/2t$ (longitud entre soportes del muro al doble de su espesor). Conviene recordar que se debe buscar la simetría en la construcción.

VALORES MAXIMOS DE H/t o $L/2t$

Peso del techo, en kg/m^2	SIN REFUERZO		CON CADENA DE CONCRETO	
	I	II	I	II
≤ 50	4.1	2.9	9.1	6.5
≤ 150	3.4	2.4	7.7	5.5
< 500	2.9	2.0	6.6	4.7

Estos valores son resultado de análisis teóricos desarrollados en la referencia "Seguridad de casas de adobe ante sismos", publicada por el Instituto de Ingeniería de la UNAM. El caso II es para construcciones situadas en la zona de más alta intensidad del país (costa del pacífico, abarca los estados de Michoacán, Guerrero, Oaxaca y Chiapas), mientras que el caso I sería aplicable a zonas de moderada intensidad sísmica.

Si se emplean las relaciones anteriores se asegura que las construcciones serán capaces de soportar el sismo de diseño de las zonas correspondientes.

Este es un procedimiento conservador pero que se considera puede ser de gran ayuda para reducir los daños, cada vez mayores, que se presentan en construcciones de adobe.

B) Procedimiento de análisis

- a) Determinar el coeficiente sísmico, C_s , de la zona y tipo de suelo donde se construirá; se pueden tomar los que se muestran en la siguiente figura

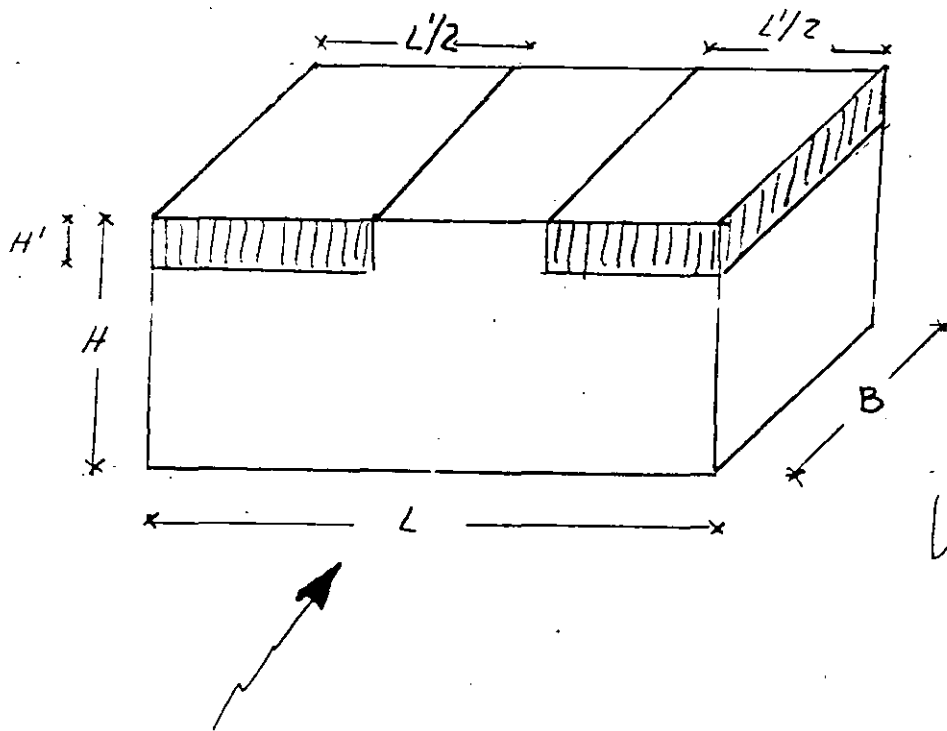


b) Se calcula la fuerza cortante en los muros alineados en la dirección que se está analizando

$$V = C_s W' / Q$$

Q es el factor de reducción por ductilidad que toma el valor 1 si la construcción no tiene ningún tipo de refuerzo, y 1.5 si tiene al menos una cadena de concreto en su parte superior.

W' es el peso de la construcción que incluye el peso del techo, de la cadena de concreto (si la hay) y parte de los muros (parte se apoya directamente en el suelo). Para evaluar W' se calcula el peso de los materiales incluidos dentro de los siguientes límites.



en casas sin refuerzo

$$L' = 2H^2/L \leq L ; H' = H/4$$

en casas con cadena de concreto

$$L' = 3H^2/L \leq L ; H' = H/3$$

cuando se tiene un techo rígido

$$L' = L ; H' = 3H/5$$

$$V = C_s W'$$

Este análisis se debe hacer para cada cuarto que forme a la construcción. En muros intermedios se asigna el 60% del valor calculado y 40% al muro exterior; si no hay muros intermedios cada muro extremo debe resistir el 50% de V. Se debe considerar la reducción de resistencia del muro cuando su relación $h/b > 1.33$, disminuyendo su área por el factor $(1.33 \frac{b}{h})^2$.

- c) Se compara el esfuerzo actuante en el muro con el resistente, que conservadoramente se puede tomar como $v_r = 0.4 \text{ Kg/cm}^2$.
- d) Se revisa que los esfuerzos por flexión en el adobe no rebasen el permisible ($f_t^* = 1 \text{ kg/cm}^2$); esto se puede hacer aplicando el siguiente procedimiento:

1. Se calcula el momento flexionante en los extremos del muro

$$M = C_s w X^2/K$$

K = 20 si existe cadena de concreto o 5 si no tiene refuerzo

X H o L/2, el menor

W carga por unidad de longitud en el muro, incluye: peso unitario del muro, la mitad del peso del techo y el de la viga de concreto (si es que existe)

2. Se valúa el esfuerzo de flexión

$$f_t = M/S \quad S = t^2/6$$

3. Se debe cumplir

$$f_t < f_t^*$$



FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA

CURSOS ABIERTOS
XXI CURSO INTERNACIONAL DE INGENIERIA SISMICA .

MODULO III DISEÑO SISMICO DE EDIFICIOS

TEMA: DISEÑO SISMICO DE ESTRUCTURAS DE CONCRETO

EXPOSITOR: DR. OSCAR LOPEZ BATIZ

**DIVISION DE EDUCACION CONTINUA
FACULTAD DE INGENIERIA
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO**

XXI INTERNACIONAL DE INGENIERIA SISMICA

MODULO III: DISEÑO SISMICO DE EDIFICIOS

TEMA: Comportamiento Sísmico de Estructuras de Concreto

Oscar A. López Bátiz
Investigación: CENAPRED
DEPFI - UNAM

Referencia de las notas presentadas para el tema.

1. Oscar López Bátiz: "Estructuras de Concreto Reforzado (I). Aspectos fundamentales sobre elementos viga y columna, comentarios sobre estructuras de cimentación"; Curso: Seguridad Sísmica de las construcciones para directores responsables de obra, CENAPRED, Sep. 1994.
2. Sergio M. Alcocer: "Comportamiento y Diseño de Estructuras de Concreto Reforzado. Muros Estructurales"; Curso: Seguridad Sísmica de las construcciones para directores responsables de obra, CENAPRED, Sep. 1994.
3. Sergio M. Alcocer: "Comportamiento y Diseño de Estructuras de Concreto Reforzado. Uniones de Elementos"; Curso: Seguridad Sísmica de las construcciones para directores responsables de obra, CENAPRED, Sep. 1994.
4. Vitelmo V. Bertero; "Seismic Behavior of Structural Concrete Linear Elements (Beams, Columns), and Their Connections"; Comité Euro-International du Béton. Bulletin d'Information No. 131. AICAP-CEB Symposium, Rome, Mai 1979, Vol.1. State of the Art Reports.
5. Oscar López Bátiz: "Avances en el Diseño Sísmico de Estructuras de Concreto Reforzado. Procedimiento de Diseño por Resistencia Última en Estructuras de Concreto Reforzado".

ESTRUCTURAS DE CONCRETO REFORZADO (I)

Aspectos fundamentales sobre elementos viga y columna, comentarios sobre estructuras de cimentación

Oscar López Bátiz

CENAPRED

Delfin Madrigal 665, Coyoacán D.F.

1. Introducción.

Las estructuras de concreto reforzado son estructuras heterogéneas producto de la combinación o mezcla de materiales con características diferentes como son el concreto y el acero de refuerzo, los procedimientos de diseño para estas estructuras consideran las propiedades de estos materiales en sus planteamientos. El uso del concreto reforzado comenzó en la segunda mitad del siglo XIX, desde los inicios de su empleo hasta la actualidad, la calidad de ambos materiales se ha incrementado, también las tecnologías de construcción y los procedimientos de diseño han avanzado de manera que las estructuras de concreto reforzado son de reconocida importancia en los ámbitos arquitectónico e ingenieril. Principalmente, en las décadas recientes los avances en el conocimiento sobre el comportamiento de los materiales y las estructuras de concreto reforzado han sido importantes.

Entre las propiedades importantes del concreto reforzado se encuentran la gran resistencia al fuego y efectos de intemperismo, la estabilidad de su durabilidad, el poco costo que requiere la supervisión durante su construcción, la versatilidad para su empleo en formas arquitectónicas caprichosas, propiedades que constituyen la fuerza que genera avances en la tecnología y conocimientos sobre el concreto reforzado. Así, a partir del inicio del siglo XX, prácticamente cada país cuenta con códigos y manuales propios para diseño y construcción de este tipo de estructuras. Para lograr los códigos y manuales actuales para estructuras de concreto reforzado, en su elaboración y modificación se han incorporado tanto los materiales y técnicas comúnmente empleados, como aquellos avances logrados sobre calidad de los materiales y sobre las tecnologías de diseño y construcción. Sin embargo, debido a la velocidad con que se logran materiales nuevos y de mejor calidad, a la rapidez con que aparecen nuevas tecnologías en procesos constructivos y métodos de análisis estructural, surge la necesidad de revisar con mayor frecuencia la normatividad de diseño y construcción para este tipo de estructuras.

Respecto a procedimientos o métodos para diseño estructural de estructuras de concreto reforzado, a partir de 1953 el Comité Europeo del Concreto (CEB) inició un proceso de revisión de sus códigos y manuales. Durante los años 1964 y 1970, este comité introdujo un procedimiento nuevo, consistente en el diseño racional basado en la teoría de probabilidades y confiabilidad estructural.

Posterior a una recopilación de información experimental y teórica, se le dio forma a la última versión del código en 1991. Sin embargo, la muestra de información experimental todavía no es suficiente, provocando que el código CEB-1991 se constituya como una filosofía de diseño a considerar o una opción para desarrollar un diseño estructural lógico y razonado.

Los objetivos del diseño estructural, son proporcionar al dueño un inmueble que cubra las necesidades y con las características que desea, generalmente esas necesidades pueden resumirse como:

- 1) Asegurar, con una estructura, el proporcionamiento de un espacio vital para un propósito determinado.
- 2) Durante el período de vida útil, dicha estructura deberá satisfacer las condiciones de servicio para las que fue creada.
- 3) Los costos de construcción y mantenimiento, entre otros que conforman el costo total del inmueble, deberán tender a la optimización.

Respecto al segundo punto, las condiciones y características que deberá cubrir la estructura a diseñar variarán dependiendo de la función que se asigne al inmueble. En condiciones de servicio, una estructura deberá mantener su

estabilidad ante grandes deformaciones y vibraciones. En el caso de estructuras de concreto reforzado, donde la presencia de grietas de gran apertura facilitaría el efecto del intemperismo en el acero de refuerzo y la consecuente degradación de resistencia y rigidez, es necesario limitar el ancho máximo de grieta dentro de un valor determinado, el cual es considerado al plantear las formulaciones de resistencia en los códigos y reglamentos. De igual manera, las condiciones de servicio de una estructura deberán mantenerse ante la incidencia de carga cíclica, como son los casos del sismo y el viento.

Ante carga sísmica o de viento, el diseño de las estructuras se plantea para que mantenga su estabilidad total ante la incidencia de la carga o efecto máximo esperado durante el periodo de vida útil del inmueble por efecto de dichos fenómenos naturales.

2. Materiales.

2.1 Concreto.

Dentro de las Características mecánicas que posee el concreto, la de mayor importancia es la resistencia a la compresión axial (σ_b). Las resistencias a tensión, flexión, cortante, de adherencia, así como el módulo de elasticidad del concreto, presentan una fuerte relación con la resistencia a la compresión axial, por lo que se considera a esta propiedad como la representativa del concreto.

Cuando al concreto se le sujeta a esfuerzos monotónicamente crecientes, la estructura del mismo va sufriendo de fracturamiento en su estructura interna, por lo que la curva esfuerzo-deformación de este material se presenta como la mostrada en la Fig.1, en esta figura la curva presenta una pendiente que decrece a mayor esfuerzo y, aproximadamente a 0.2% de deformación se alcanza la resistencia máxima a compresión del material, posterior a esta deformación los esfuerzos en el concreto decrecen con rapidez alcanzándose el aplastamiento a una deformación unitaria de 0.3 a 0.4 %.

Debido a que la curva esfuerzo-deformación del concreto no es lineal, para determinar el módulo de elasticidad del material existen diferentes procedimientos. Un procedimiento comúnmente empleado es definir el módulo de elasticidad del concreto a partir de la curva esfuerzo-deformación, definiéndose como la pendiente de la secante al origen del punto de la curva para un esfuerzo de 1/3 la resistencia a compresión. También, el módulo de elasticidad del concreto se define en la mayoría de los códigos y reglamentos de diseño como función de la resistencia a compresión registrada en un ensaye uniaxial, y sin considerar el efecto de creep en el material se definen las siguientes ecuaciones:

$$\text{RDF} \quad E_c = 14000 \times (\sigma_b)^{0.5} \quad (\text{kg} \cdot \text{cm}^{-2})$$

$$\text{ACI} \quad E_c = \gamma^{1.5} \times 0.14 (\sigma_b)^{0.5} \quad (\text{kgf/cm}^2, \text{ para valores } \gamma = 1440 \text{ a } 2480 \text{ kgf/m}^3)$$

$$\text{AIJ} \quad E_c = 2.1 \times 10^5 \times (\gamma \cdot 2.3)^{1.5} \times (\sigma_b / 200)^{0.5} \quad (\text{kgf/cm}^2)$$

donde: RDF: Reglamento del Distrito Federal, México; ACI: Reglamento del Instituto del Concreto de los Estados Unidos de Norteamérica; AIJ: Reglamento del Instituto de Arquitectos de Japón; E_c : módulo de elasticidad del concreto; γ : peso volumétrico del concreto.

La resistencia a tensión del concreto tiene estrecha relación con la resistencia a compresión, para resistencias a la compresión entre 180 y 240 kgf/cm^2 la resistencia a tensión generalmente se considera como 1/10 de la resistencia a compresión obtenida de pruebas uniaxiales en cilindros estándar.

La resistencia a compresión del concreto y su capacidad de deformación varían notoriamente de acuerdo a los esfuerzos confinantes a los que esté sujeto el material. Así, en la Fig.2, se presentan los resultados de pruebas a compresión realizadas en cilindros de concreto sujetos a esfuerzos confinantes proporcionados con líquido dentro de una cámara triaxial. Se observa un incremento notable de la resistencia a compresión de los cilindros, sin embargo, al considerar el concreto dentro de un elemento estructural donde el confinamiento se lo proporcione el acero de refuerzo longitudinal y principalmente transversal, la distribución de esfuerzos confinantes no presenta la misma

uniformidad que la distribución proporcionada por el líquido y genera resultados como los presentados en la Fig.3, donde es evidente también que el efecto confinante del refuerzo en el concreto es importante para incrementar la resistencia a compresión y capacidad de deformación del mismo.

2.2 Acero.

El acero de refuerzo empleado en estructuras de concreto reforzado se puede dividir, por su forma, en corrugado y liso. Por sus mejores características de adherencia con el concreto, generalmente se emplea el acero corrugado.

Las características esfuerzo - deformación del acero estructural, en pruebas a tensión uniaxial, son como la mostrada en la Fig.4. Hasta el punto de fluencia, la relación es aproximadamente lineal. Independientemente de la resistencia a la fluencia y del proceso de producción, el módulo de elasticidad se puede considerar igual a $2.1 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$. Como se muestra en la Fig.4(a), en barras forjadas en caliente, la curva esfuerzo - deformación presenta un punto de fluencia bien definido aproximadamente a 0.2 % de deformación unitaria, posteriormente sigue una plasticidad de fluencia y para deformaciones unitarias entre 1.5 y 2.0 % se presenta el fenómeno conocido como endurecimiento por deformación, aumentando la resistencia de la barra de acero. Para el caso de barras de acero forjadas en frío, como se indica en la Fig.4(b), no se presenta un punto de fluencia bien definido.

Para el diseño de elementos estructurales comúnmente empleados en estructuras arquitectónicas, considerando los niveles de deformación a los que se verán sujetos y eliminando los elementos de claro corto, puede asumirse que las barras de acero estructural no incursionarán en el rango de endurecimiento por deformación. Por lo que generalmente se considera a las características esfuerzo - deformación en el acero estructural como perfectamente elasto - plásticas, igual a las mostradas en la Fig.5.

En el caso de barras de acero de alta resistencia, como se indica en la Fig.6, generalmente a mayor resistencia menor es la capacidad de deformación inelástica, menor su capacidad de alargamiento, menores sus cualidades para traslape, por lo que para su empleo se requiere de cuidados y estudios especiales. Es por esto que al diseñar estructuras de concreto reforzado, no es posible generalizar que para mayor resistencia a la fluencia del acero de refuerzo, el diseño resultante tendrá un mayor factor de seguridad.

3. Comportamiento de elementos lineales a flexión (vigas) y flexocompresión (columnas).

3.1 Comportamiento de elementos sujetos a flexión.

El comportamiento de las estructuras de concreto reforzado se basa en el comportamiento básico de los materiales que lo constituyen. Es por eso que ante la poca capacidad del concreto a resistir esfuerzos de tensión, se cuenta con el refuerzo de las barras de acero. Así, ante los efectos de flexión, los esfuerzos axiales de compresión serán soportados por el concreto, y los esfuerzos axiales de tensión serán soportados por el acero de refuerzo.

Generalmente, cuando se realiza el análisis de esfuerzos de un elemento a flexión, como concepto básico se deben satisfacer ciertas condiciones como son: "compatibilidad de deformaciones", "equilibrio de fuerzas en la sección de análisis" y "las características esfuerzo - deformación de los materiales involucrados".

3.1.1 Hipótesis básicas de comportamiento para un análisis de flexión

a) Las secciones planas permanecen planas posterior a la flexión (condición de compatibilidad de deformaciones). También denominado principio de Bernoulli, el cual plantea que las deformaciones longitudinales sigue una distribución triangular, que las deformaciones en cualquier punto de la sección transversal son proporcionales a la distancia respecto al eje neutro y que existe una adherencia perfecta entre acero y concreto.

b) Se conoce la curva esfuerzo - deformación del acero y del concreto (características esfuerzo - deformación de los materiales). Aunque los materiales se encuentran bajo un estado de esfuerzos multiaxial, para definir las características esfuerzo - deformación se consideran resultados de pruebas donde se sujetó al material a un estado de esfuerzos uniaxiales.

c) Los esfuerzos internos están en equilibrio con las fuerzas externas (equilibrio de fuerzas en la sección de análisis). Las fuerzas resultantes del estado de esfuerzos en la sección transversal deberá estar en equilibrio con los elementos

la calidad estructural del elemento son la capacidad de deformación (considerada como la ductilidad del elemento) y su capacidad para disipar energía incidente ante carga monotónicamente creciente o cíclica.

La ductilidad o capacidad de deformación post-fluencia, se define como la relación entre la deformación (curvatura) última alcanzada y la deformación (curvatura) al punto de fluencia:

$$\mu = \phi_u / \phi_y$$

Asumiendo una relación esfuerzo-deformación, se determina la posición del eje neutro al alcanzar el momento de fluencia en la sección (c_1). Por relaciones trigonométricas se define la curvatura a la fluencia como se indica:

$$\phi_y = \epsilon_y / d (1 - c_1)$$

donde, ϵ_y : deformación unitaria a la fluencia por tensión en el acero de refuerzo.

Siguiendo un procedimiento similar se determina la posición del eje neutro al alcanzar la resistencia última de flexión (c_{1u}), y se determina la curvatura última de la sección transversal:

$$\phi_u = \epsilon_{cu} / (c_{1u} \times d)$$

donde: ϵ_{cu} : es la deformación unitaria en la fibra extrema del concreto a compresión en la sección transversal.

Para secciones transversales rectangulares se pueden definir las expresiones para el cálculo de la posición del eje neutro medido desde la fibra a compresión, c_1 y c_{1u} , como se muestra:

$$c_1 = [(n \times p_t)^2 + 2 \times n \times p_t]^{0.5} - n \times p_t$$

$$c_{1u} = (p_t - p_c) f_y / \sigma_B$$

donde, $n = E_s/E_c$, E_s es el módulo de elasticidad del acero de refuerzo y E_c es el módulo de elasticidad del concreto; p_t : cantidad de acero de refuerzo a tensión ($= A_{st} / b \times d$); p_c : cantidad de acero de refuerzo a compresión ($= A_{sc} / b \times d$).

Analizando la última expresión, se aprecia que la presencia del acero de refuerzo a compresión, contribuye a disminuir la localización del eje neutro respecto a la fibra extrema a compresión, provocando un aumento en la curvatura última y por tanto mayor capacidad de deformación. La ductilidad de la sección transversal se puede definir entonces:

$$\mu = \phi_u / \phi_y = \epsilon_{cu} (1 - c_1) / \epsilon_y (c_{1u})$$

Definiendo al parámetro "Índice de refuerzo $q (= [p_t - p_c] f_y / \sigma_B)$ " y, por medio de las expresiones para determinar c_1 , c_{1u} y μ , se establece una relación entre este índice de refuerzo q y la ductilidad de la sección transversal analizada μ , se obtienen gráficas como las mostradas en la Fig.9. De la gráfica se entiende lo siguiente: a) a menor valor del índice de refuerzo, la capacidad de ductilidad del elemento aumenta; b) a mayor cantidad de acero de refuerzo en la zona a compresión, mayor será la capacidad de deformación post-fluencia del elemento; c) conjugando adecuadamente los dos aspectos anteriores, se puede asegurar que un elemento presente falla por flexión con suficiente capacidad de deformación post-fluencia (ductilidad).

La capacidad de absorber energía por medio de deformación se puede cuantificar, de una relación momento-curvatura monotónicamente creciente como la de la Fig.8, como el área comprendida bajo dicha curva.

Considerando un segmento de longitud unitaria del elemento estructural, cuyo comportamiento se asume elasto-plástico perfecto, la energía absorbida por deformación se puede representar con la siguiente expresión:

$$U = \sigma_B \times b \times d [\epsilon_{cu} - c_{1u} \times \epsilon_y / 2 (1 - c_{1u})] (1 - 0.425 c_{1u})$$

Analizando la expresión anterior se puede concluir que el incremento de las dimensiones de la sección transversal y la resistencia a la compresión del concreto, afectan en proporción directa el incremento en la capacidad de absorción de energía del elemento. Igualmente, incrementado la deformación unitaria última del concreto en la sección transversal, lo que se puede lograr con mayor y mejor colocación del acero de refuerzo lateral, se obtiene el efecto de incrementar la capacidad de deformación post-fluencia y, por lo tanto, la capacidad de absorción de energía es mayor. Comparativamente con los parámetros anteriores, incrementos en p_c y f'_c no presentan un efecto directo en la capacidad de deformación y de absorción de energía de los elementos estructurales. De la expresión para el cálculo de c_{10} se concluye que aumentando la cantidad de acero a compresión el valor de c_{10} disminuye, lo que repercute en incrementar la capacidad de absorber energía del elemento.

Cabe mencionar que los factores antes citados tienen un efecto similar en elementos sujetos a efectos de flexo-compresión. En el caso de estos últimos, resulta también de gran importancia el confinamiento adecuado del concreto del núcleo y el proporcionar límites permisibles de carga axial.

3.2 Comportamiento de elementos sujetos a flexocompresión.

En estructuras a base de marco momento resistentes, los elementos columna en la mayoría de los casos estarán sujetos a carga axial y momento flexionante (uniaxial y biaxial). En otros casos, aunque teóricamente la columna este sujeta únicamente a carga axial, por problemas de control de calidad en la etapa constructiva se generan desviaciones en el dimensionamiento y distribución de las secciones transversales, provocando excentricidad de la carga axial respecto al eje del elemento, lo que genera momento flexionante a considerar en el diseño de dicho elemento.

Respecto a las hipótesis básicas para análisis de elementos sujetos a flexo-compresión, estas son exactamente las mismas que aquellas consideradas para elementos bajo flexión simple.

3.2.1 Diagrama de interacción.

La resistencia de la sección transversal a una fuerza de compresión, se reduce con la presencia del momento flexionante. El diagrama de interacción representa el lugar geométrico de los puntos que indican la carga axial y momento flexionante que provocan que un elemento alcance su resistencia última (deformación unitaria última en la fibra extrema a compresión de la sección transversal), su representación gráfica se muestra en la Fig. 10. Así, para una curva de interacción determinada, si la columna esta sujeta a una combinación de momento flexionante y carga axial que esté en el interior de dicha curva, el elemento se encuentra del lado de la seguridad. Contrariamente, si la combinación está fuera de la curva, la columna estará propensa a la falla.

Como se muestra en la Fig. 10, existen tres puntos importantes que definen las características de resistencia en el diagrama de interacción de una columna. El punto localizado donde el diagrama interseca al eje vertical, corresponde a una columna sujeta únicamente a compresión axial, pero producto de la excentricidad existente por problemas intrínsecos al proceso de construcción, se recomienda para diseño el uso de un valor mínimo de excentricidad de diseño (e_{min}), dando como resultado una disminución de la resistencia por compresión hasta alcanzar la curva original en el punto A. El punto B representa el estado de falla denominado "falla balanceada", en el cual la deformación unitaria última en el concreto a compresión se alcanza al mismo tiempo que el acero de refuerzo fluye a tensión. Al momento flexionante y carga axial representativos de este punto se les llama momento y carga balanceada, y a la relación entre el momento flexionante y la carga axial correspondiente a esta falla balanceada se le denomina excentricidad balanceada (e_b). El diagrama de interacción se interseca con el eje horizontal en el punto que representa al elemento en flexión pura, representando obviamente el momento de falla por flexión uniaxial. La parte del diagrama de interacción correspondiente al elemento bajo tensión axial y flexión, se calcula de la misma manera que para compresión y flexión, sin embargo, es un estado poco común e indeseable en el diseño de estructuras de concreto de mediana altura.

La determinación del punto de la falla balanceada es importante desde el punto de vista de los reglamentos para diseño estructural, porque para elementos cuya excentricidad sea menor que la excentricidad balanceada (e_b), antes que el acero de refuerzo longitudinal fluya por tensión se presenta la falla por aplastamiento en el concreto sujeto a esfuerzos de compresión, denominándose a este rango de "falla por aplastamiento" (es una falla de tipo poco dúctil). Si la excentricidad en el elemento es mayor que la balanceada, se encuentra en el rango de "falla por tensión" (falla con características dúctiles).

En la Fig. 11 se muestra, para un diagrama de interacción carga axial - momento flexionante de una sección transversal

determinada, el correspondiente diagrama de curvatura última calculada. Se aprecia que para cargas axiales menores que la carga axial correspondiente a la falla balanceada, la curvatura correspondiente al momento de falla presenta un brusco incremento. Contrariamente, si la carga axial incidente es mayor que la balanceada, la capacidad de deformación post-fluencia tiende a ser nula. Es por lo anterior que al diseñar una columna ante efectos sísmicos se proponga un límite en la carga axial permisible.

En el caso de columnas sujetas a flexión biaxial y compresión existen dos formas típicas de encontrar la resistencia última de estos elementos. Una es la solución por tanteos, que consiste en encontrar el valor máximo de la carga axial "P" que actúa fuera de dos planos de simetría, a excentricidades e_x y e_y . Esta condición es equivalente a considerar una carga axial P y dos momentos flexionantes, $M_x = P \times e_x$ y $M_y = P \times e_y$. Para un elemento con geometría y excentricidades dadas, aplicando el procedimiento básico para elementos sujetos a flexo-compresión partiendo de conocer las características esfuerzo-deformación de los materiales, iterativamente se puede obtener el valor máximo de la carga P que actúa a las excentricidades dadas. Este proceso predice satisfactoriamente la resistencia del elemento, pero es muy laborioso. Sin embargo, para casos particulares comúnmente empleados en la práctica, se han desarrollado diagramas de interacción empleando computadora electrónica y se muestran en algunos reglamentos. La otra forma de obtener la resistencia última de este tipo de elementos es aproximada, siendo un ejemplo la llamada "Fórmula de Bresler". Bresler desarrolló una expresión simple para calcular los valores máximos de carga axial de compresión que actúa a excentricidades e_x y e_y en secciones rectangulares con distribución simétrica de refuerzo longitudinal. La expresión que propone es la siguiente:

$$1/P_r = 1/P_x + 1/P_y - 1/P_0$$

donde, P_x : carga normal máxima que actúa a excentricidades e_x y e_y ; P_x : carga normal máxima a una excentricidad e_x ($e_y = 0$); P_y : carga normal máxima a una excentricidad e_y ($e_x = 0$); P_0 : carga axial máxima que puede resistir el elemento ($e_x = e_y = 0$).

Es evidente que el problema se reduce a una combinación de soluciones más simples, dos de flexo-compresión y una de compresión axial.

3.2.2 Cálculo de resistencia a flexo-compresión.

De la misma manera que para el caso de flexión, la resistencia última del elemento se determina cuando la deformación unitaria máxima en el concreto de la fibra extrema a compresión alcanza un valor especificado que varía entre 0.003 a 0.004 (según el reglamento empleado).

En el reglamento del AIJ, se plantea una fórmula simplificada para el cálculo de resistencia última de columnas a flexo-compresión, que se presenta enseguida:

$$AIJ \quad M = \sigma_b \times b \times D^2 \{ g_1 (A_{st} \times f_y) / (\sigma_b \times b \times D) + 0.5 \times [N / (\sigma_b \times b \times D)] \times [1 - N / (\sigma_b \times b \times D)] \}$$

expresión con confiabilidad de $\pm 20\%$ en el 90% de su comparación con resultados experimentales. Expresión válida para:

$$p_t = A_{st} / (b \times D) ; \text{entre } 0.4 \text{ y } 2.8 \%$$

$$N / (b \times D) \leq N_b / (b \times D)$$

donde, N: carga axial actuando en el elemento; N_b : Carga axial en la condición de falla balanceada.

4. Comportamiento de elementos lineales (vigas y columnas) ante fuerza cortante.

La falla por cortante en elementos de concreto reforzado, a diferencia de la falla por flexión, es repentina y

generalmente produce un estado de inestabilidad irreparable en el elemento en particular y la estructura en general. Por lo que los procedimientos de diseño presentados en los reglamentos tienden a tratar de eliminar este tipo de falla y lograr un factor de seguridad lo mayor posible respecto a este comportamiento indeseable en la estructura. Respecto al mecanismo que define la falla por cortante en elementos de concreto reforzado, al contrario de la falla por flexión, es de mayor complejidad, y aunque se ha realizado mucha investigación sobre el tema permanecen muchos puntos sin tener plena explicación. Es por eso que los procedimientos de diseño por cortante indicados en la mayoría de los reglamentos tienen una fundamentación empírica, apoyada con conceptos teóricos abstraídos de la teoría de la elasticidad de los materiales y recientemente de la teoría de la plasticidad aplicada al concreto reforzado.

4.1 Modos de falla por cortante.

4.1.1 Vigas con relación claro a peralte grande ($a/d > 2.5$, donde "a" es la longitud del claro de corte).

- a) Falla por flexión (Fig.12.a). Las grietas por efectos de flexión se propagan convirtiéndose en agrietamiento por efectos flexo-cortantes, extendiéndose a través del elemento causando una falla brusca por tensión diagonal.
- b) Falla por tensión diagonal (Fig.12.b). En este tipo de falla no se observa ninguna de las características antes citadas, no se presenta tampoco aplastamiento del concreto a compresión, es una falla frágil e inestable. Incrementando la cantidad de refuerzo lateral se reduce considerablemente la posibilidad de ocurrencia de este tipo de falla y se logran ductilidades que varían desde 1 hasta 4.

4.1.2 Vigas con relación claro a peralte pequeño, también llamadas vigas cortas ($1 < a/d < 2.5$).

- a) Falla de tensión por cortante (Fig.13.a). EL agrietamiento por problemas de adherencia entre el acero de refuerzo y el concreto se propaga a lo largo del refuerzo longitudinal empezando en el extremo de la grieta inclinada de cortante. Como mecanismos resistentes importantes ante este tipo de falla se pueden citar el efecto de dovela del refuerzo longitudinal, la adherencia acero-concreto y la resistencia a deslizamiento acero-concreto. Reduciendo la relación p_t / p_w (donde p_t es la cantidad de acero de refuerzo longitudinal a tensión y p_w es la cantidad de acero de refuerzo lateral), se tiende a eliminar este tipo de falla. Igualmente, para un porcentaje de acero longitudinal dado, empleando barras de menor diámetro y distribuidas adecuadamente (sin emplear paquetes de barras) se logran comportamientos adecuados, reduciendo la posibilidad de ocurrencia de este tipo de falla.
- b) Falla de compresión por cortante (Fig.13.b). En este tipo de falla el concreto a compresión en las fibras extremas de la sección transversal, en los extremos de las grietas de cortante, sufre aplastamiento y falla. Este problema se recrudece cuando el elemento se sujeta a niveles altos de carga axial y cuando se trata de elementos cortos de gran peralte. Una forma de evitar o aliviar este tipo de fallas es proporcionando un mayor porcentaje de acero lateral que lo proporcione mayor confinamiento al concreto sujeto a esfuerzos de compresión.

4.1.3 Vigas de gran peralte ($a/d < 1$).

En esta clase de elementos se generan esfuerzos significativos de compresión en los estratos de concreto resultantes entre las grietas inclinadas provocadas por efecto de cortante, y grandes esfuerzos de tensión a través de dichas grietas. Este fenómeno puede provocar:

- a) Fallas de anclaje del acero a tensión, combinada con desprendimiento del concreto de recubrimiento por efecto de dovela.
- b) Falla por aplastamiento del concreto en los apoyos.
- c) Falla de flexión debido a la rotura post-fluencia del acero de refuerzo longitudinal, o al aplastamiento del concreto en la parte superior del mecanismo de arco.
- d) Falla por aplastamiento en el concreto de los estratos a compresión ubicados en la vecindad del agrietamiento diagonal por cortante.

4.2 Principales mecanismos de resistencia al cortante.

4.2.1 Equilibrio en el claro de cortante de la viga (sin refuerzo lateral).

La resistencia a cortante estará determinada por los siguientes mecanismos de transferencia de cortante: a) Transmisión de fuerza cortante a través del concreto en la zona a compresión, V_c ; b) Resistencia por efecto de dovela, transmitida a través de la grieta por el refuerzo longitudinal, V_d ; c) Resistencia al cortante producto de la componente vertical de los esfuerzos cortantes inclinados v_d , transmitidos a través de las grietas inclinadas por medio de cortante directo o cizalleo entre las partículas de agregados que se encuentran entre y/o en las superficies de la grieta, V_a .

$$V = V_c + V_a + V_d$$

$$M = x V = j_d (T + V_d \cot \alpha)$$

donde, el significado de todas las variables y parámetros se muestran en la Fig.14.

De trabajos experimentales se ha concluido que el efecto de dovela es pequeño para elementos sin acero de refuerzo lateral; $V_d = 0$, por lo que la expresión anterior se puede representar como sigue

$$M = T \times j_d$$

La fuerza de tensión en el refuerzo longitudinal a una distancia $(x - j_d \cot \alpha)$ es determinada por el momento a una distancia x desde el apoyo del elemento estructural. El incremento de esfuerzos en el acero, claramente depende de la pendiente de la curva diagonal con la que se idealizó al agrietamiento por efecto flexo-cortante,

$$V = dM / dx = d(T j_d) / dx = j_d dT / dx + T d(j_d) / dx$$

donde, $j_d dT / dx$: representa el comportamiento de un elemento prismático sujeto a flexión, en el cual la fuerza de tensión interna T actúa sobre un brazo de palanca constante j_d . A este efecto se le denomina efecto de viga dentro de los mecanismos de transmisión de fuerza cortante; $T d(j_d) / dx$: representa el comportamiento de un arco tensado, en el que la fuerza cortante externa es resistida por el estrato interno de concreto a compresión. A este efecto se le conoce como efecto de arco; dT/dx : variación de la fuerza interna de tensión (fuerza de adherencia)

4.2.2 Acción de viga en el claro de cortante.

$$V_a = j_d dT/dx$$

En la acción de viga intervienen los siguientes tipo de mecanismos de transferencia de fuerza cortante:

- Fuerza de adherencia, $\Delta T = T_1 - T_2$
- Cortante transmitido por cortante directo o cizalleo en el agregado localizado en las caras de la grieta, v_{d1} , v_{d2}
- Fuerzas por efecto de dovela, V_{d1} , V_{d2}

El momento en el cantiléver provocadas por las fuerzas de adherencia ΔT , son resistidas por el efecto de dovela y las fuerzas generadas en el agregado, a las que se adiciona la resistencia a flexión M_c del concreto mismo en la zona de compresión. La representación de estos fenómenos claramente se aprecia en la Fig.15.

En vigas con dimensiones normales, un máximo de 20% de las fuerzas por adherencia pueden ser resistidas por flexión en el concreto. Sin acero de refuerzo en el alma, la capacidad del efecto de dovela se limita a la resistencia a tensión del concreto siendo prácticamente nula. Cuando se cuenta con acero de refuerzo lateral, la contribución del efecto de dovela no excede el 25% de la resistencia total del cantiléver. El ancho de la grieta, la rugosidad de su superficie, la deformación por cortante y la resistencia del concreto determinan la resistencia por cortante directo o cizalleo en el agregado, siendo aproximadamente del 50 al 70% de las fuerzas por adherencia las que se resisten por este efecto del agregado en la superficie de la grieta.

El cortante transmitido por la zona de concreto a compresión, arriba de la grieta diagonal, incrementa lentamente durante los procesos de carga hasta alcanzar un máximo de 25 a 40% del total de la fuerza cortante incidente en la sección transversal de la viga.

4.2.3 Acción de arco en el claro de cortante.

$$V_c = T d(j_v)/dx$$

En este mecanismo la fuerza cortante se transmite por compresión diagonal en el concreto de los elementos estructurales. La intensidad de los esfuerzos de compresión diagonal dependen de la inclinación del campo de esfuerzos principales. La relación entre claro de cortante y peralte de la sección (a/d) define una medida de esta inclinación (Fig.16). El efecto del mecanismo de arco resulta inefectivo cuando la fuerza de cortante se transmite a la zona a tensión.

El tipo de fallas que se presentan en un elemento estructural por el mecanismo de arco son:

- a) La propagación de las grietas inclinadas de cortante reducen la zona a compresión excesivamente, provocando aplastamiento del concreto sujeto a esfuerzos de compresión.
- b) La línea de esfuerzos a compresión puede presentar excentricidad respecto al eje del elemento, y generar una falla de tensión por efecto de flexión en la "zona a compresión".
- c) Cuando la relación entre claro de cortante y peralte de la sección es pequeña ($a/d < 2$), se observa una considerable reserva de resistencia producto de mayor eficiencia en el mecanismo de arco. En estos casos se presentará una falla por aplastamiento del concreto en el estrato diagonal a compresión, o fallará por problema de adherencia y anclaje en el refuerzo longitudinal.

4.2.4 Papel del acero de refuerzo lateral en el comportamiento de un elemento estructural.

Los estribos o acero de refuerzo lateral contribuyen en los mecanismos de resistencia ante fuerza cortante de la siguiente manera:

- a) Contribuye a incrementar la resistencia por el efecto de dovela y disminuir la deformación relativa entre las caras de la grieta.
- b) Disminuye los esfuerzos de tensión por flexión en los voladizos formados entre los agrietamientos del elemento (ver Fig.15), mediante una fuerza diagonal de compresión producto del efecto de armadura.
- c) Limita la apertura de las grietas diagonales al rango elástico, favoreciendo la transferencia de cortante por cortante directo o cizalleo en el agregado localizado en la superficie de la grieta.
- d) Proporciona confinamiento al concreto de la zona a compresión, incrementando su resistencia a compresión.
- e) Previene un brusco decremento en la resistencia por adherencia cuando el agrietamiento por problema de adherencia y anclaje se desarrolla en zonas de anclaje y/o traslape.

4.3 Cálculo aproximado de la resistencia por cortante.

Para determinar la resistencia ante cortante han surgido una serie de investigaciones de gran importancia en el campo del concreto reforzado. Así, como punto inicial de la teoría de los mecanismos de transmisión y resistencia de fuerza cortante está el concepto de "analogía de la armadura" propuesto por Ritter en 1899, pasando por los trabajos de Ritter y Morch de 1903 sobre la transmisión del total de la fuerza cortante por el refuerzo lateral del elemento. También de importancia es el trabajo desarrollado por Talbot en 1909 donde plantea que 2/3 de la fuerza cortante incidente la resiste el refuerzo lateral y el 1/3 restante el concreto en la zona a compresión. En los años 50's, Walther y Morrow seguían haciendo trabajos analíticos importantes. Igualmente, Kani en el período comprendido entre 1964 y 1969 realizó trabajos teórico-experimentales encaminados a desglosar cualitativa y cuantitativamente los mecanismos que intervienen en la transmisión de la fuerza cortante incidente en un elemento de concreto reforzado, introduciendo el concepto de "acción de viga" (también conocido como modelo de diente) del segmento de concreto localizado entre dos grietas producto de efecto flexo-cortante. Todos estos estudios, básicamente no han cambiado el concepto primario propuesto por Ritter y Morch, y es en base a estos conceptos y resultados que la mayoría de los códigos y reglamentos actuales proponen sus formulaciones para el cálculo de la resistencia por cortante de elementos de concreto reforzado.

A continuación se presentan las fórmulas básicas propuestas en los reglamentos del DDF, ACI y AIJ:

RDF para $p_t \leq 0.01$

$$V_u = b \times d (0.2 + 30 p_t) (\sigma_B)^{0.5} + A_w \times f_{wy} \times d (\text{sen}\theta + \text{cos}\theta)$$

para $p_t \geq 0.01$

$$V_u = 0.5 \times b \times d (\sigma_B)^{0.5} + A_w \times f_{wy} \times d (\text{sen}\theta + \text{cos}\theta)$$

$$\text{ACI} \quad V_u = V_c + V_t \leq 2.12 (\sigma_B)^{0.5} b \times d$$

$$V_t = p_w \times f_{wy} \times b \times d$$

$$V_c = 0.53 [1 + 0.0071 N / (b \times d)] (\sigma_B)^{0.5} b \times d$$

$$\text{IAJ} \quad Vu = \{ 0.068 p_{t\text{IAJ}}^{0.23} (\sigma_B + 180) / (M/(Q \times d) + 0.12) + 2.7(p_w f_{wy})^{0.5} + 0.1 N / (b \times D) \} i \times j$$

donde, A_w : área del acero de refuerzo lateral en una vuelta del mismo; f_{wy} : esfuerzo de fluencia de refuerzo lateral; θ : ángulo de inclinación del refuerzo lateral respecto al eje del elemento; N : carga axial en el elemento; b : ancho de la sección transversal; $p_{t\text{IAJ}}$: porcentaje de refuerzo por flexión, acero de refuerzo a tensión (%); M/Q : relación entre momento y fuerza cortante en la sección transversal; p_w : cantidad de acero de refuerzo lateral ($= A_w / b \times s$); j : distancia entre las resultantes de esfuerzos a compresión y tensión en la sección transversal (puede considerarse como, $j = 7d / 8$); s : espaciamiento del acero de refuerzo lateral; D : Peralte total de la sección transversal; unidades kgf, cm

Normalmente, la contribución de la losa a la resistencia ante fuerza cortante en vigas puede considerarse no significativa.

En todos los reglamentos se acepta que la carga axial, dentro de los límites permisibles por flexo-compresión, contribuye a incrementar la resistencia por cortante de los elementos columna. Sin embargo, en todos los códigos se hace una consideración puramente empírica sobre dicho efecto, lo que se aprecia claramente en las formulaciones de los reglamentos ACI y IAJ. Respecto al reglamento RDF se plantea el siguiente factor correctivo, que presenta gran similitud al considerado en el ACI:

$$P = 1 + 0.007 (P_u / A_g)$$

$$\text{para, } P_u \leq 0.7 \sigma_B + 2000 A_{st}$$

$$\text{si, } P_u \geq 0.7 \sigma_B + 2000 A_{st} \quad \text{valor de P se variaría hasta ser nulo para}$$

$$P_u = A_g \times 0.85 \sigma_B + A_{st} \times f_y$$

donde, P_u : carga axial en el elemento; A_g : área de la sección transversal del elemento; A_{st} : área total del acero de refuerzo longitudinal en el elemento.

5. Propiedades de adherencia y anclaje acero - concreto.

Para que un elemento de concreto reforzado se considere monolítico, o trabaje como tal, es necesario la existencia de adherencia entre los materiales. Cuando el esfuerzo en el acero de refuerzo embebido en el concreto cambia, esa diferencia de esfuerzos deberá transferirse al concreto por medio de adherencia y anclaje. Los esfuerzos de adherencia y anclaje son esfuerzos de cortante desarrollados en la frontera entre la barra de acero y el concreto que la circunda para transmitir la fuerza, producto de la diferencia de esfuerzos antes mencionada, entre ambos materiales.

Las características de esta adherencia dependen de mecanismos como la adherencia química entre acero y concreto, la fricción generada entre los materiales, así como procedimientos mecánicos de transferencia de fuerza proporcionados por las corrugaciones del acero de refuerzo. Al usar acero no corrugado, el único mecanismo es la

adherencia química, provocándose un deslizamiento temprano del acero respecto al concreto y la imposibilidad de alcanzar mayor resistencia que la de deslizamiento. La fuerza de adherencia al emplear acero corrugado, como se indica en la Fig.17, se genera por el mecanismo entre la corrugación y el concreto circundante. Las dimensiones de la corrugación en esta clase de acero, determina el tipo de falla en el elemento si este falla por problema de adherencia. Así, si la corrugación es de poca altura se podrá generar una falla por aplastamiento en el concreto. Por otro lado, si la corrugación tiene gran altura, esta podrá fallar por flexión. Igualmente, si la separación entre las corrugaciones tiende a ser grande, la resistencia por adherencia tenderá a disminuir. Es por eso que en las normas y códigos existe o debe existir una normatividad respecto a alturas máxima y mínima de la corrugación y valores máximos y mínimos de separación entre corrugaciones. Dos tipos comunes de falla por adherencia y anclaje, dependientes de las características geométricas de las barras de refuerzo corrugadas, se presentan en la Fig.18. Los factores determinantes en la resistencia por adherencia y anclaje de un elemento de concreto reforzado son los siguientes:

a) Resistencia del concreto: Debido al estado de esfuerzos a que se somete el concreto en la vecindad del acero, a mayor resistencia a tensión del concreto la resistencia por adherencia será mayor.

b) Características dimensionales del acero de refuerzo: Como se explicó antes, el uso del acero corrugado, por el mecanismo que se genera entre la corrugación y el concreto, provoca aumento en la resistencia por adherencia. El hecho que en barras de menor diámetro se obtenga mayor resistencia por adherencia provoca preferencia por el uso de barras de diámetros pequeños.

c) Posición y orientación del acero de refuerzo: La resistencia por adherencia en aceros colocados verticalmente resulta mayor que para aceros colocados horizontalmente. También, por fenómenos de sedimentación de los agregados es más común encontrar formación de burbujas de aire en el concreto de la vecindad del refuerzo superior de una viga, provocando que la resistencia por adherencia en el acero de refuerzo inferior sea aproximadamente 20% mayor que la obtenida en el acero de refuerzo superior.

d) Dimensión del recubrimiento: La resistencia por adherencia será mayor a mayor dimensión del recubrimiento. Esto es debido a que el peso propio del recubrimiento y la superficie del concreto que estará sujeto a estado de esfuerzos de tensión son mayores a mayor recubrimiento.

e) Configuración y distribución del acero de refuerzo lateral: El acero de refuerzo lateral juega un factor importante para evitar el rápido incremento de la abertura del agrietamiento por adherencia (paralelo al acero de refuerzo longitudinal), contribuyendo con ello a incrementar la resistencia y capacidad de transmitir fuerza por efecto de adherencia. El acero de refuerzo lateral no tiene efecto en impedir la aparición del agrietamiento por adherencia o efecto de dovela del acero longitudinal. Sin embargo, posterior al agrietamiento contribuye a que el decaimiento o degradación de la resistencia por adherencia sea menor (Fig.19).

Las limitaciones presentadas en los códigos y reglamentos respecto al uso de paquetes de barras de refuerzo longitudinal, separación mínima entre las mismas y dimensiones mínimas de recubrimiento, entre otras condicionantes, están fundamentadas en la necesidad de impedir degradación o decaimiento de la resistencia por adherencia y anclaje, para garantizar que se alcanzará la resistencia última del elemento en particular y la estructura en general, resistencia última que fue propuesta en la etapa de diseño.

6. Comportamiento de elementos viga y columna.

6.1 Factores que determinan el mecanismo de falla.

Como factores importantes en la resistencia y capacidad de deformación de elementos estructurales de concreto reforzado lineales (vigas y columnas), se pueden proponer los siguientes:

a) Cantidad y diámetro del acero de refuerzo longitudinal.

Al colocar la misma cantidad de acero de refuerzo, pero de menor diámetro, se incrementa la superficie de contacto acero-concreto y por lo tanto se incrementa la resistencia por adherencia y anclaje. Sin embargo, existen límites en el tamaño mínimo del acero de refuerzo longitudinal debido a que, como resultado de trabajos experimentales, el tamaño de las corrugaciones en barras de diámetros menores a 19 mm no resultan lo suficientemente eficientes para la transmisión mecánica de fuerza de adherencia.

b) Cantidad y distribución del acero de refuerzo lateral.

Principalmente, como resultado de trabajos experimentales recientes, se entiende que el papel del acero de refuerzo lateral en elementos de concreto reforzado, además de contribuir a evitar una falla frágil por cortante en el elemento, también tiene efecto sobre las siguientes características de un elementos estructural:

- Proporciona confinamiento al concreto del núcleo en los elementos lineales (principalmente elementos columna). Incrementando la resistencia a la compresión del concreto del núcleo y también aumentando el valor de la deformación unitaria última, lo que contribuye a mejorar la capacidad de deformación del elemento.

- Evitar la falla por adherencia y anclaje. Para lo que se recomienda que, para iguales cantidades de acero de refuerzo lateral, la separación del mismo sea la menor posible y que, de ser posible, las barras de refuerzo longitudinal estén confinadas directamente por una esquina o un gancho de dicho refuerzo lateral. Esto incrementará la capacidad y resistencia del refuerzo longitudinal por adherencia y anclaje notablemente.

- Proporciona soporte lateral al acero de refuerzo longitudinal, evitando de esta manera el pandeo del mismo. Logrando un adecuado soporte lateral en el acero de refuerzo longitudinal, también se está contribuyendo a que este participe como confinante del concreto del núcleo del elemento.

c) Efecto de elementos vecinales, como losa de piso y trabes ortogonales.

De investigaciones experimentales recientes, se ha concluido que una losa estructural, reforzada y anclada adecuadamente al elemento viga correspondiente durante el proceso constructivo, participa totalmente junto con la viga en rigidez y resistencia en el trabajo del marco momento resistente. Esto al alcanzar el elemento y/o la estructura su resistencia última.

Igualmente, el efecto de elementos ortogonales es de gran importancia sobre todo al realizar, para el diseño de la estructura, análisis planos. Se ha comprobado experimental y analíticamente que tanto en estructuras a base de muros estructurales, como en aquellas a base de marcos momento resistentes, la rigidez y resistencia obtenida de un análisis plano es notablemente menor que la real. Esto no necesariamente contribuye a incrementar el factor de seguridad de la estructura, ya que puede generar cargas axiales a niveles indeseables en columnas y muros, así como efectos de torsión y cortante en vigas que no fueron contemplados en el análisis plano.

d) Carga axial.

Para lograr incrementos en la capacidad de deformación en elementos sujetos a efectos principales de carga axial y flexión (columnas), como producto de análisis teórico-experimentales se recomiendan contemplar los siguientes aspectos:

- Reducir la carga axial suficientemente bajo la carga axial del estado de esfuerzos "balanceado"

$$N / (\sigma_b \times b \times D) \leq 0.3$$

- Incrementar la cantidad de refuerzo longitudinal a compresión.

- Incrementar el confinamiento en el concreto del núcleo, con refuerzo lateral (espirales, ganchos, estribos, etc), en las secciones críticas a flexión (vgr. aquellas donde se prevé la formación de articulaciones plásticas, principalmente en las todas las vigas y las columnas del primer nivel). En la Fig.20 se presentan algunos ejemplos de refuerzo lateral en columnas básicas para lograr comportamientos adecuados de los elementos.

- Reducir los esfuerzos por cortante al alcanzar la resistencia por flexión, a límites como el indicado:

$$\tau_v \leq 30 \text{ kgf/cm}^2 \quad (\tau_v \text{ representa al esfuerzo cortante en la sección transversal})$$

e) Carga ciclica.

El efecto de carga ciclica provoca efectos, a largo plazo, similares a los provocados por problemas de fatiga en los materiales. A mayor el número de ciclos, mayor será la degradación del material (el concreto en este caso), generando disminución de la capacidad de deformación y decaimiento de resistencia en el rango posterior a la fluencia.

6.2 Misceláneos.

a) En la mayoría de los reglamentos para la construcción, en cuanto a estructuras de concreto reforzado, se acepta el "corte" del acero de refuerzo longitudinal después de asegurar una "longitud de desarrollo" adecuada. Es recomendable, en estos casos, emplear doblez en los extremos de las barras, con el propósito de lograr una buena transmisión de los esfuerzos de adherencia hacia el concreto (Fig.21)

b) Por limitaciones de fabricación y/o transporte, el acero se adquiere a longitudes fijas, es por tal motivo que cuando

se requiere proporcionar longitudes de acero refuerzo longitudinal en vigas o columnas de mayor longitud que las barras adquiridas en fábrica se hace uso del traslape de acero de refuerzo. En los reglamentos basados en información experimental basta (como es el caso del reglamento del AIJ), se permite el empleo de traslapes mecánicos (soldadura a presión y gas, tuercas de alta resistencia, splice con relleno de mortero de alta resistencia, etc., algunos de los cuales se presentan en la Fig.22) en la misma sección. Esto debido a que se ha comprobado experimentalmente que si el traslape mecánico es de calidad comprobada por pruebas a tensión, es prácticamente improbable la formación de una superficie de falla en la sección en cuestión.

Cuando el traslape es convencional, se recomienda seguir la tendencia de no realizarlos en la misma sección del elemento estructural.

e) Finalmente, en las Fig.23 y Fig.24 se ejemplifican gráficamente fallas típicas en vigas y columnas. En la Fig.25 se muestra una viga con un detalle de refuerzo típico para un agujero en el alma propio de requisitos para instalaciones. En la Fig.26 se presentan detalles de refuerzo adecuados para una viga con desnivel en el interin del claro y el detalle de la llegada de una viga secundaria apoyándose en una primaria.

7. Comentarios sobre el diseño de estructuras de cimentación.

Para diseñar la estructura de cimentación se deberá considerar todos los posibles estados de carga que pudiera sufrir la misma, como el estado de cargas verticales y horizontales generadas por de la formación de mecanismo de falla ante el sismo de diseño, así como la posible situación de una descarga del inmueble por reparación o remodelación que pudiera repercutir en asentamientos diferenciales o emersión de la subestructura. De igual manera, se deberá considerar y diseñar adecuadamente la zona de unión entre estructura y subestructura, poner especial atención en los anclajes de los elementos verticales (columnas y muros) en las correspondientes estructuras de cimentación.

Al diseñar una estructura, dependiendo del reglamento a emplear, se permite la formación de los llamados mecanismos de fluencia en la superestructura. Sin embargo, en el caso de las estructuras de cimentación, como regla general, se prohíbe la formación de articulaciones plásticas, por lo que todos los elementos de la estructura de cimentación deberán diseñarse con la filosofía de diseño elástico.

Cuando en la superestructura se consideren muros estructurales de cortante, la contratrabe de cimentación deberá diseñarse para ser lo suficientemente rígida y resistente para soportar las rotaciones del muro al trabajar este como cantiléver al formarse un mecanismo de fluencia con aparición de articulaciones plásticas en trabes.

En el caso de zapatas "aisladas", es recomendable el considerar su liga por medio de contratraves de liga con rigidez y resistencia adecuada para soportar y reducir los efectos producto de asentamientos diferenciales.

Cuando la cimentación es con pilotes (de punta o de fricción), el pilote se diseñará para soportar desde las fuerzas generadas por sí hincado (como es el impacto axial), fuerzas de tensión provocadas por el momento de volteo de la estructura global o por fricción negativa, en este tipo de cimentaciones se revisará el anclaje en la junta del pilote con el dado de cimentación. Cuando no se use dado de cimentación, se revisará la posibilidad de penetración entre pilote y losa de cimentación. Con respecto a cimentación a base de pilotes y dado, se tendrá cuidado en no debilitar al pilote en su cabezal o en su llegada al dado, por la diferencia de rigidez y resistencia entre ambos elementos, por lo que es recomendable proporcionar un refuerzo especial en la zona del cabezal del pilote. En este tipo de cimentación, también se consideraran todos los posibles elementos mecánicos que surgen a lo largo del pilote para el diseño del mismo y de las juntas entre los segmentos.

Finalmente, es evidente que para lograr un diseño confiable de la estructura de cimentación, el diseñador deberá contar con la información precisa y confiable de la mecánica del suelo del sitio de construcción (cuyos niveles de precisión y confiabilidad dependerán del tipo de estructura).

BIBLIOGRAFIA

- 1) Departamento del Distrito Federal, "Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Concreto", publicada en la Gaceta Oficial del DDF el 15 de noviembre de 1987.
- 2) Loera S. y Mendoza C., "Comentarios, Ayudas de Diseño y Ejemplos de las Normas Técnicas Complementarias Para Diseño y Construcción de Estructuras de Concreto, DDF", Series del Instituto de Ingeniería de la UNAM, No. ES-2, Noviembre 1991.
- 3) Comité Euro-International du Béton, "International System of Unified Standard Codes of Practice for Structures, Volume II [cebs-fip model code for concrete structures]", 1991.
- 4) American Concrete Institute, "Building Code Requirements for Reinforced Concrete (ACI 318M-89)".
- 5) Instituto de Arquitectos de Japón, "Reglamento y Manual para Diseño de Estructuras de Concreto Reforzado", 1992. (en Japonés y versión resumida en Inglés)
- 6) González Cuevas O. y Robles Fernández-Villegas F., "Aspectos Fundamentales del Concreto Reforzado", Editorial Limusa, 1989.
- 7) Park R. y Paulay P., "Reinforced Concrete Structures", John Wiley & Sons, Inc., 1975.
- 8) Kosaka Y. y Morita S., "Estructuras de Concreto Reforzado", Editorial Maruzen, 1975. (en Japonés)
- 9) Sakai Y., "Capacidad de deformación de columnas de concreto reforzado de alta resistencia, que presentan mecanismos de falla de compresión por flexión", Memorias del Instituto del Concreto de Japón, No.13 Vol.2. Tokyo, 1991. pp.421-426. (en Japonés)
- 10) Aoyama H., "Diseño Sísmico de Estructuras de Concreto Reforzado con el Criterio de Resistencia Última", Editorial Gihoudo, Tokyo, 1990. (en Japonés)
- 11) IAJ, "Elementos para la enseñanza de estructuras", Editoriales Maruzen, Gihoudo y IAJ, Tokyo 1985. (en Japonés).

FIGURAS

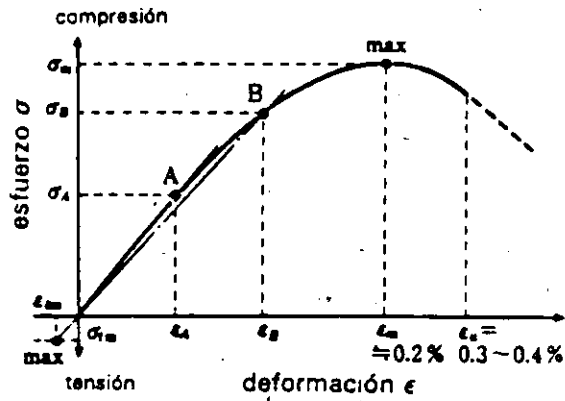


Fig. 1 Curva esfuerzo deformación de concreto normal

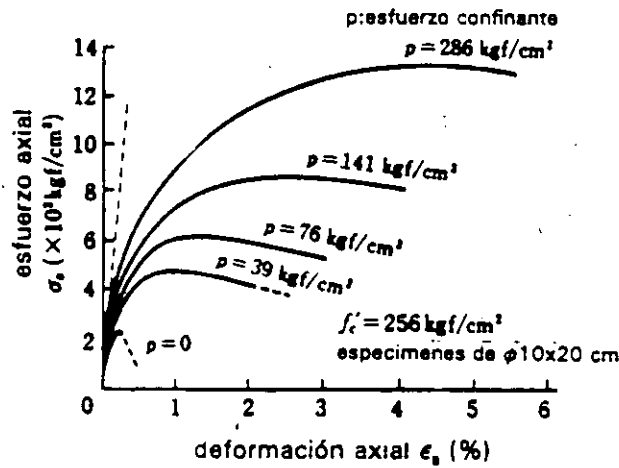


Fig. 2 Curva deformación de concreto con confinamiento lateral

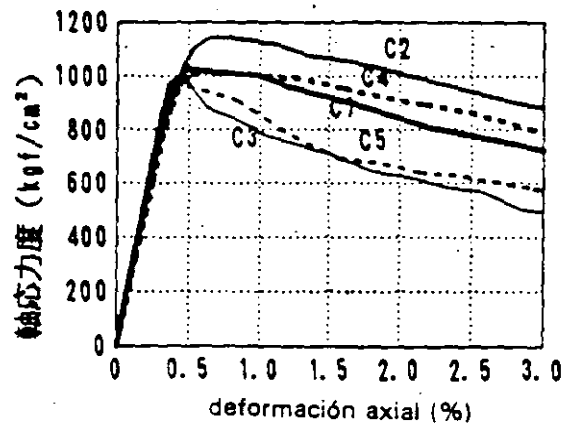
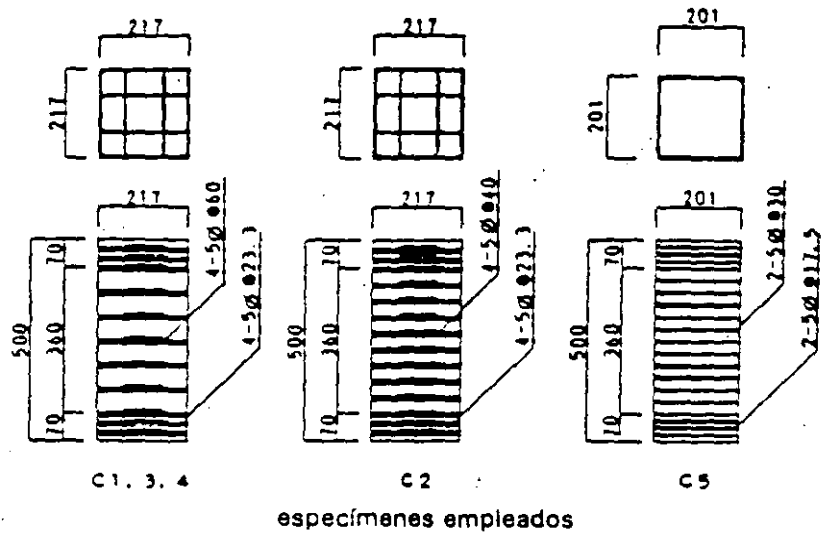


Fig. 3 Relación esfuerzo deformación de elementos cargados axialmente a compresión

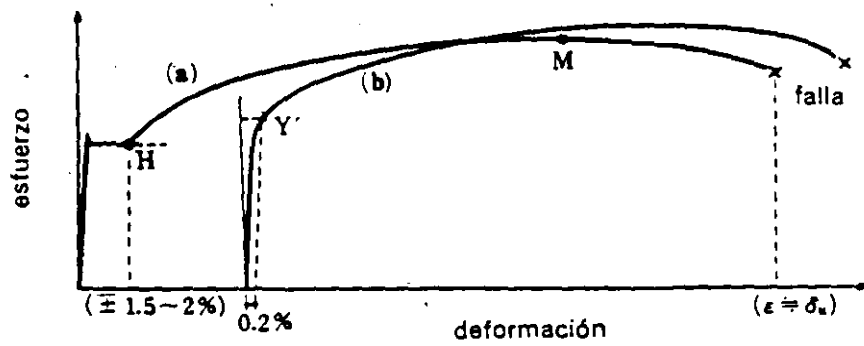


Fig. 4 Relación esfuerzo deformación real del acero

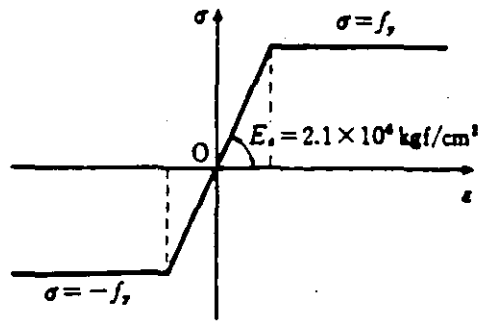


Fig. 5 Relación esfuerzo deformación idealizada del acero

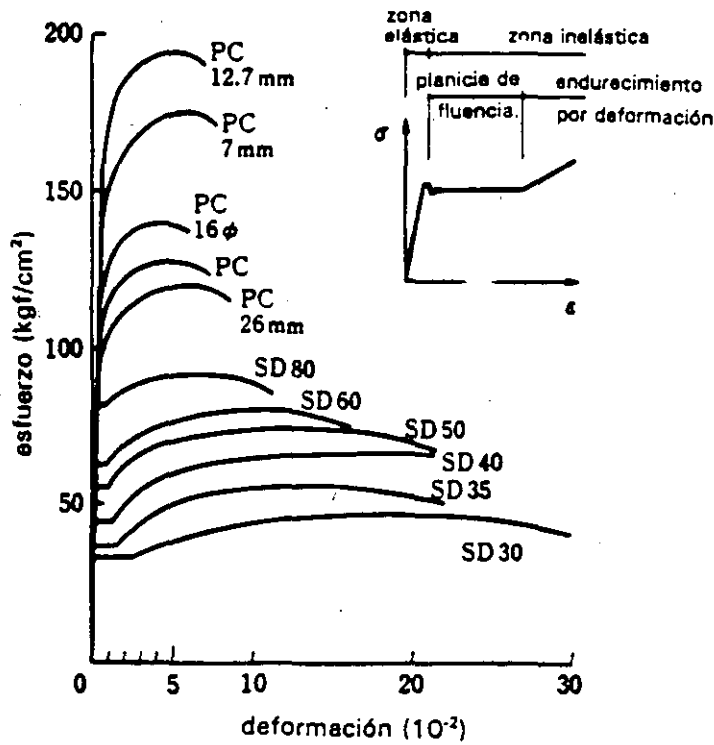
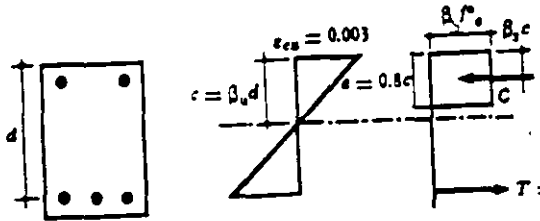


Fig. 6 Relaciones esfuerzo-deformación para barras de refuerzo de diferentes características



$\beta_1 = 0.40$ para sec. rectangulares

$$\beta_2 = \left(1.05 - \frac{f_c^*}{1400} \right) < 0.85$$

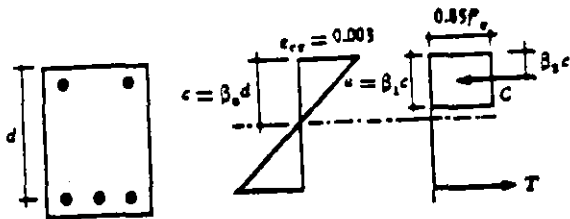
$$f_s < f_s^*$$

$$f_s^* = \alpha f_s (1 - v)$$

$$f_s^* = \gamma f_s$$

v = coeficiente de variación del concreto
 α y γ = coeficientes que dependen del tipo de carga

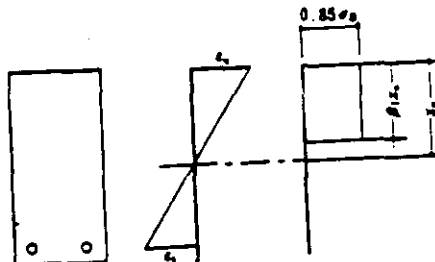
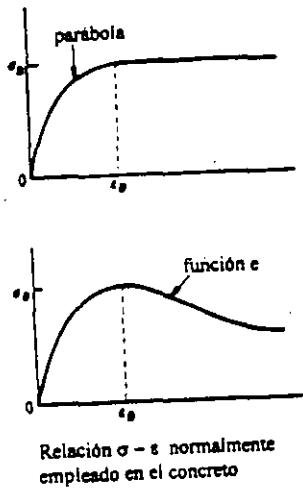
(a) RDF



$$\beta_1 = \left(1.05 - \frac{f_c}{1400} \right) < 0.85$$

f_c en kg/cm²

(b) ACI



$$\beta_1 = 0.85$$

$$\beta_1 = 0.85 - 0.005 (\sigma_p - 280)/70$$

Xn: posición del eje neutro a calcular

$$\{ \sigma_p \leq 280 \text{ kgf/cm}^2 \}$$

$$\{ \sigma_p \geq 280 \text{ kgf/cm}^2 \}$$

(c) ALJ

Fig. 7 Hipótesis simplificadoras para el análisis por flexión según los reglamentos RDF, AIC y ALJ

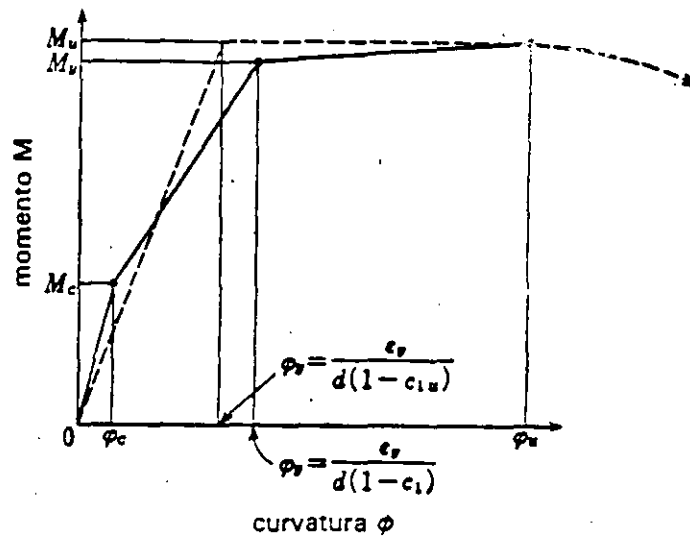


Fig. 8 Diagrama momento-curvatura hipotetizado

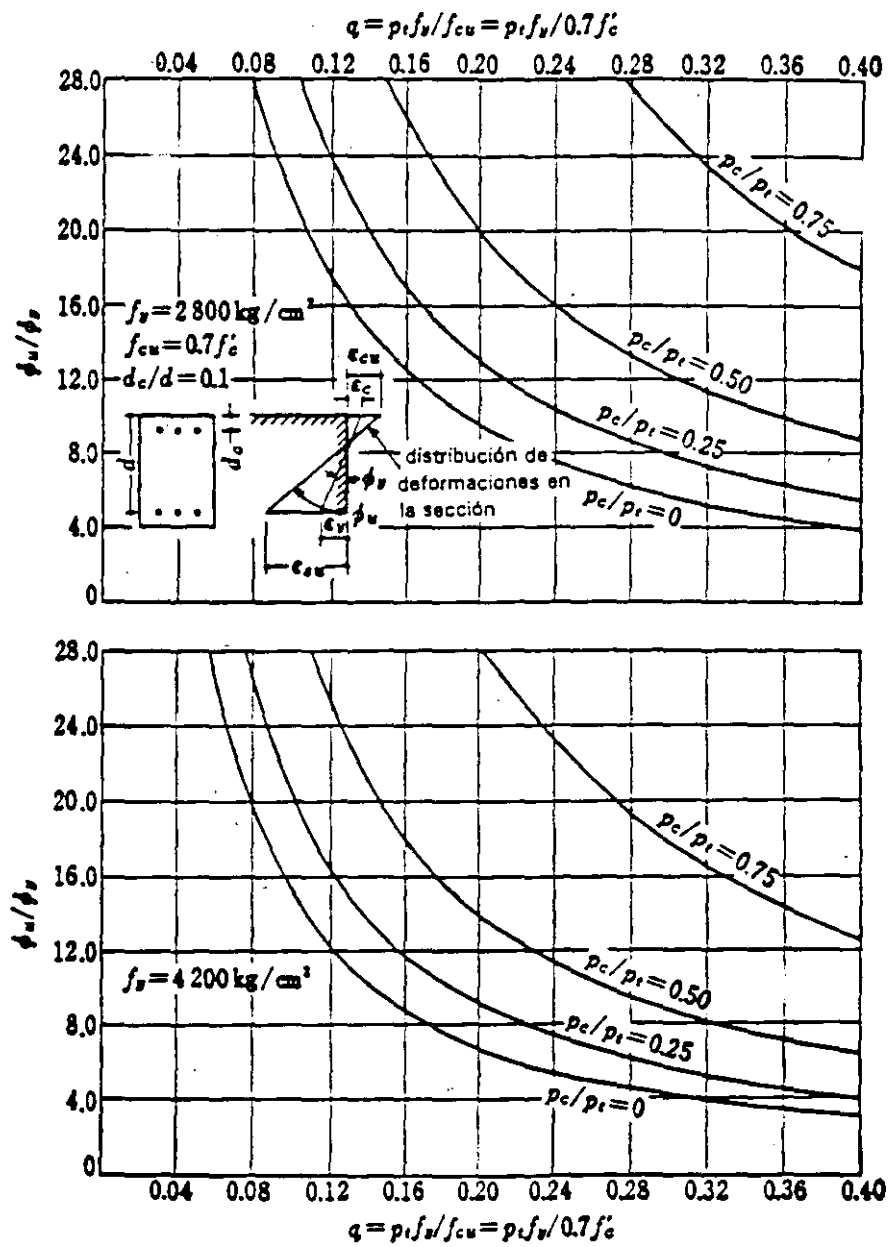


Fig. 9 Ductilidad calculada de la sección transversal de una viga

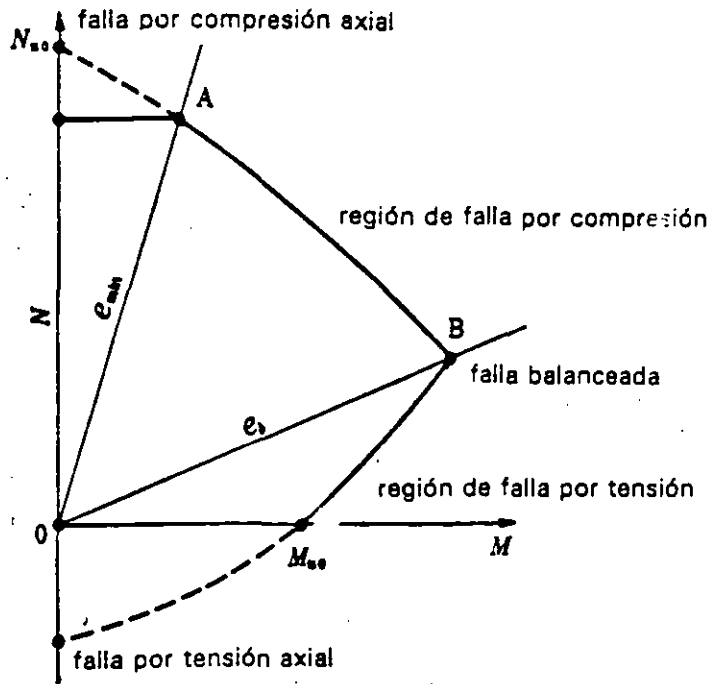


Fig. 10 Diagrama de interacción carga axial (N) y momento flexionante (M)

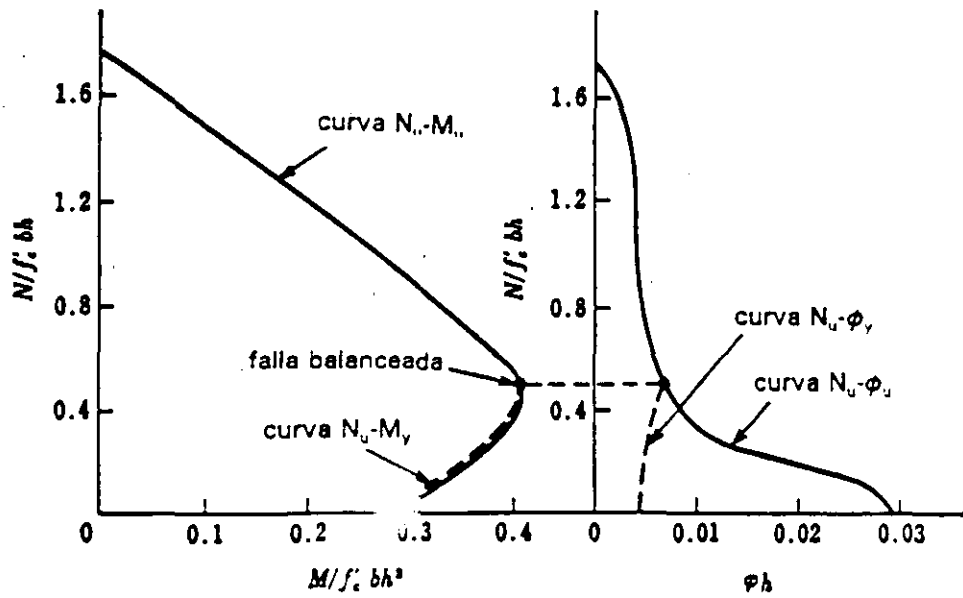


Fig. 11 Gráfica de carga axial (N), momento (M) y curvatura (ϕ)

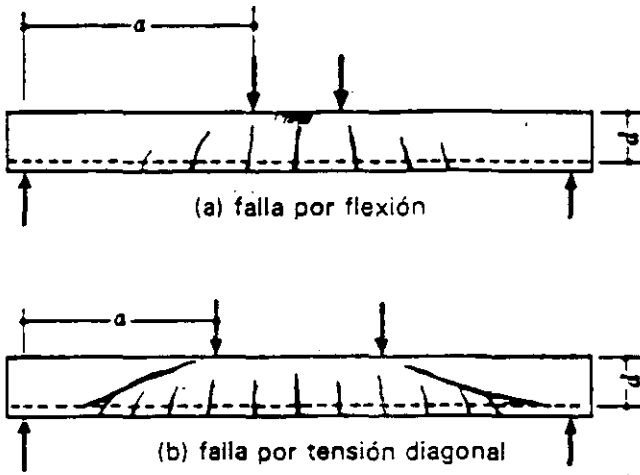


Fig. 12 Representación de la falla por cortante en vigas de relación a/d grande

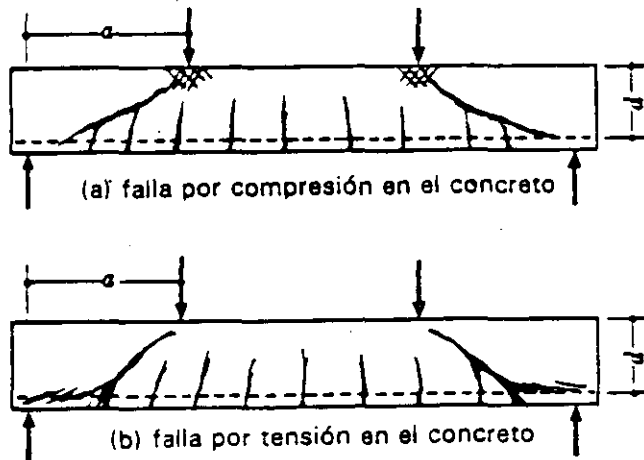


Fig. 13 Representación de la falla por cortante en vigas de relación a/d pequeña

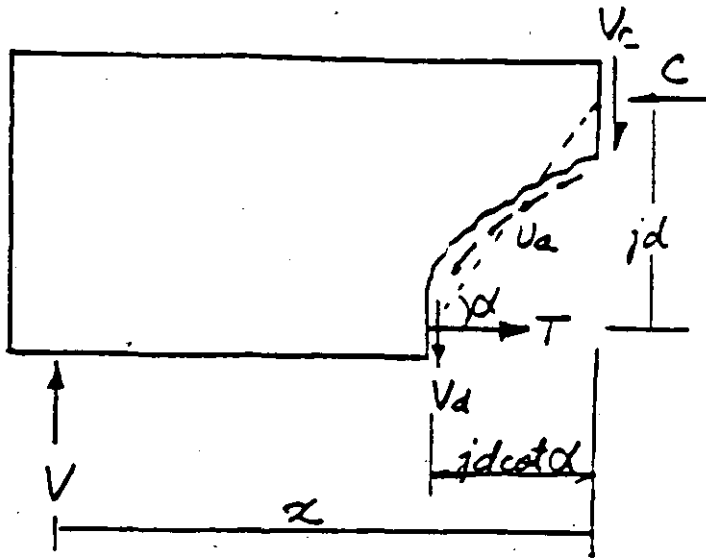


Fig. 14 Equilibrio en el claro de cortante de la viga (sin refuerzo lateral)

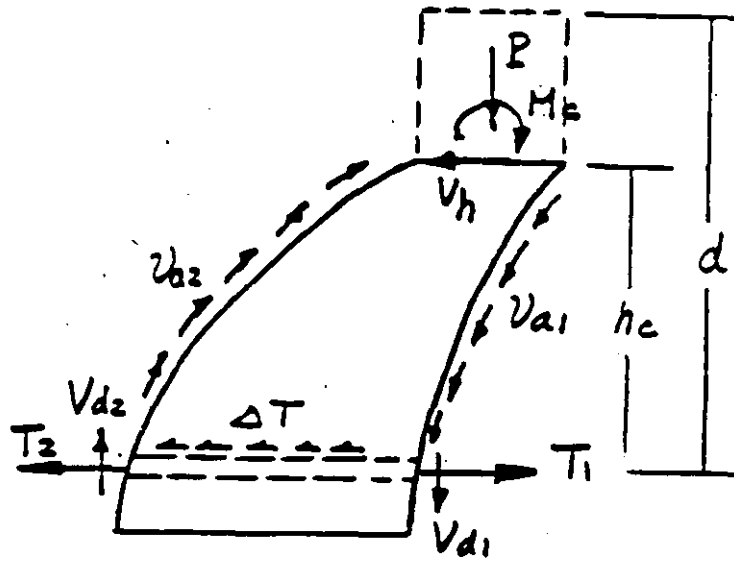


Fig. 15 Acciones en el "cantiléver" formado por grietas de flexo-cortante

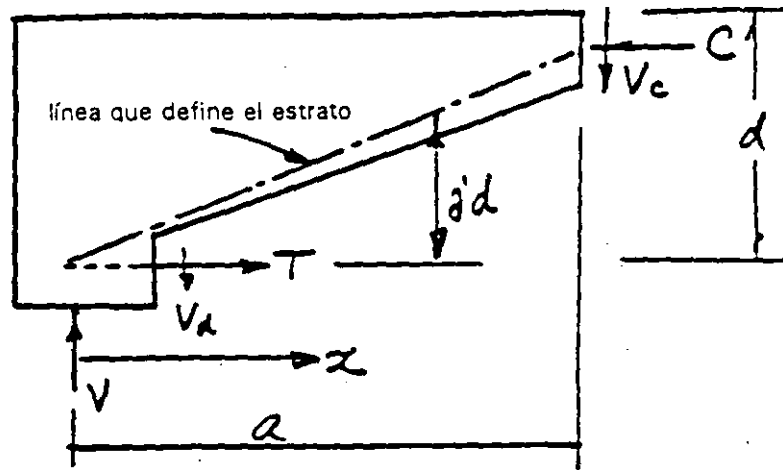


Fig. 16 Mecanismo de arco de transmisión de fuerza cortante

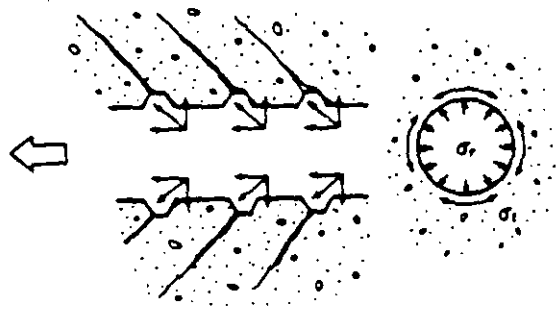
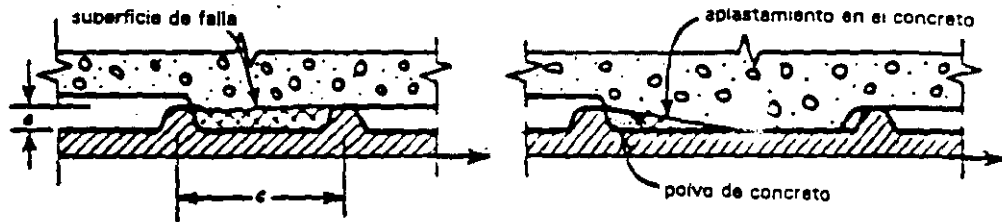


Fig. 17 Cortante directo o cizalleo entre el acero corrugado y el concreto circundante



(a) falla por cortante directo ($a/c > 0.15$)

(b) falla de anclaje ($a/c < 0.10$)

Fig. 18 Dos mecanismos de falla representativos en el problema de adherencia y anclaje

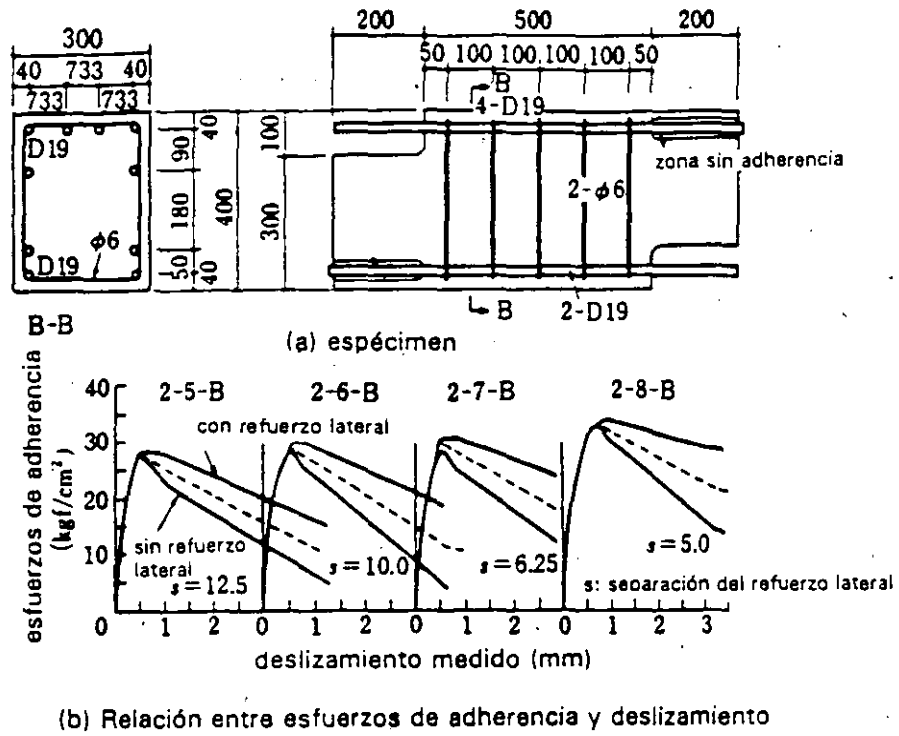


Fig. 19 Resultados experimentales sobre adherencia y anclaje en acero corrugado

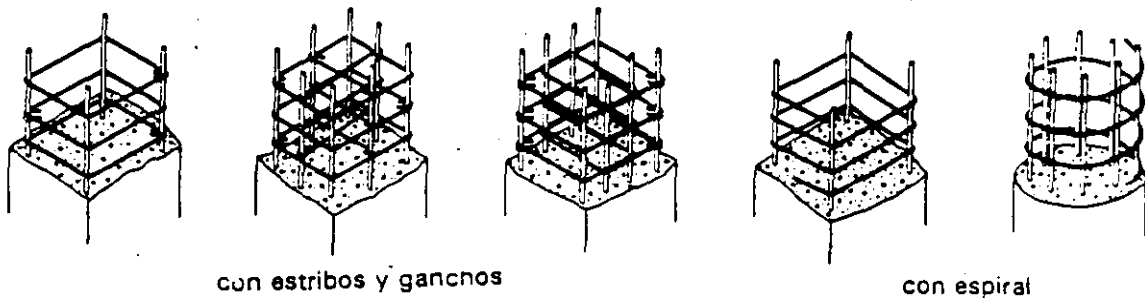


Fig. 20 Distribución de refuerzo lateral típico en columnas

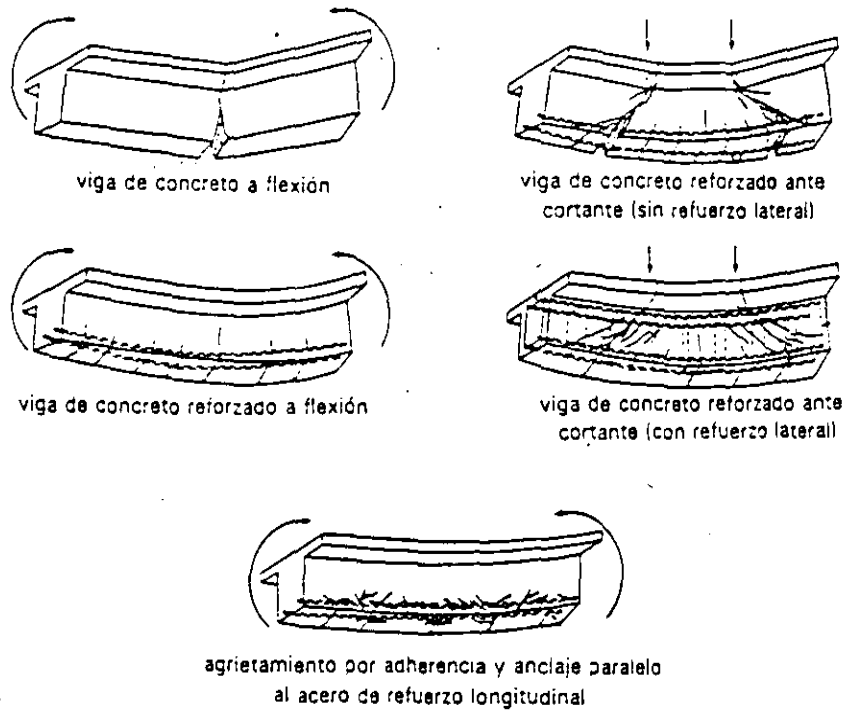


Fig. 23 Modos de falla en vigas

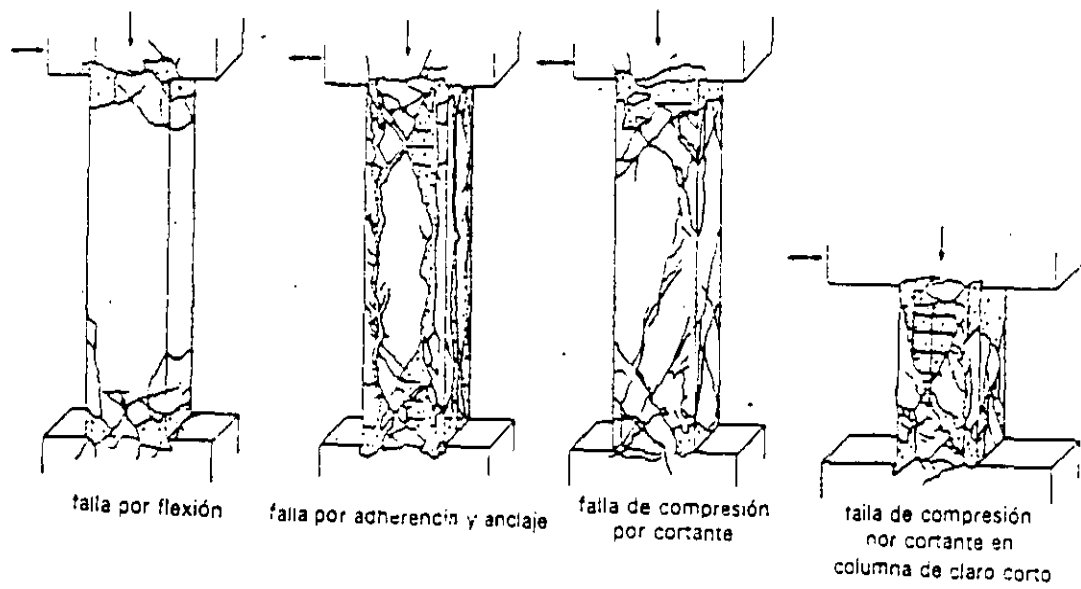


Fig. 24 Modos de falla en columnas

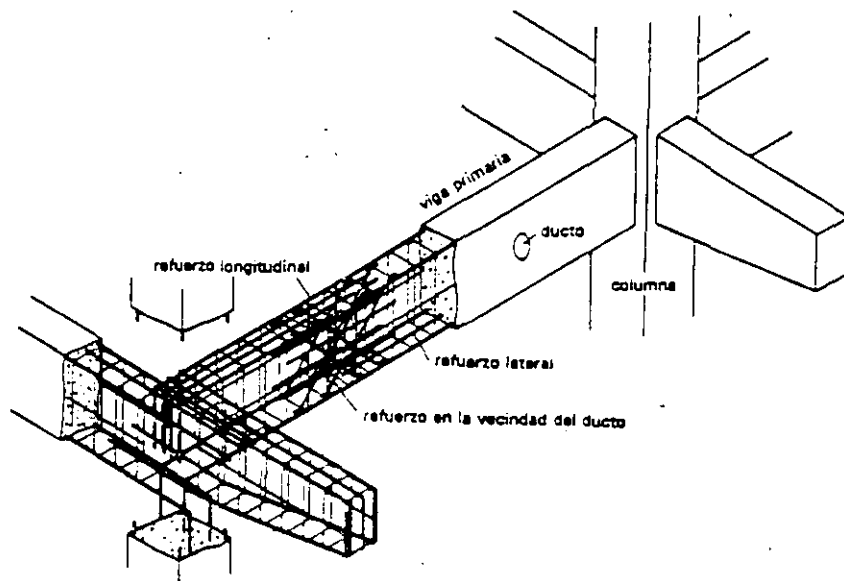


Fig. 25 Detalle de refuerzo para ductos en el alma de viga

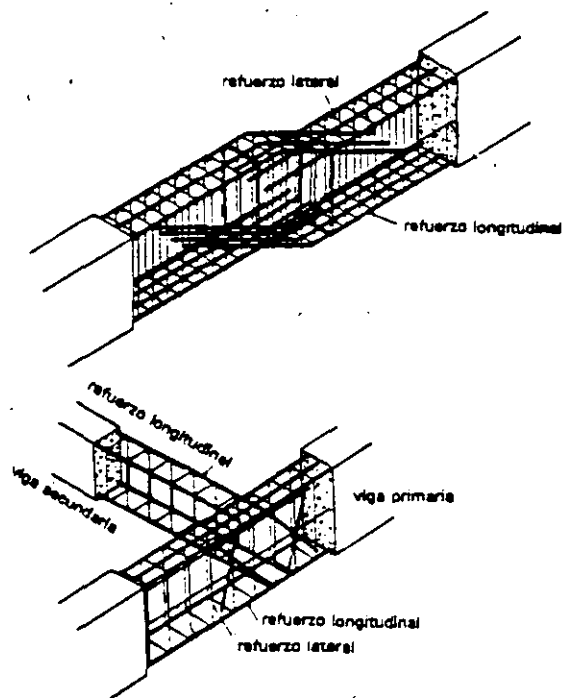


Fig. 26 Detalle de refuerzo en viga con desnivel y del apoyo de una viga secundaria en una primaria

COMPORTAMIENTO Y DISEÑO DE ESTRUCTURAS DE CONCRETO REFORZADO

MUROS ESTRUCTURALES

Sergio M. Alcocer
Centro Nacional de Prevención de Desastres e
Instituto de Ingeniería

1. INTRODUCCION

Es común que se denomine a los muros de concreto reforzado como "muros de corte" o "muros de cortante" porque resisten un alto porcentaje de la fuerza cortante lateral total. Sin embargo, estos términos son desafortunados y un tanto engañosos puesto que la mayoría de los muros se pueden diseñar de manera que tengan un comportamiento dominado por flexión, y que, por tanto, exhiban un modo de falla dúctil. En este capítulo usaremos el término "muros estructurales de concreto" para referirnos a los muros que deberán resistir las fuerzas inducidas por las aceleraciones sísmicas.

Los muros estructurales bien diseñados y detallados ofrecen varias ventajas para su uso en zonas sísmicas:

1. Poseen una mayor rigidez que la de marcos de concreto reforzado.
2. Dada su alta rigidez, exhiben un comportamiento adecuado ante sismos moderados.
3. Poseen una buena capacidad de deformación (ductilidad) que les permite resistir sismos intensos.

Los muros estructurales deben diseñarse para resistir la variación del cortante en la altura (que es máximo en la base), del momento, que produce compresión en un extremo y tensión en el extremo opuesto, así como las cargas gravitacionales que producen compresión en el muro (Fig. 1). La cimentación debe diseñarse para resistir el cortante y el momento máximos que pueden desarrollarse en la base del muro. El refuerzo en la base debe detallarse cuidadosamente para que las fuerzas puedan transferirse entre el muro y la cimentación; en particular, se debe enfatizar la unión y el anclaje de varillas.

Aunque es difícil satisfacer todos los requisitos de funcionamiento de un edificio, los muros estructurales deben colocarse de manera que la distribución de rigidez en planta sea simétrica y que la configuración sea estable torsionalmente (Fig. 2). Además se debe observar que la cimentación pueda resistir el momento de volteo de la base. Es preferible la colocación de un mayor número de muros estructurales en el perímetro como sea posible. Otro aspecto a considerar es que mientras mayor sea la carga gravitacional resistida por un muro, menor será la demanda por refuerzo de flexión y más fácil será la transmisión de momentos de volteo a la cimentación. Por tanto, a menor cantidad de muros, mayores son las fuerzas que deben ser transmitidas a la cimentación.

2. TIPOS DE MUROS ESTRUCTURALES

2.1 Según la Forma de su Sección Transversal

Atendiendo a la sección transversal los muros pueden ser como los presentados en la Fig. 3. En algunas ocasiones los muros poseen elementos extremos (Figs. 3b, 3c, 3d) para permitir el anclaje adecuado de vigas transversales, para colocar el refuerzo a flexión, para dar estabilidad a muros con almas angostas y para

proporcionar un confinamiento más efectivo del concreto en la zona de articulación plástica.

Por lo general, el espesor mínimo de un muro estructural es de 20 cm si se emplean varillas corrugadas para su refuerzo, y de 15 cm si se usa malla de acero electrosoldada.

2 Según su Forma en Elevación

La mayor parte de los muros son prismáticos, es decir, que no sufren cambios de dimensiones en elevación. Sin embargo es frecuente que su espesor disminuya con la altura. De acuerdo con las variaciones en la altura, los muros estructurales se pueden clasificar como muros estructurales sin aberturas y muros con aberturas. En el último caso las aberturas se dejan para colocar ventanas o puertas o ambas.

La mayoría de los muros estructurales con aberturas se puede tratar como una viga-columna. Las fuerzas laterales son introducidas mediante una serie de cargas puntuales a través de los diafragmas de piso. Dada su relación de aspecto altura del muro / longitud h_w/l_w , se distinguen muros esbeltos con relaciones h/l mayores que dos, y muros robustos para relaciones menores o iguales a dos (Fig. 4). Es importante señalar que los muros bajos (robustos) poseen una elevada resistencia a la flexión, aun para refuerzo vertical mínimo, por lo que es necesario aplicar fuerzas cortantes muy altas para desarrollar dicha resistencia. Esto provoca que el comportamiento de este tipo de muros sea dominado por corte.

Las aberturas de los muros deben colocarse de forma que no disminuyan las resistencias a la flexión y al cortante. Un ejemplo de ello es la Fig. 5a. Si las aberturas se colocan de manera alternada en elevación es recomendable la colocación de refuerzo diagonal para ayudar en la formación de campos diagonales a compresión y a tensión una vez que el muro se ha agrietado diagonalmente (Fig. 5b). Si las aberturas se colocan en forma regular se obtiene un tipo de muros llamados acoplados que poseen excelentes características de comportamiento sísmico (Fig. 6).

2.3 Según su Comportamiento

Según su comportamiento, los muros estructurales de concreto se pueden dividir en:

1. Muros de cortante, en los cuales el corte controla las deflexiones y la resistencia;
2. Muros de flexión, en los que la flexión controla las deflexiones y la resistencia;
3. Muros dúctiles (muro estructural "esbelto") que poseen buenas características de disipación de energía ante cargas cíclicas reversibles.

Si esperáramos un comportamiento esencialmente elástico, cualquier tipo de muro de los arriba citados sería adecuado. Sin embargo, si anticipamos que el muro estará sometido a deformaciones en el intervalo inelástico, como ante sismos, es inaceptable el uso de muros de cortante; es preferible un muro dúctil.

3. MUROS ESTRUCTURALES ESBELTOS

3.1 Modos de Falla y Criterio de Diseño

Un prerrequisito para el diseño de muros estructurales dúctiles es que la fluencia del refuerzo de flexión en zonas de articulación plástica definidas controle la resistencia, las deformaciones inelásticas y la capacidad de deformación de toda la estructura. De esta manera, la principal fuente de disipación de energía será la plastificación del acero a flexión (Fig. 7b y 7e). Se deben evitar los modos de falla debidos a la fractura del acero a flexión (Fig.

7f), a tensión diagonal (Figs. 7c y 7g) o a compresión diagonal causados por cortante (Fig. 7h). Asimismo, se deben evitar las fallas causadas por inestabilidad del alma del muro o del refuerzo principal a compresión, el deslizamiento por cortante a lo largo de juntas de construcción (Fig. 7d) y la falla por cortante o adherencia a lo largo de uniones de barras o de anclajes.

En la Fig. 8 se muestra la respuesta histerética de un muro estructural controlada por la resistencia al corte. Es evidente la continua reducción en la resistencia y en la capacidad de disipación de energía con los ciclos. Por el contrario, en la Fig. 9, se presenta la respuesta histerética estable de un muro estructural dúctil. Es claro que aun para una ductilidad de desplazamiento igual a cuatro, la respuesta exhibe una capacidad de disipación de energía muy buena. El comportamiento de muros estructurales dúctiles es comparable con el de columnas; su capacidad de rotación plástica es afectada por fuerzas axiales y cortantes.

Puesto que el área bruta de la sección de un muro estructural es muy grande, las cargas axiales que obrarán sobre él estarán muy por debajo del punto balanceado; debido a lo anterior, una adecuada ductilidad de curvatura se logrará si:

1. Se coloca el refuerzo por flexión en los extremos del muro; y
2. Se confinan estos extremos mediante estribos con bajas separaciones. El confinamiento aumentará la capacidad de deformación útil del concreto y retrasará el pandeo del acero de flexión.

Para evitar problemas de corte, el diseño de flexión debe garantizar que:

1. El agrietamiento diagonal del muro no ocurra aun ante los momentos máximos que se pueden producir por el muro;
2. Si ocurriese el agrietamiento diagonal, el cortante sería resistido por el refuerzo del muro, y
3. Los esfuerzos nominales de corte deben mantenerse bajos para retrasar la falla por deslizamiento del muro y para prevenir el aplastamiento del concreto en el alma.

Los criterios de diseño escritos arriba son fácilmente satisfechos en muros esbeltos cuyo comportamiento por naturaleza es dominado por flexión. Sin embargo, es prácticamente imposible diseñar los muros robustos para que su comportamiento sea dominado por flexión. En esos casos es preferible diseñar los muros para que permanezcan elásticos ante las cargas máximas anticipadas.

3.2 Resistencia a la Flexión

Para diferentes cargas axiales en los muros es factible calcular la relación momento-curvatura empleando un programa de computadora. Como se mencionó en el capítulo sobre columnas, este diagrama describe el comportamiento del elemento; es similar a un diagrama esfuerzo-deformación de un material. Afortunadamente, los diagramas se pueden obtener en forma aproximada empleando métodos simples tales como los usados para columnas.

Suponiendo un bloque equivalente de esfuerzos en el concreto a compresión y que el acero a tensión está sometido a un esfuerzo igual o menor que el esfuerzo de fluencia, se puede obtener por equilibrio de fuerzas en la sección que la capacidad a flexión de un muro estructural está dada por la Ec. 1.

$$M_n = 0.5 A_s f_y l_w \left(1 + \frac{N_n}{A_s f_y} \right) \left(1 - \frac{c}{l_w} \right) \quad (1)$$

donde A_s es el área de acero a tensión en el muro (refuerzo vertical);
 f_y es el esfuerzo de fluencia del acero vertical de los muros;

l_w es la longitud del muro;

N_n es la carga axial actuante; y

c es la profundidad del eje neutro medida desde la fibra a compresión máxima.

Si continuamos con la analogía de muros estructurales esbeltos con columnas, es claro que se puede obtener una mayor resistencia a la flexión si concentramos el refuerzo vertical (a flexión) en las fibras extremas de la sección transversal. En la Fig. 10 se presenta la comparación del comportamiento de dos muros esbeltos con misma cantidad de refuerzo por flexión, pero en donde en uno de los muros el refuerzo está distribuido uniformemente en la longitud del muro y en el otro se ha concentrado en los extremos, manteniendo solamente refuerzo mínimo en la porción intermedia. De la gráfica se puede concluir que los muros con refuerzo concentrado en los extremos son, en comparación con aquellos con refuerzo distribuido, más resistentes y mucho más dúctiles. Este incremento en la eficiencia, sin embargo, se puede ver contrarrestada si el acero en flexión alcanza deformaciones dentro del intervalo de endurecimiento de deformación ya que la ductilidad disminuye. Es necesario entonces confinar los elementos extremos de los muros en donde se concentra el acero (ver sección 3.4).

Si colocamos el refuerzo por flexión en el muro en cantidad igual a la requerida por el momento flexionante obtenido del análisis de la estructura, es teóricamente posible la formación de la articulación plástica en cualquier parte de la altura del muro. Por tanto, si deseamos que la articulación se forme en la base del elemento es necesario diseñar por flexión el resto del muro por arriba del momento último (sobrediseñar). Además, el refuerzo por flexión debe cortarse de manera que la articulación ocurra en la base. Con base en información experimental, la longitud de la articulación plástica sobre la altura del muro varía entre $0.3l_w$ y $0.8l_w$. Fuera de esta región, las varillas deberán tener una longitud igual a la longitud de desarrollo.

3.3 Resistencia al Cortante

La resistencia al corte en muros estructurales esbeltos está proporcionada por el concreto y el acero horizontal. El componente de la resistencia debida al concreto depende de que hayan aparecido grietas diagonales en el alma del muro o que el muro exhiba fisuras por flexión-cortante. En el primer caso, las grietas empiezan cerca del centro del alma y aparecen cuando los esfuerzos principales a tensión exceden a la resistencia a tensión del concreto.

Para fines de diseño, la contribución del concreto a la resistencia se puede tomar de manera conservadora igual a la empleada en vigas. En el reglamento para estructuras de concreto del Instituto Americano del Concreto, se presentan dos expresiones alternas para calcular esta contribución; sin embargo, las Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Concreto para el Distrito Federal (NTC-Concreto) sólo consideran la expresión para vigas.

La contribución del refuerzo horizontal a la resistencia a fuerza cortante es calculada de manera similar al caso de vigas. La única diferencia está en el peralte efectivo d que, para el caso los muros se toma igual a $0.8l_w$. Para una longitud de muro dada, el peralte efectivo dependerá de la cuantía y de la distribución del acero vertical. Sin embargo, se puede demostrar que la hipótesis convencional de tomar $d=0.8l_w$ es razonable.

Resultados experimentales han indicado que, manteniendo las otras variables iguales, se mejora la respuesta histerética de muros cuando el refuerzo en el alma es mediante varillas de diámetro pequeño colocadas a separaciones pequeñas.

Con objeto de garantizar la resistencia del muro al agrietamiento diagonal del concreto, es necesario colocar una cuantía mínima de refuerzo horizontal. Para valores normales de resistencia a la compresión del concreto y varillas Grado 400 (Grado 400 se refiere a $f_y = 400 \text{ MPa} \approx 4,200 \text{ kg/cm}^2$), la cuantía mínima es igual a 0.25%. Esta cantidad de refuerzo es adecuada para controlar los cambios volumétricos del concreto.

De manera similar al caso de vigas y columnas, la resistencia al cortante disminuye en regiones donde fluye el refuerzo a flexión. Por tanto, es importante diseñar y detallar refuerzo horizontal por corte adicional para la zona de la articulación plástica.

El deslizamiento por cortante en muros estructurales esbeltos es menor crítico que en vigas debido a la carga axial actuante y a la distribución uniforme del refuerzo vertical. Este último ayuda a controlar el agrietamiento horizontal y resiste el cortante mediante la acción de dovela (transversal al eje de la varilla) y cortante-fricción. En planos de deslizamiento potencial es recomendable colocar el acero vertical a una separación igual al espesor del muro. Estudios experimentales han demostrado que la falla por deslizamiento puede retrasarse si el esfuerzo cortante nominal es menor de $3\sqrt{f'_c}$, en kg y cm².

3.4 Confinamiento e inestabilidad

Como se estudió en el capítulo sobre confinamiento, un adecuado confinamiento del concreto incrementa su resistencia a la compresión y su capacidad de deformación (ductilidad). Cuando fluye el refuerzo a flexión del muro, los esfuerzos a compresión en el concreto aumentan para equilibrar la tensión, pero si el concreto no está confinado, puede alcanzar la falla rápidamente. En este caso la falla se caracterizaría por el aplastamiento y desconchamiento del concreto en una gran porción de los extremos del muro. El confinamiento debe extenderse sobre la zona de la articulación plástica.

Para evitar una posible falla por inestabilidad de la zona a compresión del muro (Fig. 11) es recomendable que el espesor del muro sea mayor o igual a un décimo de la altura de la planta baja del edificio. El pandeo del refuerzo principal a compresión se puede retrasar si éste se confina con estribos cerrados separados a seis veces el diámetro máximo nominal de la varilla vertical del muro.

Aun cuando el muro se confine, es probable que pueda fallar por inestabilidad lateral del núcleo confinado. Esta falla puede evitarse si se colocan patines en los extremos del muro. En la Fig. 12 se muestran detalles típicos del refuerzo transversal en los patines.

3.5 Diseño

Las NTC-Concreto contienen requisitos para el diseño y detallado de muros estructurales sujetos a fuerzas horizontales en su plano. No se pretende en este acápite transcribir dichos requerimientos; solamente se comentarán algunos de ellos.

Los edificios, en los cuales los muros resistan la totalidad de las fuerzas laterales, se diseñan con un factor de comportamiento sísmico $Q=3$ (Art. 4.5.2) si se satisfacen los requerimientos para elementos extremos; de otra manera se emplea $Q=2$. El valor $Q=3$ presupone que la capacidad de disipación de energía y la ductilidad del muro estructural son buenas, de aquí que es indispensable una inspección y supervisión estrictas durante la construcción. De particular relevancia es la colocación del refuerzo transversal, traslapes y anclaje según los planos estructurales. En el Art. 4.5.2.a se indica la distribución del refuerzo vertical por flexión en la longitud del muro y el corte del refuerzo. La razón de colocar el refuerzo vertical distribuido en muros robustos obedece a consideraciones de resistencia al cortante. Para muros con relación de aspecto h_w/l_w mayor que 1.2, el corte del refuerzo longitudinal se hará a una altura igual a $1.2l_w$. La razón es la de asegurar un anclaje adecuado del refuerzo en la zona de la articulación plástica.

Para usar $Q=3$, los elementos extremos de los muros deben confinarse con estribos colocados a pequeñas separaciones. Los estribos deberán ser cerrados y de una pieza, ya sea sencillos o sobrepuestos. El diámetro menor será varilla del No. 10 (se refiere a 10 mm, es decir, de 3/8 pulg). Los estribos deben rematar en una esquina con

dobles de 135 ϕ , seguidos de tramos rectos de no menos de 10 diámetros de largo. La separación máxima no debe exceder de 10 cm. El cumplimiento de los requisitos de detallado anteriores es esencial para confinar adecuadamente el concreto, evitar pandeo del refuerzo longitudinal y mejorar la capacidad de disipación de energía ductilidad del muro.

La expresión para calcular la cuantía del refuerzo vertical p_v (Art. 4.5.2c, Ec. 4.7) indica que si h_w/l_w disminuye, la cantidad de acero vertical aumenta, lo cual es consistente con lo discutido para muros estructurales robustos (ver sección 4).

$$p_v = 0.0025 + 0.5 \left(2.5 - \frac{h_w}{l_w} \right) (p_h - 0.0025)$$

Las NTC-Concreto indican que la separación máxima del refuerzo será de 35 cm. Esta recomendación está basada en criterio y en práctica tradicional, y no en estudios específicos.

El esfuerzo cortante máximo se limita a $2\sqrt{f'_c}$, en kg y cm^2 , para evitar el aplastamiento del concreto asociado a fallas por compresión diagonal. La sección crítica por corte está a media altura de entrepiso.

4. MUROS ESTRUCTURALES ROBUSTOS

4.1 Tipos de Muros

Se denomina muro estructural robusto a aquél con una relación de aspecto h_w/l_w menor o igual que dos. De acuerdo a su comportamiento se les puede clasificar en tres categorías:

1. Muros elásticos. Es usual que la resistencia de muros bajos sea tan alta que respondan en el intervalo elástico ante sismos intensos. La mayoría de los muros pertenece a este tipo.
2. Muros que pueden cabecear. Es el caso de muros que resisten la mayor parte de la carga lateral aunque soportan una carga vertical relativamente baja. En este caso la capacidad del muro está limitada por la resistencia a volteo. Si la cimentación se diseña para este tipo de comportamiento el muro permanece elástico.
3. Muros dúctiles. En algunas ocasiones no es posible diseñar la cimentación de manera que los muros permanezcan en el intervalo elástico. Entonces es necesario diseñar los muros para que exhiban un comportamiento inelástico limitado.

Es común que la resistencia a flexión de estos muros sea tan alta que es difícil desarrollarla sin que fallen por corte antes. Es importante notar que este tipo de falla puede aceptarse si las demandas de ductilidad (desplazamiento) son mucho menores que las requeridas para muros esbeltos o acoplados. Estos muros deben identificarse como muros con ductilidad restringida.

4.2 Resistencia a la Flexión

Para resistir el momento flexionante, usualmente es suficiente colocar refuerzo vertical mínimo distribuido uniformemente. El principal problema es cómo resistir la fuerza cortante. Al igual que para los muros esbeltos, la distribución uniforme del acero vertical ayuda a resistir el deslizamiento por cortante mediante los mecanismos de cortante-fricción y acción de dovela de las varillas.

4.3 Resistencia al Cortante

En los primeros ensayos ante carga lateral realizados en muros bajos, se aplicó la fuerza concentrada en las esquinas de los tableros. Los muros robustos, cargados de esta manera, pueden resistir cargas importantes debido a la formación de un puntal de compresión interno. Sin embargo, los muros robustos son generalmente cargados mediante cargas puntuales transmitidas por los diafragmas de piso en cada nivel. En estos casos el mecanismo resistente de puntales de compresión no es tan eficiente como en el caso de carga concentrada.

Al igual que en los muros estructurales esbeltos, es indispensable la colocación de refuerzo horizontal para resistir parte del cortante. Sin embargo, también es necesario colocar refuerzo vertical para tomar el cortante. Si observamos la Fig. 13, es claro que para equilibrar el componente vertical del puntal a compresión, es necesario un tensor, es decir, refuerzo vertical. Se concluye que el cortante solamente se puede resistir si se coloca refuerzo vertical. La cuantía mínima de refuerzo, tanto horizontal como vertical, será igual a 0.25% como para el caso de muros esbeltos.

En la Fig. 14 se presentan esquemáticamente los modos de falla por cortante de muros robustos. Se produce una falla por tensión diagonal (Fig. 14a) cuando el refuerzo horizontal es insuficiente para controlar la grieta. La resistencia a tensión diagonal depende de cómo se aplica la fuerza cortante. Así, si se puede distribuir la fuerza a lo largo del muro, el agrietamiento por tensión diagonal no será sinónimo de falla (Fig. 14b).

Si el esfuerzo cortante es elevado y el refuerzo horizontal es adecuado, el concreto puede aplastarse bajo la compresión diagonal (Fig. 14c). Este caso es típico en muros con patines con una resistencia a la flexión elevada. A menudo, el aplastamiento puede extenderse sobre la longitud del muro (Fig. 14d). La falla por compresión diagonal conduce a una rápida pérdida de resistencia y debe evitarse cuando se diseñen los muros. Los reglamentos de construcción (ver sección 3.5) limitan el esfuerzo cortante máximo que se puede aplicar para asegurar que la falla por compresión no disminuya la ductilidad disponible.

Como se mencionó arriba, las fallas por compresión o tensión diagonales se evitan si se limita el esfuerzo cortante nominal y si se coloca refuerzo horizontal. Por tanto las deformaciones inelásticas (fluencia) ocurrirán en el refuerzo vertical. Después de alguno ciclos de carga, es posible que ocurra un deslizamiento de la base. Este fenómeno reduce la resistencia y la rigidez, la última particularmente a bajos niveles de desplazamiento, lo que trae como consecuencia una disminución en la energía disipada. Debido a este desplazamiento, la fuerza de compresión en la zona a compresión de la flexión, se transmite a través de superficies no uniformes de la grieta. Esto conduce a un mayor deterioro que se manifiesta en aplastamiento y desprendimiento del concreto. El daño en el concreto, a su vez, reduce la adherencia del acero vertical y la rigidez de la acción de dovela. Eventualmente el principal mecanismo resistente será el pliegue del refuerzo vertical.

4.4 Control del Deslizamiento por Cortante

Ensayos en muros han indicado los efectos negativos que desplazamientos por corte excesivos producen en la respuesta histerética. También han evidenciado el mejoramiento del comportamiento cuando se coloca refuerzo diagonal que corta el plano de deslizamiento para reducirlo y para resistir el cortante de deslizamiento. En las Figs. 15a y 15b se presentan las respuestas histeréticas de un muro robusto que falló por deslizamiento sobre la base. La respuesta de la Fig. 15c corresponde a un muro con refuerzo diagonal (Fig. 16) diseñado para resistir el 30% del cortante de deslizamiento; es notable el cambio en las curvas. Para controlar el desplazamiento en la base se ha propuesto que el 50% del cortante sea resistido por acero diagonal y el resto por acción de dovela. Para este último se ha propuesto que sea igual a 0.25 veces la resistencia a tensión del refuerzo vertical.

4.5 Control de la Tensión Diagonal

Para resistir la fuerza de tensión diagonal se debe colocar refuerzo horizontal que equilibre el cortante que actúa sobre un plano de falla supuesto con una inclinación a 45°. Si existe acero diagonal (ver sección anterior) se deberá considerar el componente horizontal de la resistencia.

4.6 Diseño

Los comentarios de diseño según NTC-Concreto se presentan en la sección 3.5.

5. SISTEMAS MIXTOS MURO - MARCO

Es común el empleo de muros estructurales esbeltos en combinación con marcos de acero o de concreto reforzado. En estos casos, los muros se construyen entre columnas, tal que los elementos extremos del muro sean las propias columnas. El sistema mixto marco-muro combina las ventajas de ambos componentes. Así, marcos dúctiles pueden disipar energía en los pisos superiores de un edificio. Por otro lado, dada la rigidez de los muros, las distorsiones de entrepiso (desplazamiento relativo entre altura) estarán dentro de los límites permisibles.

Ante cargas laterales, un marco se deforma principalmente en modo de corte (Fig. 17), mientras que un muro se comporta como un voladizo vertical dominado por flexión. Dada la compatibilidad de desplazamientos obligada por las losas de piso, el marco y los muros comparten la resistencia en los pisos inferiores pero se oponen en los superiores.

En comparación con un muro aislado ante cargas laterales, la interacción con el marco produce menores momentos máximos (en la base), pero fuerzas cortantes mayores. Esto aumenta la tendencia a una falla por corte. Lo anterior es particularmente importante si estudiamos la vieja práctica de algunos despachos de cálculo estructural de diseñar el marco (sin muros) para resistir la carga gravitacional y el (los) muro(s) de manera separada (sin marco) para resistir la carga lateral total. Puesto que para un muro conectado a un marco, el momento máximo es más bajo que el obtenido del análisis de un muro como voladizo, el diseño por flexión sería conservador. Sin embargo, el diseño por corte sería peligrosamente no conservador ya que los cortantes en el muro diseñado como voladizo son menores que los obtenidos en muros conectados a marcos.

Mientras más flexibles son los muros, mayores serán los cortantes que deben ser resistidos por las columnas de los marcos. En realidad la contribución de los muros a tomar cortante es en los pisos inferiores.

En algunas ocasiones, la resistencia y rigidez de la cimentación no son suficientes para evitar el levantamiento del muro por cabeceo. Este fenómeno se traduce en cargas axiales mayores sobre el muro que aumentan su resistencia a la flexión. Este aumento, extrañamente quizá, no es conveniente, ya que aumenta la fuerza cortante. Si este incremento no es tomado en cuenta se puede dañar al muro por corte prematuramente. Además, el levantamiento del muro introduce cortantes en vigas transversales para los que generalmente no son diseñadas. Estas fuerzas cortantes se traducen en fuerzas axiales a tensión en columnas en el extremo opuesto de las vigas. Si esta fuerza de tensión no se consideró en el diseño y detallado de las columnas, es posible que se formen articulaciones plásticas en zonas no detalladas para ello.

Análisis dinámicos más refinados han indicado un buen comportamiento de sistemas mixtos bien detallados en los cuales los muros se extienden de la base a parte de la altura del edificio.

Los comentarios hechos en las secciones anteriores sobre el confinamiento, anclaje y deslizamiento son aplicables a este caso.

6. MUROS ESTRUCTURALES ACOPLADOS

6.1 Ventajas de los Muros Acoplados

Una desventaja potencial de los muros estructurales con comportamiento controlado por flexión es que la mayor parte de la disipación de energía ocurrirá mediante plastificación del refuerzo a flexión, lo que está asociado al peligro de una falla por deslizamiento en la articulación plástica. Este tipo de daño es difícil de reparar puesto que, por lo general, los muros resisten la mayor parte de las cargas gravitacionales del edificio.

Si consideramos el caso de dos muros acoplados, la rigidez del sistema aumentará con el peralte de las vigas de acoplamiento. Sin embargo, la principal ventaja de este tipo de sistema está en su comportamiento inelástico. La deformación de los muros ante cargas laterales causan grandes desplazamientos relativos entre los extremos de las vigas de acoplamiento (Fig. 18). Esto provoca la formación de articulaciones en los extremos mucho antes de la formación de las articulaciones en los muros mismos. La estructura puede disipar una cantidad significativa de energía a través de la sola fluencia de las vigas acopladas. Debido a la respuesta del edificio en el segundo y tercer modo de vibración, aun en medio ciclo de desplazamiento del muro, las vigas de acoplamiento son sometidas a varios ciclos de momento.

Una ventaja adicional del sistema es que si las vigas son severamente dañadas durante un sismo, se pueden reparar de manera relativamente fácil sin dejar al edificio fuera de servicio. Aun más, si las vigas son destruidas completamente, el edificio tiene la redundancia estructural que le brindan los muros trabajando de manera independiente, lo que evita su colapso.

6.2 Criterio de Diseño

Para garantizar un comportamiento adecuado de los muros acoplados se debe satisfacer que:

1. La formación de articulaciones plásticas en las vigas de acoplamiento debe ocurrir antes que la plastificación de los muros; y
2. Las vigas de acoplamiento deben ser detalladas para obtener buenas características de disipación de energía.

El primer requisito es satisfecho si se diseñan los muros de manera que la resistencia nominal al cortante sea mayor que el cortante consistente cuando se alcanza la capacidad a flexión del muro. Esta capacidad se calcula considerando la reducción en la carga axial debido a la formación de articulaciones plásticas en las vigas de acoplamiento. En efecto, al fluir las vigas, las fuerzas cortantes en ellas se traducen en una reducción en las fuerzas axiales en los muros. Si la carga axial neta en el muro de sotavento es baja, se reduce la resistencia al corte y se favorece la degradación por deslizamiento.

Respecto a la resistencia de las vigas de acoplamiento, es importante señalar que la relación claro-peralte de las vigas de acoplamiento es menor de dos, lo que resulta en elementos vulnerables a fallas por cortante.

6.3 Diseño de Vigas de Acoplamiento

Las primeras vigas de acoplamiento se reforzaron por corte de manera convencional, es decir, aplicando conceptos para vigas esbeltas y colocando estribos ortogonales al eje a baja separación. Sin embargo, su respuesta ante sismos ha sido deficiente. Las vigas así reforzadas fallan por tensión diagonal con degradación muy severa o por deslizamiento cerca del muro (Figs. 19a y 19b). Las razones de este comportamiento son los altos esfuerzos cortantes nominales que aceleran la degradación por corte y la distribución no lineal de esfuerzos, la cual es diferente de la supuesta por la teoría convencional de vigas. En efecto, el refuerzo longitudinal de la viga permanece a tensión en todo el claro, de manera que el cortante se transmite por medio de un puntal diagonal (Fig. 19c).

Puesto que el concreto se degradará ante ciclos de carga, es necesario resistir la compresión diagonal a través de varillas diagonales que puedan resistir todo el componente inclinado de la fuerza cortante. El mínimo número de varillas es cuatro. Se deberán colocar estribos cerrados a 10 cm máximo para evitar el pandeo de dicho refuerzo. El refuerzo deberá anclarse en el muro para permitir su fluencia. Según NTC-Concreto el anclaje será igual a 1.5 veces la longitud de desarrollo de las varillas. Este incremento pretende disminuir la concentración de esfuerzos en el anclaje. En la Fig. 20 se presenta el comportamiento de vigas de acoplamiento reforzadas convencionalmente y reforzadas con acero diagonal. Es importante observar las excelentes características de disipación de energía de estas últimas. Los detalles del refuerzo de una viga de acoplamiento se ilustran en la Fig. 21. Para evitar el desprendimiento del concreto agrietado, es necesario colocar refuerzo horizontal y vertical mínimo que funcionen como una canasta. Este refuerzo debe cumplir los requisitos para acero por cambio volumétricos y se colocará en dos capas, próximas a las caras de la viga, por afuera del refuerzo diagonal.

7. MUROS DIAFRAGMA DE CONCRETO REFORZADO

7.1 Características

El comportamiento sísmico de marcos con muros diafragma (o de relleno) de concreto reforzado depende del espesor relativo de los muros con respecto a las dimensiones de vigas y columnas del marco. En efecto, si los muros diafragma son muy delgados, el marco se deformará como un marco sin muros; en este caso la energía se disipará en las vigas y columnas. Por el contrario, si el muro tiene un espesor alto, el marco con muros responderá como un muro estructural, de manera que la energía se disipará mediante fluencia en la base de la estructura. Para muros diafragma de espesor intermedio, el marco con muros se comportará como un muro estructural para bajos niveles de desplazamiento. Para desplazamientos elevados, los muros diafragma se comportarán como puntales equivalentes de compresión y la estructura responderá como un marco arriostrado. Debido a la degradación gradual de los tableros se logrará una significativa cantidad de energía disipada. Aunque el comportamiento de este tipo de sistemas no es tan bueno como el de muros acoplados, ofrece un incremento en resistencia, rigidez y disipación de energía comparado con un marco simple, siempre y cuando el marco y los muros diafragma se diseñen y detallen adecuadamente.

7.2 Criterios de Diseño

Los posibles problemas de diseño en el empleo de muros diafragma y sus soluciones son:

1. Flexibilidad de los tableros. Puesto que los muros diafragma son mucho más rígidos que el resto, es posible que la estructura falle por fluencia en la base. Para este caso, se recomienda que los muros diafragma se compongan de tableros separados por juntas verticales, o bien que la carga asociada a la falla por flexión sea superior que la que produciría el aplastamiento del puntal de compresión.
2. El puntal diagonal de compresión introduce en las columnas fuerzas cortantes elevadas. Para evitar

una falla en la columna se requiere usar una alta cantidad de refuerzo transversal de manera que resista todo el cortante transmitido cuando el muro diafragma se agriete. Así, la resistencia al corte en los extremos de la columna deberá ser mayor que la carga de agrietamiento del muro diafragma (por lo general el esfuerzo de agrietamiento es del orden de $1.8\sqrt{f'_c}$, en kg y cm^2).

3. El muro diafragma puede desprenderse del marco y no disipar energía. Para evitar ello se recomienda la colocación de una cuantía mínima de acero vertical y horizontal igual a 0.0025 con una separación máxima de varillas de 30 cm. Este refuerzo deberá estar anclado al marco.

Lo discutido anteriormente es válido para el caso que se quiera que el muro diafragma contribuya a la resistencia y rigidez ante cargas laterales del edificio. Si el muro es divisorio únicamente, se deberá separar del marco por medio de una junta elástica.

8. DETALLADO

En las secciones anteriores se han hecho varias observaciones respecto a la influencia del detallado en el comportamiento de los muros estructurales. A continuación se enfatizan los aspectos de juntas de construcción y anclaje. La importancia del confinamiento ha sido destacada en otras secciones.

8.1 Juntas de Construcción

Los muros estructurales de concreto normalmente se construyen colando por tramos, mismos que quedan separados por juntas de construcción. Estas juntas tienen, a menudo, una resistencia dudosa. En efecto, durante la compactación del concreto el material más pesado, los agregados, se precipitan al fondo de la capa de colado. Por tanto, en la parte superior existirá un mayor contenido de pasta con relación agua/cemento más alta (de acuerdo a Abrams, a mayor relación agua/cemento, menor es la resistencia).

Para evitar el deslizamiento a lo largo de juntas horizontales es necesario colocar suficiente refuerzo vertical (acero en el alma) con baja separación o acero diagonal (ver sección 4.4) para resistir el cortante mediante el mecanismo de fricción-cortante. Debido al desplazamiento relativo a lo largo de la junta rugosa, la junta se abre (un valor típico es del orden de 0.2 mm). Si algunas varillas cruzan la junta, éstas quedarán sometidas a fuerzas de tensión que serán equilibradas por la compresión a ambos lados de la junta. La resistencia asociada a este mecanismo es proporcional al área transversal del acero que atraviesa la junta y al esfuerzo en las varillas. Para desplazamientos relativos pequeños (del orden de 0.2 mm o menos), el mecanismo de cortante-fricción es razonable. Por tanto, el cortante rasante resistente será función de la fuerza normal a la junta y de la fuerza desarrollada por las varillas que la cruzan multiplicados por un coeficiente de fricción. De esto último se desprende la necesidad de incrementar la rugosidad de juntas de construcción. Las juntas de construcción deben estar libres de polvo, partículas o cualquier otra sustancia que afecte la adherencia con el nuevo concreto. Ensayes de laboratorio han indicado que el uso de aditivos no modifica sustancialmente la resistencia al corte.

El refuerzo vertical mínimo es suficiente para controlar el desplazamiento en la base si el esfuerzo axial sobre el muro es igual o mayor de 4.2 kg/cm^2 .

8.2 Anclaje

El refuerzo vertical en muros, ya sean esbeltos o robustos, debe anclarse en la base del muro; esto es evidente. Parecería que el anclaje del refuerzo del alma no es tan necesario en la parte superior del muro; sin embargo, es de similar importancia, en particular en muros bajos en los cuales la mayor parte del cortante es

resistido por el refuerzo vertical después del agrietamiento del concreto. Se deben emplear ganchos en la parte superior para garantizar un adecuado anclaje. Un aspecto relevante son las uniones de varillas, en particular cerca de la base del muro. Las NTC-Concreto prohíben traslapes de cualquier tipo en la zona de la articulación plástica. En el caso de muros, la colocación de traslapes en zonas con esfuerzos altos es más detrimental que en el caso de columnas o vigas debido a la falta de un adecuado confinamiento lateral (hacia fuera del plano del muro) por la geometría del elemento.

El refuerzo horizontal se deberá anclar en los extremos y, de preferencia, dentro de los elementos extremos confinados.

En ocasiones no se presta suficiente atención a la separación entre las varillas, particularmente aquellas colocadas en los elementos extremos. Es común observar el uso de paquetes de varillas de gran diámetro muy próximos entre sí lo que dificulta la adecuada colocación y compactación del concreto. Una mala práctica de colado se traduce en hoquedades que reducen la adherencia del refuerzo, lo que a su vez conduce a una disminución en la resistencia, rigidez y capacidad de desplazamiento del muro. Se debe tener especial cuidado en supervisar dicha condición.

9. BIBLIOGRAFIA

1. Departamento del Distrito Federal, "Normas técnicas complementarias para diseño y construcción de estructuras de concreto," Gaceta Oficial del Departamento del D.F., 26 de noviembre de 1987, 73 pp.
2. Ferguson, P.M., Breen, J.E., y Jirsa, J.O., "Reinforced concrete fundamentals, John Wiley & Sons, Nueva York, 5a. ed., 1988, 746 pp.
3. Jirsa, J.O., "Reinforced concrete structures," notas de clase, Universidad de Texas en Austin, 1987.
4. Klingner, R.E., "Reinforced concrete structures," notas de clase, Universidad de Texas en Austin, 1985.
5. Paulay, T., y Priestley, M.J.N., "Seismic design of reinforced concrete and masonry buildings." John Wiley & Sons, Nueva York, 1a. ed., 1992, 744 pp.

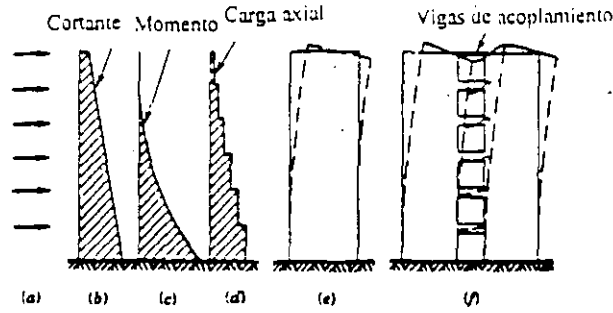


Fig. 1 Variación de la fuerza cortante, momento y carga axial en un muro estructural aislado

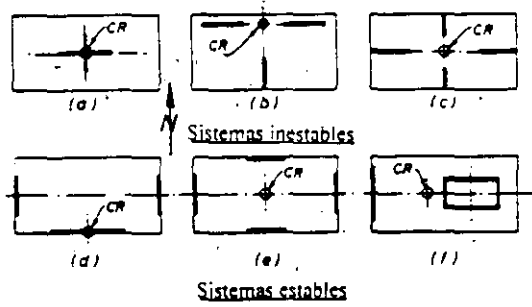


Fig. 2 Ejemplos de estabilidad torsional en sistemas de muros estructurales

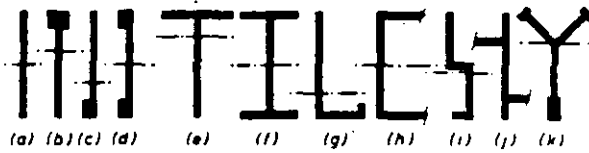


Fig. 3 Secciones transversales comunes de muros estructurales

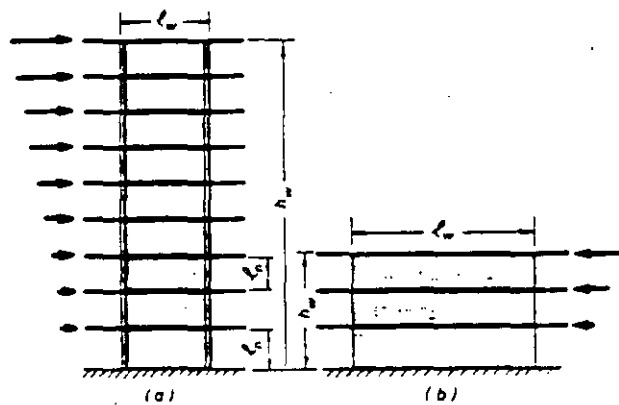


Fig. 4 Muros estructurales esbeltos y robustos

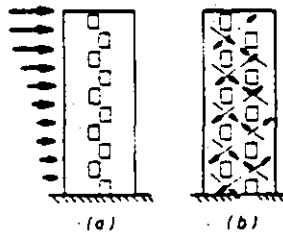


Fig. 5 Resistencia al corte afectada por aberturas en muros

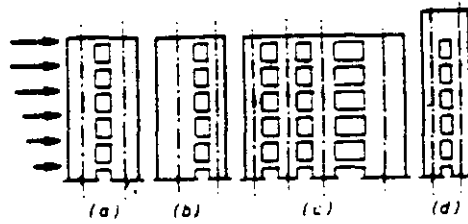


Fig. 6 Tipos de muros estructurales acoplados

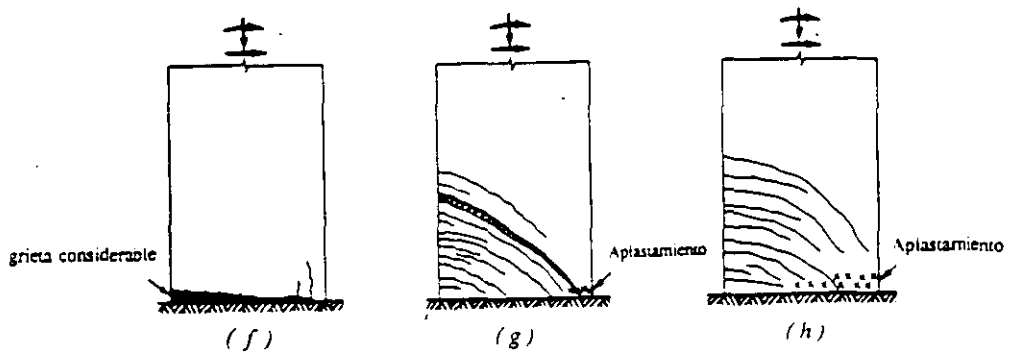
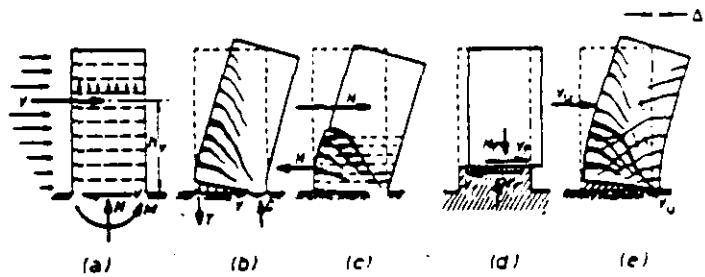


Fig. 7 Modos de falla en muros esbeltos

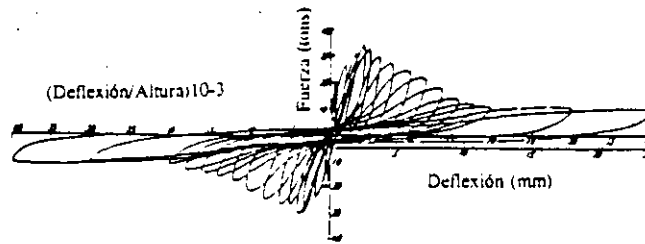


Fig. 8 Respuesta histerética dominada por la resistencia al corte de un muro estructural

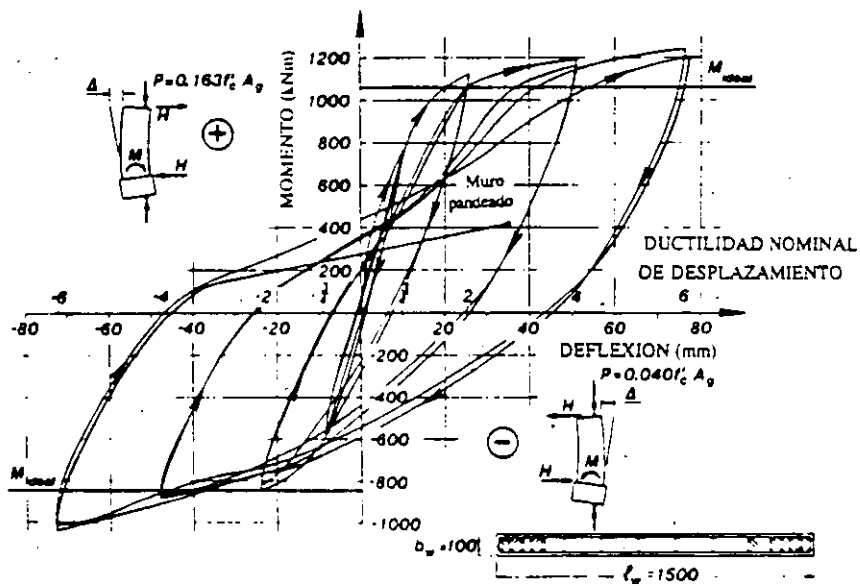


Fig. 9 Respuesta histerética estable de un muro estructural dúctil

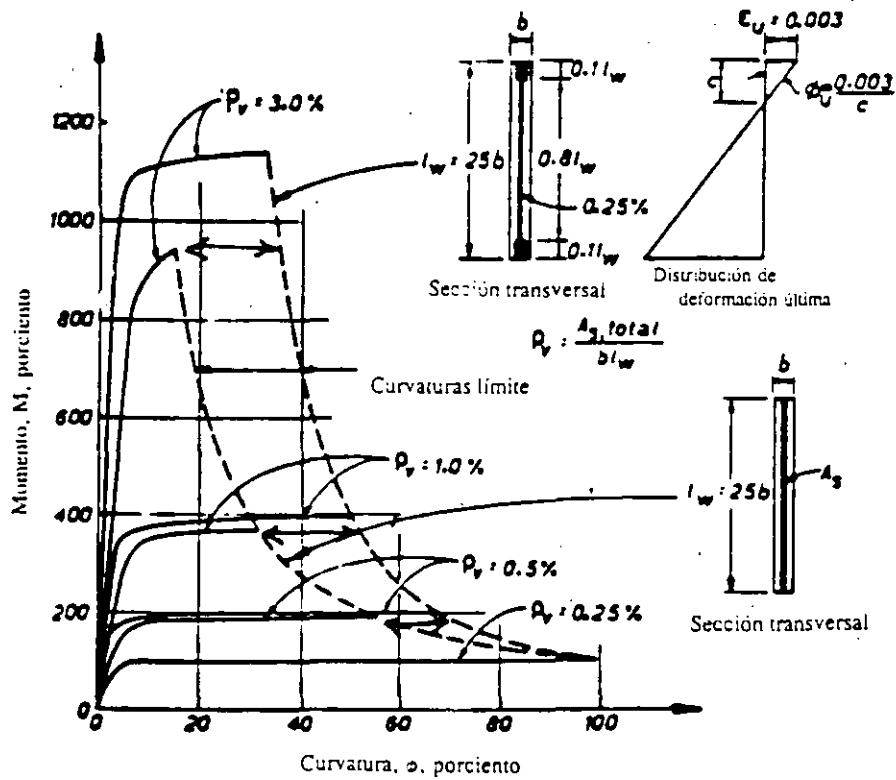


Fig. 10 Efecto de la distribución del refuerzo y de la cuantía en la resistencia a flexión y en la curvatura



Fig. 11 Pandeo en la región de la articulación plástica de un muro estructural

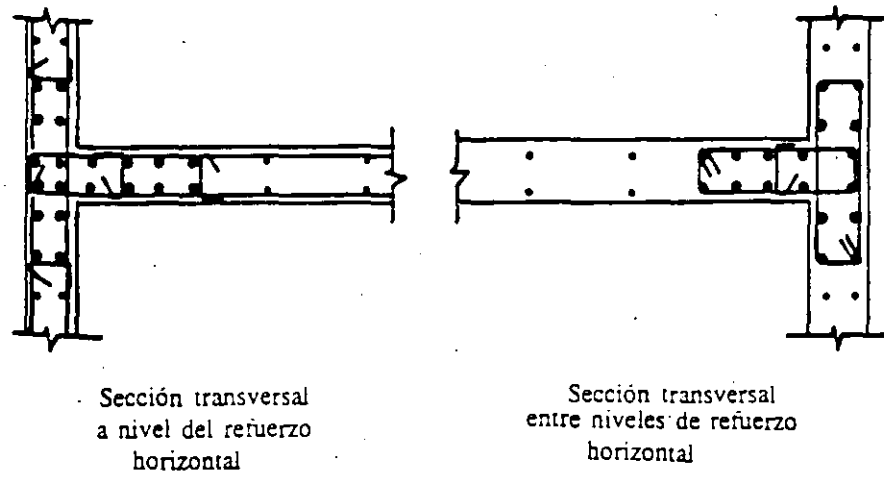


Fig. 12 Detalles de confinamiento en patines de muros

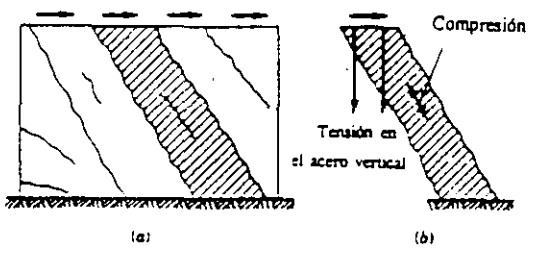


Fig. 13 Puntal de compresión entre grietas para muros robustos

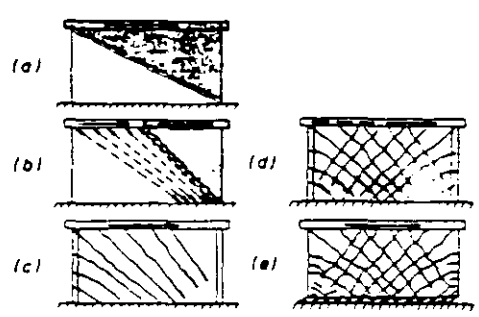


Fig. 14 Modos de falla de muros robustos

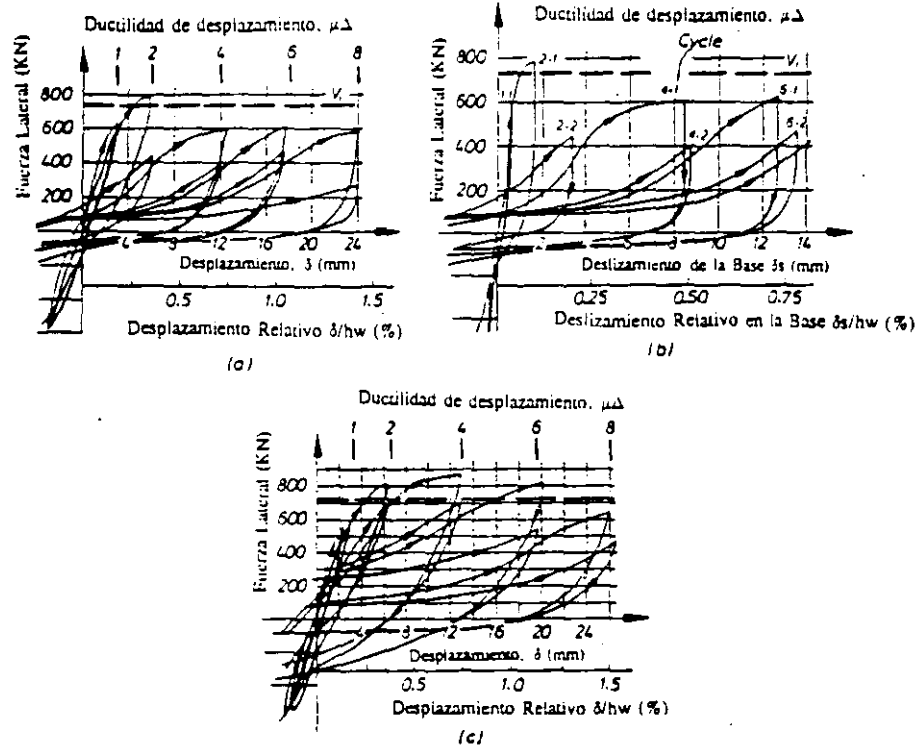


Fig. 15 Respuesta histerética de muros robustos con patines con falla controlada por deslizamiento en la base

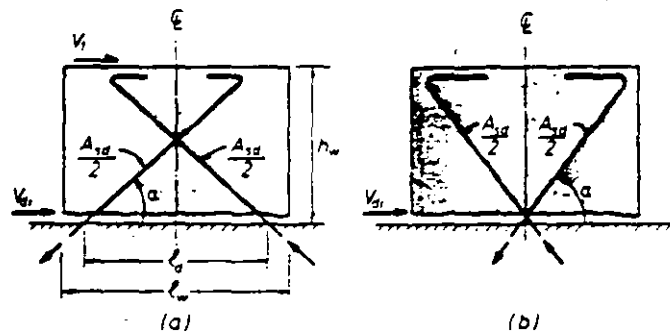


Fig. 16 Refuerzo diagonal en muros robustos

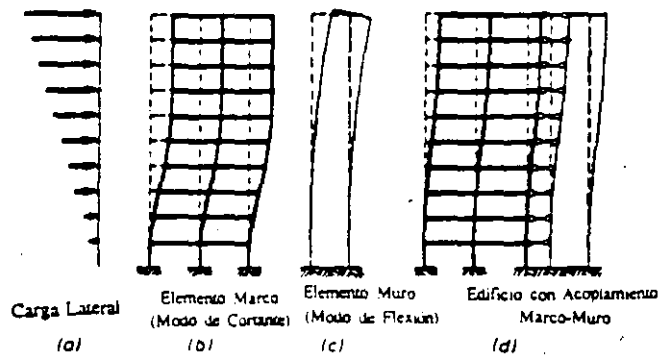


Fig. 17 Patrones de deformación ante cargas laterales de un marco, un muro y un sistema mixto muro-marco

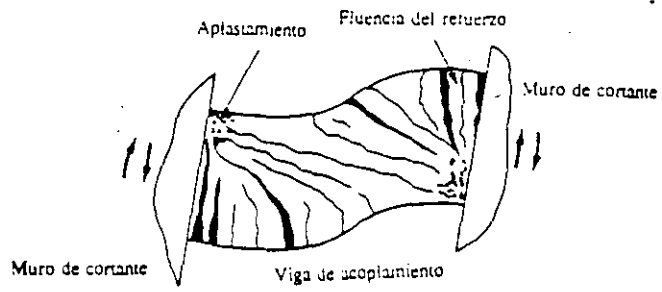


Fig. 18 Deformación y agrietamiento de vigas de acoplamiento

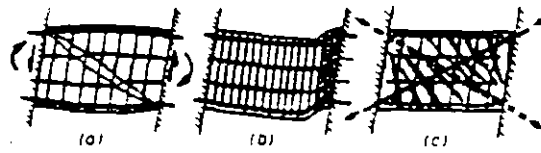


Fig. 19 Mecanismos de resistencia al corte de una viga de acoplamiento

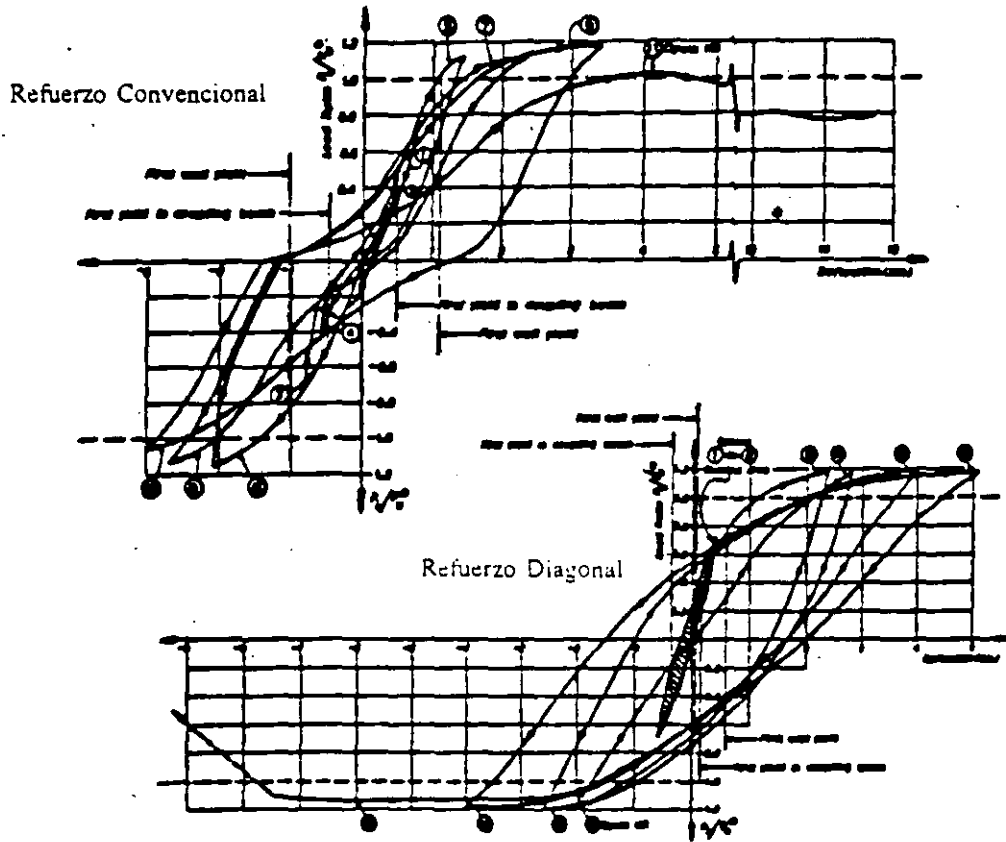


Fig. 20 Comportamiento de vigas de acoplamiento reforzadas convencionalmente y con acero diagonal

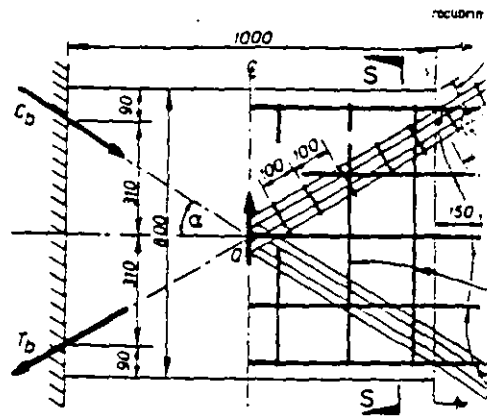


Fig. 21 Detalles del refuerzo de ur

COMPORTAMIENTO Y DISEÑO DE ESTRUCTURAS DE CONCRETO REFORZADO

UNIONES DE ELEMENTOS

Sergio M. Alcocer
Centro Nacional de Prevención de Desastres e
Instituto de Ingeniería

1. INTRODUCCION.

El diseño de uniones ha sido un aspecto que no ha recibido la debida atención por parte de investigadores, y de profesionales de la construcción y diseño. A menudo se argumenta que la importancia que se le ha dado recientemente a las uniones, en particular la de vigas con columnas, es exagerada ya que no existe evidencia abundante de fallas en sismos pasados. Esta idea se basa en que los problemas en marcos de concreto reforzado se han presentado por diseños mal concebidos en vigas y, particularmente, por un detallado inadecuado de columnas. Sin embargo, sismos recientes, como el de El Asnam en 1980 (Fig. 1), los de México en 1985, San Salvador en 1986, Loma Prieta en 1989, y el de Los Angeles en 1994, han evidenciado fallas por corte y de anclaje en uniones viga-columna.

Es común que los diseñadores olviden el detallado de las uniones. Se deja al constructor la definición de detalles críticos que influyen en el comportamiento de la estructura. Las uniones son críticas porque aseguran la continuidad del edificio y porque transmiten fuerzas de un elemento a otro. Así, las cargas y fuerzas deben transmitirse del sistema de piso a las trabes, de ellas a las columnas, y de las últimas a la cimentación. La transferencia de fuerzas entre los elementos depende del detallado cuidadoso de las uniones y de la supervisión minuciosa que asegure que la fabricación y la construcción sigan las instrucciones o intenciones del diseñador.

2. CRITERIOS DE DISEÑO DE UNIONES VIGA-COLUMNA

Los criterios de diseño de uniones viga-columna se pueden formular como sigue:

1. La resistencia de la unión debe ser mayor o igual que la máxima demanda que corresponda a la formación del mecanismo de colapso del marco. Esto eliminará la necesidad de reparar una región inaccesible y que sufre deterioros de resistencia y rigidez considerables si se somete a acciones cíclicas en el intervalo inelástico.
2. La resistencia de la columna no debe afectarse por una posible degradación de resistencia de la unión.
3. Ante sismos moderados, las uniones deben responder en el intervalo elástico.
4. Las deformaciones de la unión no deben contribuir significativamente al desplazamiento de entrepiso.
5. El refuerzo en la unión, necesario para garantizar un comportamiento satisfactorio, no debe dificultar la construcción. Una unión típica conecta elementos provenientes de tres direcciones; se debe evitar la interferencia de las varillas que vienen de todas las direcciones.

3. COMPORTAMIENTO ESPERADO

Puesto que la respuesta de uniones viga-columna está controlada por mecanismos de corte y adhe. que tiene un comportamiento histerético pobre, no es posible considerar a la unión como una fuente importante de disipación de energía. Por tanto, la unión debe experimentar bajos niveles de agrietamiento y plastificación. La unión debe detallarse de manera que sus deformaciones no contribuyan significativamente a la distorsión del entrepiso (se entiende por distorsión al cociente del desplazamiento relativo entre los pisos de entrepiso). Uniones bien diseñadas contribuyen en 20% a la distorsión total.

Como ejemplo, una unión de fachada estará sometida a las fuerzas indicadas en la Fig. 2. En la Fig. 2b se presenta la distorsión angular de la unión. El agrietamiento de las vigas en las caras de las columnas, y el fisuramiento de las columnas en las partes superior e inferior de las vigas son el resultado del deslizamiento del refuerzo a través de la unión. Es común suponer en el análisis de edificios que las condiciones de apoyo de las vigas en las columnas son iguales a un empotramiento. En realidad, el refuerzo de las vigas se deslizará aun para bajos niveles de esfuerzo, de manera que un empotramiento perfecto no es posible. La unión se deforma en cortante por las fuerzas resultantes que obran en la unión (Fig. 2c), las cuales producen tensión a lo largo de una diagonal de la unión y compresión a lo largo de la otra. Las primeras grietas diagonales aparecen cuando los esfuerzos principales de tensión exceden la resistencia a tensión del concreto. Puesto que las grietas son similares a las grietas por cortante en una viga, las primeras recomendaciones de diseño se basaron en ecuaciones adaptadas de requerimientos de corte para vigas. Es importante notar que las magnitudes de las fuerzas a las que se somete una unión son varias veces las aplicadas en vigas y columnas.

Ante sismos, las vigas que llegan a la unión en lados opuestos probablemente estarán sujetas a momentos flexionantes de signos opuestos. Los factores más importantes a considerar en el diseño de uniones viga-columna incluyen:

1. Cortante.
2. Anclaje del refuerzo.
3. Transmisión de carga axial.

4. TIPOS DE UNIONES EN MARCOS DE CONCRETO REFORZADO

4.1 Según su Configuración Geométrica

De acuerdo al tipo de anclaje de las varillas de las vigas, las uniones se pueden clasificar en interiores (las varillas pasan rectas a través de la unión, Fig. 3) y en exteriores (las barras se anclan mediante ganchos, Fig. 4). Atendiendo a la configuración de los elementos adyacentes, existen varios tipos de uniones exteriores. Por claridad en el dibujo no se muestran las losas de piso (monolíticas con las vigas).

4.2 Según el Intervalo de Comportamiento

Aunque es preferible diseñar las uniones para que permanezcan en el intervalo elástico, es muy posible que ocurran deformaciones inelásticas en ella si los elementos adyacentes, vigas o columnas, se deforman plásticamente. En este caso las deformaciones inelásticas a lo largo de las varillas penetrarán la junta; esta unión será del tipo inelástico. Por otro lado es posible diseñar un marco de manera que se articulen las vigas lejos de la unión (Fig. 5), de manera que esta permanezca en el intervalo elástico. Para este tipo de marcos la unión será elástica.

5. MECANISMOS DE RESISTENCIA AL CORTE EN UNIONES INTERIORES

Un marco de concreto reforzado, diseñado según el Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal (RDF-87) debe disipar energía ante cargas inducidas por sismos, mediante la formación de articulaciones plásticas en las vigas. Cuando éstas desarrollan sus resistencias máximas, las uniones estarán sujetas a fuerzas cortantes elevadas.

Bajos los efectos sísmicos, se generan momentos flexionantes y fuerzas cortantes en vigas y columnas que esfuerzan al núcleo de la unión como se ilustra en la Figs. 6a y 6b. En este dibujo las resultantes de los esfuerzos de tensión se denotan como T, y las resultantes de esfuerzos de compresión en el concreto y acero se identifican como C.

Por equilibrio de fuerzas horizontales tenemos que

$$V_{jh} = T_B + T'_B - V_c$$

donde V_c es el promedio de las fuerzas cortantes de las columnas superior e inferior. El cortante en columnas es el correspondiente al desarrollo de los momentos máximos en las vigas.

Se han identificado dos mecanismos de resistencia al corte en uniones interiores. El mecanismo del puntal diagonal de compresión (Fig. 6c) se forma a lo largo de la diagonal principal de la unión como resultante de los esfuerzos verticales y horizontales de compresión que actúan en las secciones críticas de vigas y columnas. Es importante notar que el puntal se desarrolla independientemente de las condiciones de adherencia de varillas dentro de la unión. En este mecanismo, el nudo fallará cuando el puntal lo haga por compresión-cortante. En la Fig. 7 se muestran los lazos histeréticos de una unión que falló por cortante.

En el segundo mecanismo, llamado de armadura, se forman pequeños puntales diagonales distribuidos en la unión (Fig. 6d). Estos puntales deben ser equilibrados por esfuerzos de tensión en el refuerzo vertical y horizontal, y por esfuerzos de adherencia a lo largo de las barras de vigas y las varillas externas de la columna. Este mecanismo es posible únicamente si se mantiene una buena adherencia a lo largo del refuerzo de vigas y columnas. Sin embargo, es difícil mantener una buena adherencia después de la fluencia del acero. Conforme la adherencia se deteriora (y, por tanto, las varillas se deslizan dentro de la unión) el mecanismo de la armadura se degrada, de manera que el puntal diagonal de compresión tiene que resistir la mayor parte de la fuerza cortantes en la unión.

Las expresiones de diseño de las Normas Técnicas Complementarias de Diseño y Construcción de Estructuras de Concreto (NTC-Concreto) se basan en el mecanismo del puntal diagonal a compresión.

Ensayes de laboratorio han indicado que la resistencia al corte de uniones aumenta con la resistencia del concreto.

Por otro lado, se ha mostrado que es necesario colocar una cantidad mínima de refuerzo transversal para mantener el concreto y la resistencia al corte. También se ha notado que si se incrementa la cantidad de acero lateral en la unión, no se obtienen mayores resistencias al corte.

Los resultados de ensayos indican que la presencia de vigas transversales, sean cargadas o no, mejoran el comportamiento de la unión porque contribuyen a preservar la integridad del concreto del núcleo. En forma similar, el ancho de las vigas también influye en el comportamiento.

Se han aplicado diferentes niveles de carga axial en la columna en ensayos de laboratorio. Los resultados indican que la carga axial en la columna no influye en la resistencia de la unión.

La losa de piso ha sido incluida en algunos especímenes. De acuerdo a lo observado, se ha destacado la participación de la losa en el confinamiento de la unión y en la capacidad a flexión de las vigas. Se ha encontrado que la contribución del refuerzo de la losa sumado a aquella del acero de la viga, aumenta la resistencia a flexión (lecho superior a tensión).

Se ha encontrado que un deficiente comportamiento de la adherencia afecta severamente la rigidez y capacidad de disipación de energía de la unión. Aun más, el deterioro en la adherencia modifica el mecanismo de transmisión de fuerza cortante. En la Fig. 8 se presentan las respuestas histeréticas para dos modelos, llamados A y O. Para el espécimen A se aprecian lazos con baja disipación de energía (área interna reducida) y deterioro de la rigidez debidos a un anclaje inadecuado de las barras rectas, mientras que las curvas para el modelo O exhiben una respuesta estable con buena disipación de energía.

Los parámetros que influyen en la adherencia de las varillas a través de las uniones son:

1. Confinamiento, que afecta significativamente el comportamiento de la adherencia bajo condiciones sísmicas. La adherencia de las barras de vigas puede mejorarse si se aumenta el confinamiento, ya sea mediante una carga axial o por medio del refuerzo longitudinal interior de la columna.
2. Diámetro de la varilla. Aunque no afecta significativamente la resistencia a la adherencia, sí limita la fuerza máxima que puede ser transferida por este mecanismo. Por tanto, la relación entre el diámetro de las varillas con respecto a las dimensiones de la unión debe mantenerse constante (límite superior). Mientras mayor es esta razón, aumenta la probabilidad de falla de la adherencia.
3. Resistencia a la compresión del concreto. No afecta de manera importante ya que la adherencia depende de la resistencia a la tensión del concreto.
4. Separación entre las varillas. Si la separación es menor de cuatro veces el diámetro de la varilla, la resistencia de adherencia disminuye en un 20%.
5. Tipo de corrugación. La reacción de la corrugación contra el concreto circundante es la fuente más importante de la adherencia. Debe considerarse la posición de las varillas durante el colado. En efecto, si se colocan 30 cm o más de concreto por debajo de la varilla, la resistencia a la adherencia disminuye.

6. UNIONES EXTERIORES VIGA-COLUMNA

Puesto que en una unión exterior sólo se conecta un viga a columna, en la dirección de estudio (Fig. 9), la fuerza cortante en la unión será menor que la que se aplica en las uniones interiores de dimensiones y refuerzo iguales. De las resultantes del dibujo, la fuerza cortante horizontal en la unión es igual a

$$V_{jh} = T - V_{col}$$

Análogamente a las uniones interiores, se distinguen dos mecanismos de resistencia al cortante: el del puntal diagonal de compresión y el de la armadura.

Con objeto de obtener un comportamiento adecuado de uniones exteriores ambos lechos de las varillas de las vigas deben doblarse hacia la unión; el gancho debe colocarse lo más cerca de la cara externa de la columna como sea posible, a menos que la columna sea muy profunda (ya que sería un muro esbelto).

De acuerdo a la gráfica, para resistir los momentos flexionantes y las fuerzas cortantes sísmicas, se formará un puntal diagonal (ver Fig. 9) entre el radio del doblado de la varilla superior y la esquina inferior derecha de la unión. Es importante destacar que para mantener este mecanismo de transferencia de carga es indispensable confinar la unión con refuerzo transversal.

En efecto, el acero lateral en uniones exteriores persigue dos objetivos. Primero, confinar el concreto a compresión para incrementar su capacidad de deformación y mantener su resistencia (quizá aumentarla). Segundo, confinar el tramo recto del gancho que tratará de salirse por la cara externa de la columna.

Los siguientes aspectos deben considerarse en el diseño de uniones exteriores:

1. Si se espera la formación de una articulación plástica en la cara de la columna, el anclaje de las varillas de la viga se debe suponer que inicia dentro de la columna. Las NTC-Concreto suponen que la sección crítica, a partir de la cual se mide la longitud de desarrollo, coincide con el paño externo del núcleo de la columna.
2. Para garantizar un anclaje adecuado de las varillas de la viga en columnas poco profundas se recomienda:
 - a. Usar varillas de diámetro pequeño.
 - b. Emplear placas de anclaje soldadas a las varillas.
 - c. Colocar pequeñas varillas en el radio interior del dobléz para retrasar el aplastamiento o desprendimiento del concreto en ese lugar.
 - d. Colocar una cantidad suficiente de estribos horizontales para restringir el movimiento del gancho.
3. Las varillas de las vigas deben doblarse hacia dentro de la unión. El detalle de colocar el dobléz hacia afuera de la unión, es decir, hacia la columna, no es adecuado en zonas sísmicas.
4. Colocar el dobléz del gancho lo más cercano a la cara externa de la columna.
5. Cuando la arquitectura del edificio lo permita, o cuando vigas peraltadas lleguen a columnas esbeltas, se recomienda terminar las varillas de las vigas en pequeñas extensiones en la fachada (Fig. 10). Este detalle mejora notablemente las condiciones de anclaje de las varillas, lo que se traduce en un comportamiento superior de la unión.
6. Para reducir los esfuerzos de adherencia, siempre es preferible el empleo de varillas con el menor diámetro como sea práctico. En uniones exteriores, no es aplicable el requerimiento del diámetro de la varilla en función de las dimensiones de la columna. En general, es más fácil cumplir con los requisitos de anclaje en las uniones exteriores que en las interiores.

7. DISEÑO DE UNIONES VIGA-COLUMNA SEGUN NTC-CONCRETO

Como se mencionó anteriormente, el diseñador debe prestar atención a dos aspectos para lograr que la unión viga-columna se comporte adecuadamente: la resistencia de la unión al corte y el anclaje de las varillas de la viga. Ambos estados límite son cubiertos por los requisitos para el diseño de uniones viga-columna de NTC-Concreto incluidos en el Art. 5.4. Para revisar la resistencia del nudo a fuerza cortante en cada dirección principal, en forma independiente, se considerará un plano horizontal a media altura del nudo. Para esta revisión, las NTC-Concreto distinguen dos casos:

1. Nudo confinado, que es aquél al cual llegan cuatro trabes y en donde el ancho de cada una es al menos 0.75 veces el ancho respectivo de la columna.
2. Otros nudos, que son los que no satisfacen lo anterior.

Para nudos confinados el esfuerzo máximo nominal es igual a $5.5\sqrt{f'_c}$ y para otro tipo de uniones es igual a $4.5\sqrt{f'_c}$. Se supone que un nudo confinado resiste cargas superiores a otros nudos. El esfuerzo nominal obrará sobre un área definida por la profundidad de la columna y un ancho efectivo, que es, por lo general, igual al promedio de los anchos de la o las vigas y de la columna en la dirección de análisis. Los esfuerzos máximos señalados se refieren a la resistencia a compresión-cortante del concreto en el mecanismo del puntal diagonal de compresión.

Para confinar el concreto del nudo, así como los ganchos de las varillas en uniones exteriores, se debe colocar refuerzo transversal mínimo como en columnas. Al igual que en columnas, el acero lateral estará formado

por estribos cerrados de una pieza, sencillos o sobrepuestos. Los estribos deben rematarse con dobleces de 135 grados, seguidos de tramos rectos de no menos de 10 diámetros de largo. La separación no debe exceder de la cuarta parte de la menor dimensión transversal del elemento, ni de 10 cm. Los requisitos anteriores preservan la integridad del concreto de manera que se mantenga el mecanismo de transferencia del puntal diagonal de compresión. Es importante cumplir estrictamente con los requisitos anteriores para evitar daños severos, difíciles de reparar, en la unión. Si el nudo está confinado como se indicó arriba, las NTC-Concreto permiten usar la mitad del refuerzo transversal mínimo. Esto reconoce que las trabes que llegan a la unión la confinan por lo que no se requiere la misma cantidad de acero lateral que para nudos no confinados.

El segundo aspecto importante en el diseño es el anclaje de las varillas. Para evitar fallas de adherencia que, como ya se dijo, afectan la rigidez y capacidad de disipación de energía de la unión, las NTC-Concreto señalan que el diámetro de las barras de vigas y columnas que pasen rectas a través de la junta deben seleccionarse de manera que la dimensión del elemento en la dirección de la varilla sea cuando menos 20 veces el diámetro de ella. Así, por ejemplo, si la columna tiene una profundidad de 50 cm, el diámetro máximo de varilla que puede usarse es del No. 25 (la designación esta en milímetros y corresponde a una varilla de 1 pulg de diámetro). Se permite que el peralte de la viga sea 15 veces el diámetro cuando más del 50% de la carga lateral es resistida por muros estructurales o cuando la carga axial de la columna superior al nudo es alta.

Para juntas exteriores, como se explicó, las varillas deben terminar en ganchos a 90 grados. La longitud de desarrollo se mide desde el plano externo del núcleo de la columna hasta el paño externo de la barra en el doblez. La ecuación para calcular la longitud de desarrollo en kg y cm² es

$$L_d = 0.076 d_b \frac{f_y}{\sqrt{f_c}}$$

donde d_b es el diámetro de la varilla. El tramo recto después del doblez no será menor de $12d_b$.

Un último aspecto relevante con uniones viga-columna es que las varillas longitudinales de las vigas pasar por el núcleo de la columna. Esto se debe a que no existe suficiente información experimental que permita extrapolar los requisitos de diseño vigentes a casos en los que el refuerzo pase o se ancle afuera de la columna. El refuerzo de los modelos ensayados que sirvieron de base para la formulación de los requerimientos de las NTC-Concreto se anclaba o pasaba a través del núcleo.

8. UNIONES DE ESQUINA

Las uniones de esquina, o de rodilla, empleadas en marcos planos o en otras estructuras, presentan un problema especial de detallado. La esquina puede estar sujeta a fuerzas que la traten de abrir o de cerrar (Fig. 11). Una situación similar ocurre cuando dos muros se intersecan. Desafortunadamente no existe suficiente información sobre el comportamiento de este tipo de uniones y del las del siguiente tipo antes cargas cíclicas. La discusión que sigue es válida para cargas monótonas.

Ensayes de laboratorio han indicado que la falla de este tipo de uniones es el resultado del agrietamiento por tensión diagonal, por falla de anclaje (sobre el refuerzo), por fluencia del acero, por daño del anclaje o por aplastamiento del concreto. Aunque la tensión diagonal es a menudo ignorada, esta puede ser la causa de la falla en esquinas que se abren. El anclaje es el problema más común en esquinas que tratan de cerrarse. El agrietamiento diagonal en una unión que se abre se presenta en la Fig. 12. El refuerzo debe colocarse como se ilustra. El refuerzo se debe anclar con ganchos. Para confinar el concreto que resiste compresión se deben colocar estribos cerrados.

9. UNIONES EN FORMA DE "T"

Este tipo de uniones se presentan cuando una losa se conecta con un muro, cuando los muros se conectan con zapatas, en vigas que llegan a columnas, o en columnas que llegan a vigas de techo. Se han conducido ensayos de laboratorio (Fig. 13) en los cuales se observó un incremento en la resistencia conforme se usan los detalles de las gráficas de la derecha. En efecto, solamente con cambiar la dirección del gancho se incrementó la resistencia en 40%. Esto se debe a que el puntal de compresión que se desarrolla a través de la junta produce el desconchamiento del concreto abajo del gancho cuando éste se dobla hacia la derecha. Cuando el gancho se coloca hacia la izquierda, el puntal de compresión reacciona contra el radio del doblaje, como en el caso de uniones exteriores viga-columna.

10. LAS UNIONES EN LOS PLANOS DE CONSTRUCCION

Para evitar errores o malas interpretaciones durante la construcción de uniones, es necesario que el diseñador muestre los detalles de las conexiones en los planos estructurales. Al momento de incluir estos detalles, el diseñador es forzado a verificar que dicho detalle se pueda construir. Esto se relaciona con la colocación del refuerzo, y con la colocación y compactación del concreto. Por ejemplo, una viga del mismo ancho que el de la columna causará problemas al obrero de la construcción si durante el diseño no se consideró que un recubrimiento igual sobre el acero transversal de la viga y la columna, provocará que los refuerzos longitudinales de la columna y la viga coincidan. Si en este caso la sección transversal de la columna se agrandara no habría problema. Las NTC-Concreto requieren que se incluyan dibujos acotados y a escala del refuerzo en uniones viga-columna (Art. 5.4); sin embargo, lo anterior debe ser aplicado en otro tipo de uniones.

11. BIBLIOGRAFIA

1. Alcocer, S.M., y Jirsa, J.O., "Reinforced concrete frame connections rehabilitated by jacketing," PMFSEL Report No. 91-1, Phil M. Ferguson Structural Engineering Laboratory, Universidad de Texas en Austin, julio 1991, 221 pp.
2. American Concrete Institute, "Design of beam-column joints for seismic resistance," ACI SP-123, Detroit, Michigan, 1991, 518 pp.
3. Departamento del Distrito Federal, "Normas técnicas complementarias para diseño y construcción de estructuras de concreto," Gaceta Oficial del Departamento del D.F., 26 de noviembre de 1987, 73 pp.
4. Ferguson, P.M., Breen, J.E., y Jirsa, J.O., "Reinforced concrete fundamentals, John Wiley & Sons, Nueva York, 5a. ed., 1988, 746 pp.
5. Jirsa, J.O., "Reinforced concrete structures," notas de clase, Universidad de Texas en Austin, 1987.
6. Klingner, R.E., "Reinforced concrete structures," notas de clase, Universidad de Texas en Austin, 1985.
7. Paulay, T., y Priestley, M.J.N., "Seismic design of reinforced concrete and masonry buildings," John Wiley & Sons, Nueva York, 1a. ed., 1992, 744 pp.
8. Zhu, S., y Jirsa, J.O., "A study of bond deterioration in reinforced concrete beam-column joints," PMFSEL Report No. 83-1, Phil M. Ferguson Structural Engineering Laboratory, Universidad de Texas en Austin, julio 1983, 69 pp.

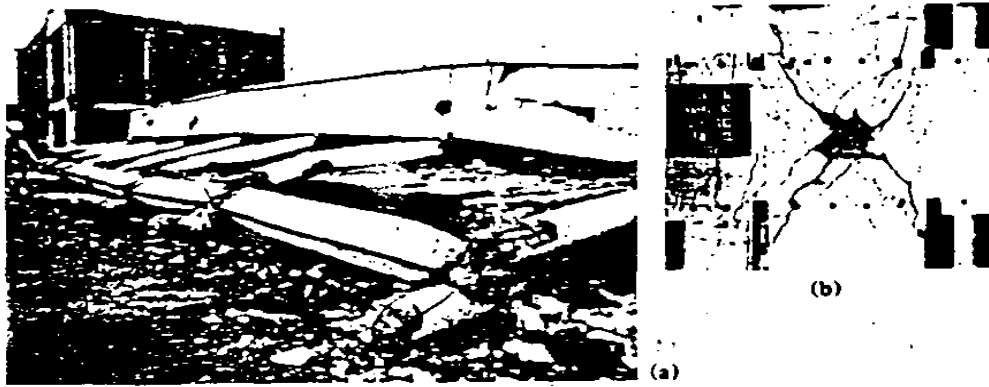


Fig. 1 Falla de uniones viga-columna en (a) el sismo de El Asnam y (b) en un espécimen de laboratorio

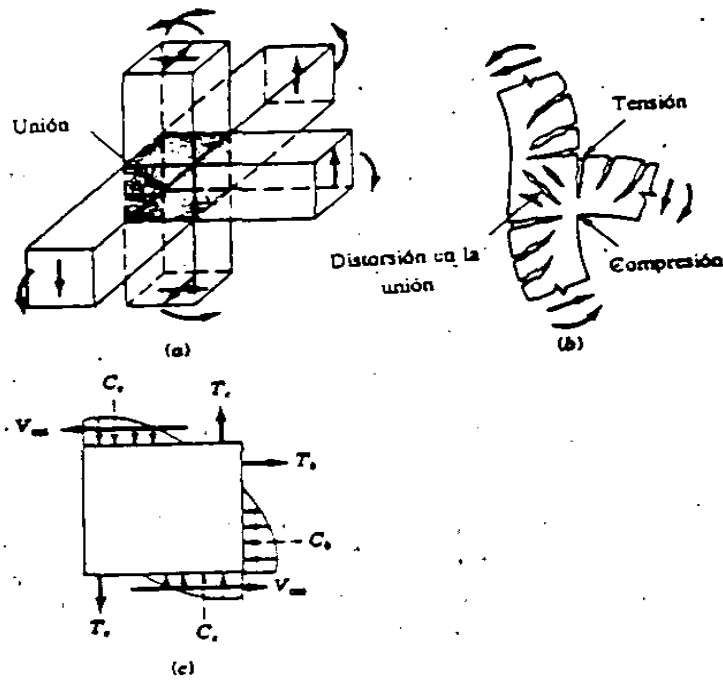


Fig. 2 Fuerzas y distorsión de una unión viga-columna

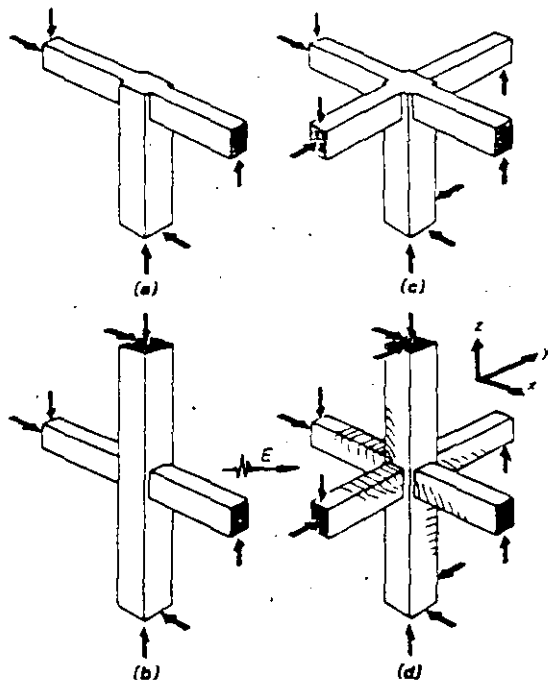


Fig. 3 Uniones interiores viga-columna

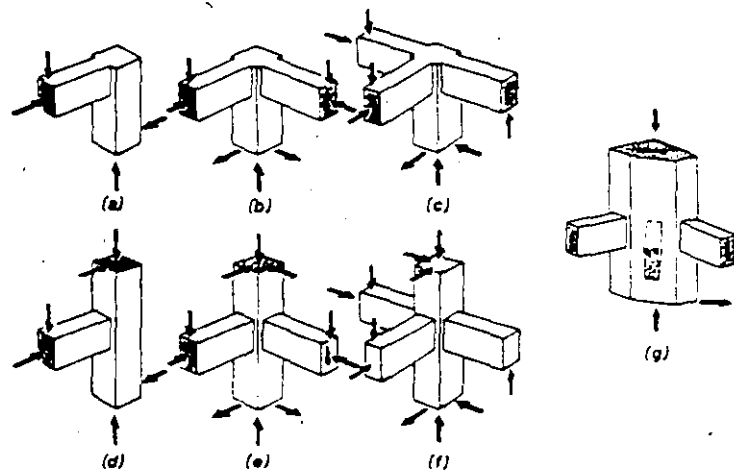


Fig. 4 Uniones exteriores viga-columna

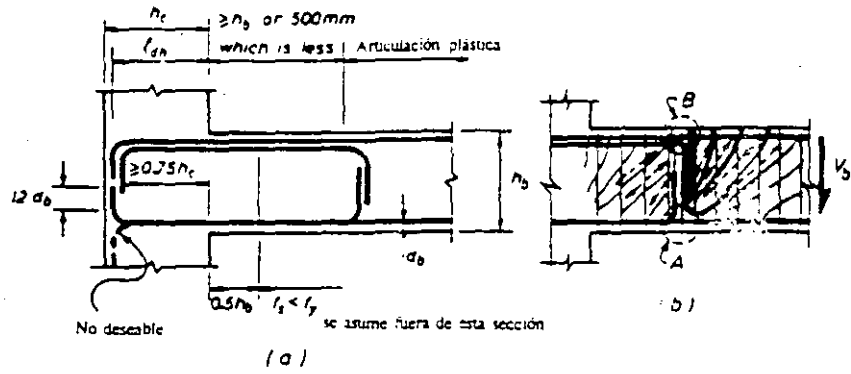


Fig. 5 Relocalización de la región de articulación plástica lejos de la cara de la columna

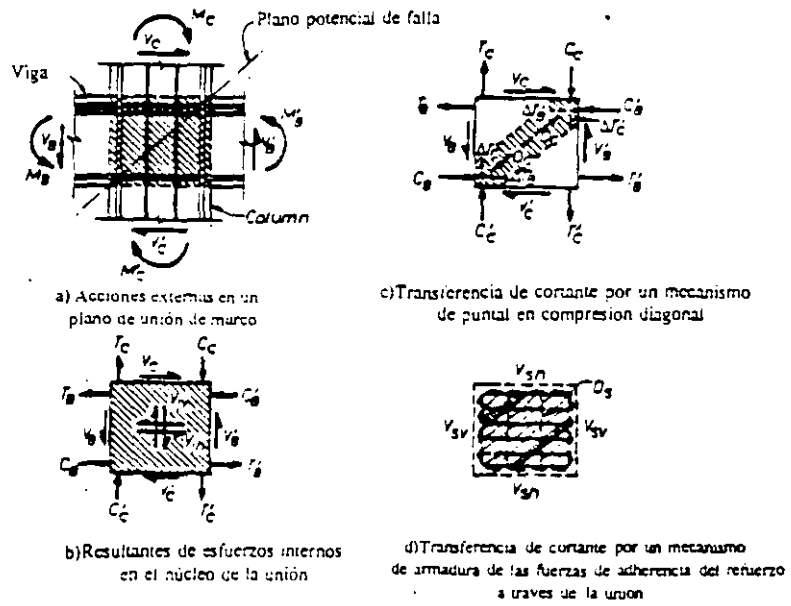


Fig. 6 Mecanismos de resistencia al corte en uniones interiores viga-columna

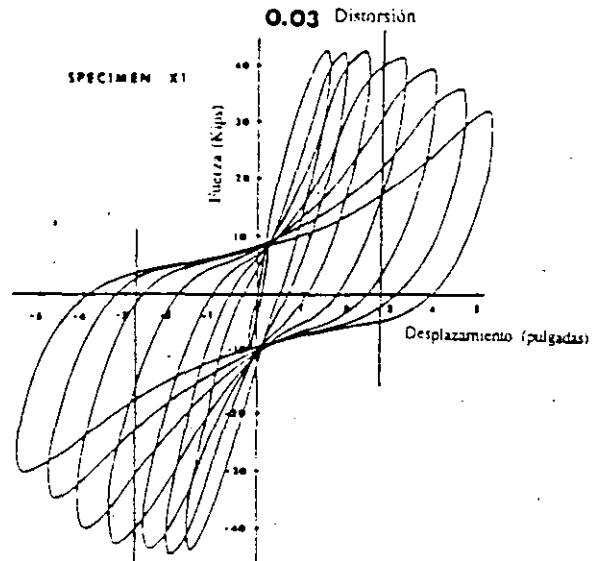


Fig. 7 Falla por cortante en una unión interior viga-columna

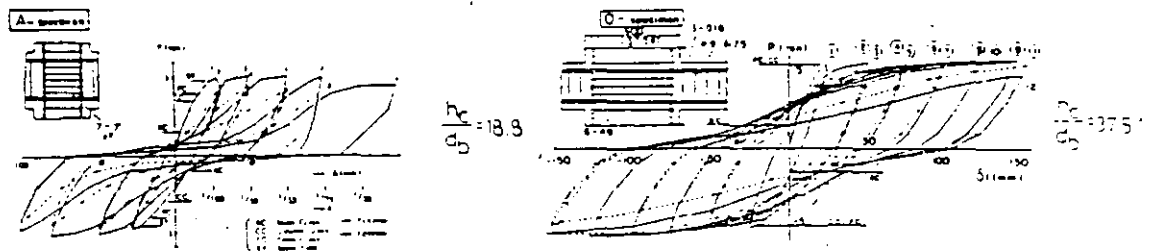


Fig. 8 Influencia del anclaje en la respuesta histerética de una unión interior viga-columna

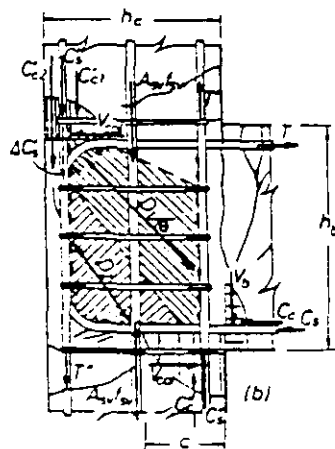


Fig. 9 Mecanismos de resistencia al corte en uniones exteriores viga-columna

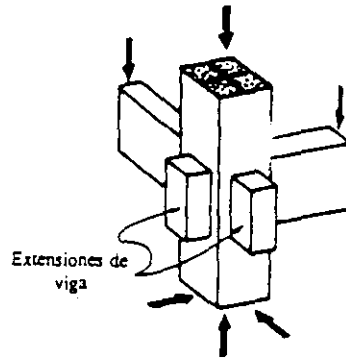


Fig. 10 Extensiones de viga para colocar las varillas

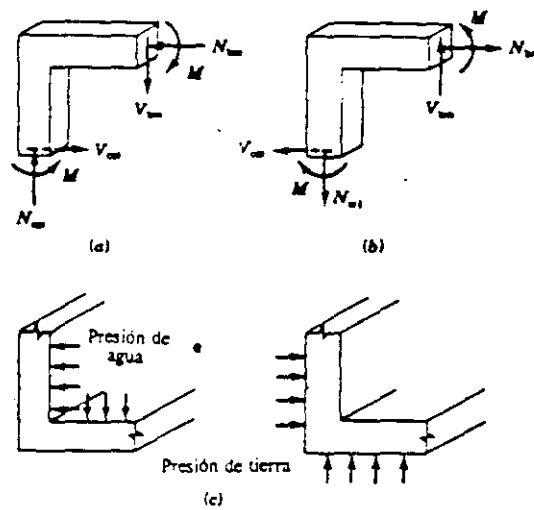


Fig. 11 Uniones de esquina

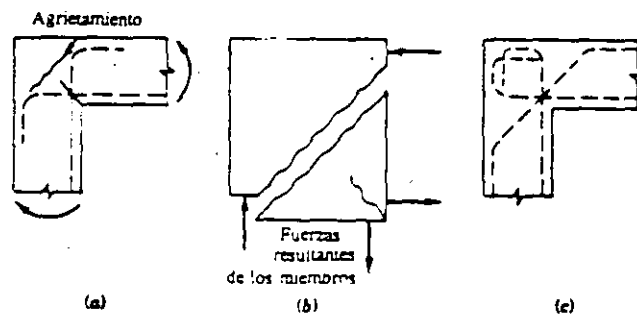


Fig. 12 Unión de esquina que se trata de abrir

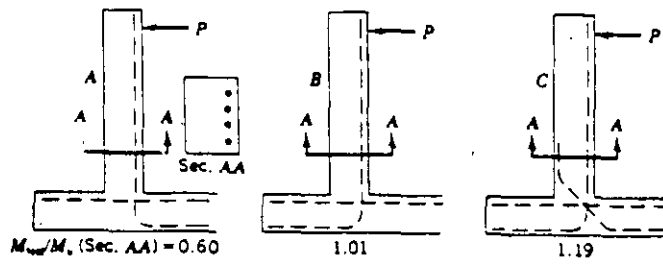


Fig. 13 Uniones en "T"

SEISMIC BEHAVIOUR OF STRUCTURAL CONCRETE LINEAR ELEMENTS
(BEAMS, COLUMNS), AND THEIR CONNECTIONS

COMPORTEMENT SISMIQUE DES ELEMENTS STRUCTURAUX LINEAIRES
(POUTRES, POTEAUX) ET DE LEURS JONCTIONS

Vitelmo V. BERTERO

University of California
Berkeley, Calif. U.S.A.

SUMMARY

This state-of-the-art report summarizes knowledge of seismic behavior of linear reinforced concrete elements; points out studies which have already led to improved design and construction rules for seismic resistant structures; discusses problems without satisfactory solutions; and formulates recommendations for research and development. This report has been divided into eight main sections. The first section includes introductory remarks, objectives and scope. The second section reviews general aspects and problems involved in predicting seismic behavior of R/C linear elements and their connections. The third, fourth, and fifth sections review seismic behavior of beams, columns, and beam-column joints, respectively. In these sections only the behavior of elements cast with normal weight aggregate and ordinarily reinforced are discussed; lightweight aggregate elements are reviewed in section six. Section seven reviews seismic behavior of prestressed, and of precast elements and their connections. Finally a summary, conclusions, and recommendations for future research and development are presented.

RESUME

Ce rapport résume les connaissances du comportement séismique des éléments linéaires du béton armé. Il souligne les études qui ont conduit à une amélioration des méthodes de "design" et de construction des structures résistantes aux secousses séismiques. Ce rapport discute aussi des problèmes pas encore résolus, et formule des recommandations relatives aux besoins de recherche et de développement. Le rapport a été divisé en huit sections. La première section contient l'introduction, les objectifs et le cadre de l'étude. La deuxième passe en revue des aspects et des problèmes rencontrés dans la prédiction du comportement séismique des éléments linéaires de béton armé et leurs connections. Les troisième, quatrième, et cinquième sections sont consacrées au comportement séismique des poutres, des colonnes, et des connections poutre-colonnes. Ces sections se limitent aux éléments de béton fabriqués avec des agrégats de poids normal, et armés de façon standard. La sixième section traite les éléments fabriqués avec des agrégats légers. La septième est consacrée au comportement séismique des éléments précontraints et préfabriqués, et leurs connections. Finalement, un résumé, des conclusions, et des recommandations pour les futures recherches et développements sont présentés.

1. INTRODUCTION

1.1 General

Significant advances have been made in the U.S. in the last two decades in understanding seismic behavior of concrete structures. This is particularly true for concrete structures of the moment-resisting frame type whose basic elements are beams and columns, their connections and supports, and interacting floor slabs. The stimulus for these advances were [1]; the First World Conference on Earthquake Engineering in 1956 [2]; the publications of 1959 SEAOC Blue Book [3]; the PCA Manual in 1961 [4]; and the damages caused by the following earthquakes: 1964 Alaska [5], 1967 Caracas, Venezuela [9], the 1968 Tokachioki, Japan, and 1971 San Fernando [6].

By reviewing the proceedings of the six world conferences on earthquake engineering [2, 7-11], a picture can be obtained of the advances made during the last two decades in predicting seismic behavior of concrete structures. These advances have been particularly noticeable in the last ten years, and have had some impact in earthquake resistant design of all kinds of concrete structures. However, much of present knowledge has not been practically applied, because usually there are several problems to overcome before research results can be introduced into codes and implemented in practice [1]. In spite of these problems there has been considerable progress in developing code requirements for earthquake resistant construction. This is reflected in new codes such as the 1976 Mexican Code [12, 13], the 1976 New Zealand Code [14], and the Tentative Provisions for the Development of Seismic Regulations for Buildings [15].

The work that has been done in the field of seismic behavior of structural concrete linear elements and their connections cannot be reviewed adequately or even summarized in one short paper. Therefore some restrictions will have to be placed in the objectives and scope of this report.

1.2 Objectives

The main objectives of this report are:

- 1) to summarize present knowledge of seismic behavior of linear reinforced concrete elements; pointing out those studies which have already led or may lead to improved design and construction rules for seismic resistant structures;
- 2) to discuss problems whose solutions are not yet satisfactory and to formulate recommendations for research and development needs.

1.3 Scope

To achieve the above objectives, first a summary was made of the data and results available from studies of the seismic behavior of linear reinforced concrete elements and their subassemblages, and complex structures made of such structural elements. The significance of these results was analyzed in light of the total problem of the design and construction of seismic resis-

tant concrete structures. Ordinarily reinforced linear elements cast in place of normal weight concrete are considered first. Then the problems created by the use of lightweight concrete and the use of prestressing and precasting techniques are discussed.

This state-of-the-art report has been divided in to eight main sections.

1. Introduction
2. Review of General Aspects and Problems Involved in Predicting Seismic Behavior of Structural Concrete Linear Elements and their Connections
3. Seismic Behavior of Structural Concrete Beams
4. Seismic Behavior of Structural Concrete Columns
5. Seismic Behavior of Beam-Column Joints
6. Seismic Behavior of Structural Lightweight Concrete Linear Elements and their Connections
7. Seismic Behavior of Prestressed and Precast Linear Elements and their Connections
8. Summary, Conclusions and Recommendations for Future Research and Development.

A review of the state-of-the-art of experimental work on seismic behavior of linear elements up to 1972 has been presented by the author in Ref. 16. Therefore, in this report only accomplishments not reviewed in Ref. 16 and particularly those in studies published since 1972, will be presented. A review of studies carried out up to the beginning of 1977, as well as a discussion of the accomplishments and research and development needs at that year, has been presented in a workshop on "Earthquake-Resistant Reinforced Concrete Building Construction" (ERCBC) sponsored by the U.S. National Science Foundation [17]. Most of the present report is based on the papers, reports and discussions presented at the ERCBC workshop and those that have been published since then. Because of lack of time and space, it has not been possible to present an exhaustive review of the subject under consideration. Only general questions of the seismic behavior of linear elements are discussed herein. For a more detailed discussion the reader is referred to Ref. 17.

2. REVIEW OF GENERAL ASPECTS AND PROBLEMS INVOLVED IN PREDICTING SEISMIC BEHAVIOR OF STRUCTURAL CONCRETE LINEAR ELEMENTS AND THEIR CONNECTIONS

2.1 General Remarks

Seismic performance of reinforced concrete structures during moderate and severe earthquake ground motions has ranged from minor cracking to complete collapse. Due to these collapses, and the relatively lower strength and ductility per unit weight of ordinary (unconfined) reinforced concrete when compared with structural steel, it has been suggested that concrete structures are particularly vulnerable to earthquakes. However, as Bresler points out [18], many concrete structures have withstood severe earthquakes without significant damage, suggesting that there is nothing inherent in concrete structures which makes them particularly vulnerable to earthquakes. Regardless of the material used, properly designed structures will perform well, although reinforced concrete may be less "forgiving" or less "tolerant" of improper construction (workmanship) and maintenance. Due to this sensitivity, to have reinforced concrete structures that will behave satisfactorily under severe earthquake ground motions it is necessary that designers pay special attention to all the factors that can affect seismic structural performance. It is not enough to design structures in accordance with the requirements of the latest seismic codes. Performance of a structure depends on its state when the earthquake strikes, which may well be significantly different from the state the designer thought would exist at that time. Thus, modifications, maintenance, and repair of structures during their lives must be considered in addition to the general aspects involved in their construction.

The general philosophy of earthquake-resistant design for buildings other than essential facilities has been well established and proposes to: prevent nonstructural damage in frequent minor earthquake ground shakings; prevent structural damage and minimize non-structural damage in occasional moderate earthquake shakings; and avoid collapse or serious damage in rare major ground shakings. This philosophy is in complete accord with the concept of comprehensive design. However, current design methodologies fall short of realizing the objectives of this general philosophy [19].

In a comprehensive design approach it should be recognized that building damage may result from different seismic effects: (1) ground failures due to fault ruptures or to the effects of seismic waves; (2) vibrations transmitted from the ground to the structure; (3) seismic sea waves (tsunamis) and tsunami-like disturbances and seiches in lakes; and (4) other consequential phenomena such as fires, and floods caused by dam failures and landslides.

The seismic effect that usually concerns the structural engineer, and is accounted for by seismic-resistant design provisions of building codes, is the response or vibration of a building to the ground shaking that might occur at its foundation. Although damage due to other effects may exceed that due to vibration of the building, this paper considers only the effects of ground shaking at the foundation of concrete structures.

2.2 Construction and Maintenance Aspects

As pointed out earlier, a building's response, and the damage it sustains during any kind of excitation depends on how the building was actually constructed, not on how the designer thought it would behave. Furthermore, design and construction are intimately related: the achievement of good workmanship depends, to a large degree, on the simplicity of the detailing of members, connections, and supports. This is especially true for reinforced concrete structures. Although it is possible (on paper and even in laboratory specimens) to detail reinforcement in such a way that seismic behavior is considerably improved, in the field such design details may be too elaborate to be economically feasible. A design can only be effective if it can be constructed.

Field inspection has revealed that a large percentage of damage and failure has been due to poor quality control of structural materials and/or poor workmanship, problems which could have been corrected if the building had been carefully inspected during construction. In many other cases, damage, even failure, may be attributed to improper maintenance of buildings during their service life [20].

Analyses of mill tests of reinforcing steel bars, field control tests of concrete cylinders, and mechanical materials studies of specimens removed from the structures, show considerable variation in mechanical characteristics [20]. In view of this variability, present seismic code provisions which specify only minimum and maximum material strengths, and recommend that the design and capacity of members be based on these code specified strengths alone, are unreliable and can lead to unsafe designs. This is especially true in designing connections and in designing for shear for reinforced concrete structures.

2.3 General Features of Seismic-Resistant Design

Efficient seismic-resistant construction necessitates careful attention to the total seismic design, construction, and maintenance process. The phases of this process include: evaluating the seismic threat, selecting the structural layout and predicting the mechanical behavior of the whole soil-building system; proportioning and detailing the structural components, with their connections and supports; analyzing the reliability of the design obtained; and constructing and maintaining the building during its service life.

The main design aspects that should be considered are summarized in the flow diagram shown in Fig. 1. This diagram shows the intimate relationships of the different aspects and steps in the design process. The inelastic response of a structure and therefore of its components, is extremely sensitive to the dynamic characteristics of ground motion to which it is subjected, as well to mechanical characteristics of its structural and non-structural components. Studies of the response of concrete structures to severe earthquakes show that the performance of any specific critical region of an element is not only very sensitive to the ground motion and the mechanical characteristics of the structural materials but even to the final main and secondary reinforcement. This sensitivity must be recognized in order to properly analyze the significance of the results to be presented later.

In most designs the loading that will occur during the life of a structure is uncertain and can only be described in probabilistic terms. This is especially true for seismic loadings as the uncertainties are unusually large. Clearly, it would be rational to take a probabilistic approach to seismic design [32]. To do this it will first be necessary to collect sufficient statistical data.

In summary, the seismic behavior of any element depends on the interaction of the ground motion and the structure to which this element belongs [19 - 22]. The seismic behavior of any structural element cannot be predicted solely on the basis of its mechanical characteristics: the pattern (shape function) of the excitations (forces, deformations, changes in environment, etc.) to which it is subjected must also be defined. Establishing the probable critical excitation involves significant uncertainties and can only be described in probabilistic terms.

In judging the reliability of results from experiments carried out on reinforced concrete, and particularly in assessing the implications of these results for design and construction of real seismic resistant structures, it is necessary to consider the nature and degree of uncertainties in the actual mechanical characteristics of the structural materials (concrete and reinforcing steel) that are used. To define these uncertainties there is a need for extensive collection of field and laboratory experimental data, for statistical study of these data [23] and the variations obtained from them. Studies may then be carried out on the probability of failure of reinforced concrete elements [24]. The uncertainties of seismic loading, combined with uncertainties of actual mechanical characteristics of structural materials, and of mathematical modeling of structural element behavior, make predicting seismic behavior of even the simplest structural elements (such as the linear elements under consideration in this report) extremely complex.

2.4 Importance of Loading History

As pointed out by Park [25], "in the past a variety of loading sequences and acceptance criteria has been used by various research laboratories throughout the world, making the comparison of results difficult and resulting in different conclusions from the obtained results". In Refs. 16, 22 and 26, the author has discussed and illustrated the effects of loading history on different types of reinforced concrete elements and subassemblages. Figure 2 illustrates the effect of different loading histories on the behavior of reinforced concrete columns [27,28]. Similar effects on a beam-column subassemblage of a lightweight reinforced concrete ductile moment-resisting frame are shown in Fig. 3 [29].

In Ref. 28 Jirsa discusses the effect of various loading systems. The importance of this problem was brought out in the workshop on Earthquake-Resistant Reinforced Concrete Building Construction, conducted in Berkeley in 1977 [17]. Several working groups made strong recommendations regarding standard loading histories and acceptable criteria for judging seismic behavior of structural elements (see Volume 1 of Ref. 17).

2.5 Importance of Proper Structural Layout

As summarized in the flow diagram of Fig. 1, in this step the designer must select the structural system, the structural material, and the type of

non-structural components. Proper solutions of the problems encountered in this step require close collaboration between the architect, structural engineer, and manufacturers of materials. Sophistication in the selection of the structural system, structural material, and nonstructural components is of much greater importance than sophistication in analysis. Regardless of how sophisticated a method of analysis an engineer uses he cannot make an ill conceived structural system behave satisfactorily in a severe earthquake. The inertial forces depend upon the mass, damping, and the structural characteristics themselves (stiffness, yielding strength, maximum strength, and energy absorption and energy dissipation capacities). Therefore, decisions made regarding the choice of layout for the structure and the choice of structural and nonstructural material must play a significant role in the seismic performance of the structure during its lifetime. One of the best policies in earthquake resistant design is to avoid problems whose solutions are unreliable or not known. Therefore designers need to understand how design decisions may create serious seismic effects. A discussion of the selection of a proper structural system is offered in Refs. 20 and 30.

Structural material should have high energy absorption and energy dissipation capacities per unit weight. To achieve these high capacities the material should possess: (1) High strength (tension and compression) per unit weight; (2) High stiffness per unit weight; (3) High internal damping per unit weight; (4) High toughness per unit weight; (5) High resistance to low-cycle fatigue; and (6) Stable hysteretic behavior under repeated strain reversals. Furthermore, the structural material should be homogeneous, and easily adaptable and conducive to forming full-strength connections having the same characteristics as the material itself [20,30]. In selecting the best structural material for earthquake resistant construction, a simple plot of the ratio of stress per unit weight versus strain for the different available structural materials can be of use (Fig. 4). Plain normal weight concrete is not a desirable structural material for this type of construction because its weakness in tension requires that it be reinforced. The usually small ductility of ordinary reinforced concrete dictates the use of confined reinforced concrete.

The relatively low value of the strength per unit weight of normal weight concrete suggests the desirability of using lightweight concrete. The advantage of using confined lightweight aggregate concrete can be seen from the results in Fig. 4.

Since reinforced concrete is a composite of reinforcing steel bars and concrete (which is itself a composite material), there are many different types of reinforced concrete material in use today. Possible combinations depend on the different types of aggregate concrete (normal or lightweight) and reinforcing steel (prestressed or non-prestressed) which are used, and if the concrete is cast on site or precast. Precast, partially prestressed lightweight aggregate concrete is the combination most likely to be of greatest use in the future. The technology of lightweight aggregate and the problems of connections of the prefabricated elements, however, have not yet been resolved properly, and at present the most suitable reinforced concrete material for earthquake resistant construction is ordinary reinforced normal weight concrete [20].

2.6 Importance of Studying Behavior of Basic Structural Elements

The importance of studying the behavior of basic structural elements of a complete structure has been considered in Refs. 16, 26, 31 and 32.

It may appear ideal to test real buildings under the actual loading conditions to which they may be subjected during their service life. Such tests are not usually feasible due to economic considerations. Even if it would be economically feasible to test a replica of a given building, very little would be gained as far as improving our general understanding of seismic behavior of the different types of concrete buildings that are in use. There are at least two drawbacks to testing real buildings beyond the economic problem. The first is that the overall seismic response of an actual bare structural system is usually altered or obscured by the participation of nonstructural elements; and also the performance of individual structural elements can be modified by interaction with nonstructural components. This makes it difficult to extrapolate the information gathered to different types of structural systems or even to the same type with different kinds of arrangements of nonstructural elements. Therefore, it becomes desirable to obtain a detailed understanding of the behavior of the basic elements of a structure under loading or deformation similar to that expected from severe seismic ground motion, and how this behavior can be altered by the presence of nonstructural components.

The second drawback to testing real buildings is that information gathered by testing a complete building or structure is difficult to evaluate and usually insufficient to forecast the structure's behavior. Prediction necessitates the development of a theoretical model that may best be developed from observed behavior. A logical way to develop such a theoretical model is to start from an understanding of, and work toward a realistic idealization of, the behavior of simple elements [32].

3. SEISMIC BEHAVIOR OF STRUCTURAL CONCRETE BEAMS

3.1 General

In Ref. 16 the author discussed studies up to 1972 regarding the behavior of structural concrete linear elements and subassemblages. In this reference, rather than discussing results obtained from linear elements (beams and columns) the author has chosen to discuss the behavior of critical regions of these elements, classifying them as: (1) Flexural Critical Regions; (2) Flexural Critical Regions with High Shear; and (3) Flexural Critical Regions with High Axial and Shear Forces. While the first two types of critical regions are developed in beams they can also be associated with columns that are subjected to low axial forces. The third type of critical region usually develops only in columns.

Since 1972 tremendous amounts of research into seismic resistance of structural concrete elements, particularly beams, has been conducted in many countries [17]. In spite of the advances in knowledge due to this recent research, there is still a lack of agreement about some basic questions of seismic behavior of structural concrete elements. Some of these basic questions are described below.

1. What are the best indices for measuring seismic behavior of structural concrete elements?

Moment vs. curvature of the critical sections

Moment vs. rotation of the critical regions

Shear vs. rotation of the critical region

Shear vs. shear distortion of the critical region

Load-displacement relationship of the whole element.

2. What are the critical loading conditions that control the desired seismic behavior?

Monotonically increasing

Cyclic with no force reversal

Cyclic with force reversal, but not deformation reversals

Cyclic with partial deformation reversals

Cyclic with full deformation reversals

3. Which is the critical limit state, i.e. the one that will control design? Is it the serviceability, the damageability, or the collapse limit state?

4. What is the acceptance criterion for strength capacity and deformation, or energy absorption and energy dissipation capacities (ductility)?

What is the maximum deformation (ductility) that can be tolerated or demanded? How many cycles of full load or deformation reversals at different ductility levels are required?

These questions are a result of uncertainties regarding: (1) dynamic characteristics of future earthquake ground motions; and (2) structural response. These uncertainties make it impossible to accurately: (1) simulate the effects of real ground motions on the members of real structures (i.e. the loading or deformation histories to which actual structural members are subjected; and (2) to predict the level of inelastic deformation (ductility) demand which will occur.

No definite or proper answers to the above questions have been offered. A variety of parameters of loading sequence levels; of intensity of deformations; and of acceptance criteria have been and are still used today by different researchers, making comparison of research results very difficult.

In studying the seismic behavior of beams; or more precisely, the hysteretic behavior of flexural critical regions of linear elements which can be subjected to severe seismic excitations, the author has used the moment vs. rotation of the critical regions, and the limit states and loading sequences shown in Fig. 5, particularly Fig. 5(b). Acceptance criterion has varied according to the structural system, the function of the structure, and the seismic risk at the structural site.

Two loading criteria which have been used in New Zealand laboratories in pseudo-static load tests [25] are shown in Figs. 6(b) and 6(c). The ductility factor is calculated using the first yield displacement for the first inelastic load run defined as in Fig. 6(a). The simple loading criterion shown in Fig. 6(b) involves initial loading runs in the elastic range to establish the initial elastic stiffness and then four loading runs in each direction to displacement ductility factors of 4. This criterion follows that recommended in the New Zealand Loading Code [14]. The more complex loading criterion shown in Fig. 6(c) involves more elastic loading runs to observe stiffness changes between the cycles of imposed inelastic deformations, and cycles of imposed inelastic deformation with gradually increasing displacement ductility factor. A simple acceptance criterion is that the seismic load carrying capacity should not reduce by more than 20% during the test [14].

Agreement on the above issues among researchers and designers would enable research results to be compared on a consistent basis. This agreement may only be achieved when sufficient and appropriate data on the above factors becomes available. This will necessitate an extensive analytical and experimental program. Such a program requires nonlinear dynamic analysis of the whole structure in order to determine the realistic range of expected demands on the members (e.g. loading conditions, ductility levels, pattern, and number of reversals). Analysis of results from some of the nonlinear dynamic studies carried out at Berkeley on moment-resisting frame [33] and coupled wall structural systems [34] have shown the sensitivity of plastic rotation demands with respect to the dynamic characteristics of the ground motion and mechanical characteristics of the structure (Figs. 7 and 8). When a frame beam (a beam belonging to a ductile moment-resisting frame) is designed using present code requirements, the number of yielding excursions required and the number of rotation reversals that the critical region of the beam undergoes is usually smaller than four even under the most severe earthquake. However, the number

of reversals increases considerably for critical regions of beams acting as the coupling of a coupled shear-wall structural system (Fig. 8).

Following is a review of studies since 1972 that are connected with the seismic behavior of beams in R/C moment resisting frames. Studies concerned primarily with beams used as coupling elements of coupled shear wall systems will be discussed at the end of this section.

3.2 Seismic Behavior of Ordinary R/C Beams in Moment-Resisting Frames

This section reviews studies of seismic behavior of ordinary R/C beams in moment-resisting-space frames, that have been cast in situ using normal weight aggregate concrete. Current knowledge on the behavior of lightweight aggregate concrete beams will be discussed in a later section. As in Ref. 16, the author found it desirable to distinguish behavior of beams whose critical regions are under practically pure flexure from those in which high shear exists.

3.2.1 Beams with Critical Regions whose Inelastic Behavior is Controlled by Flexure. In this paper, cases where the nominal unit shear stress in the critical regions is small [say $\leq 3\sqrt{f'_c}$ (psi) ($0.25\sqrt{f'_c}$ (MPa))] are distinguished from those in which this shear stress is high [16]. In the first case, one can neglect the effect of high shear on the hysteretic behavior of beam critical regions designed and detailed according to present seismic codes [35,36], even for the most severe seismic ground motion that can be expected during the life of the structure. The effect of high shear is usually detrimental to the energy dissipation capacity of critical beam regions. Therefore, it is important that designers working with the architect use a low percentage of reinforcement or select a structural layout (e.g., relatively long beams), which will experience low shear.

Numerous studies have been conducted on the behavior of R/C critical regions whose inelastic behavior is controlled by flexure [16,25,28,37-42,47]. Although tests and analytical studies carried out since 1972 did not result in any significant new knowledge beyond that reported in Ref. 16, they did clarify some of the observations made in this reference and they also resulted in major advances in the design and detailing of R/C critical regions, specifically in improving the energy dissipation capacity of these regions. Some of these advances are discussed below under different parameters that affect the design of beams in frames. These parameters include; flexural strength capacity; deformation capacity; energy dissipation capacity; and prediction of stiffness necessary for predicting the dynamic characteristics of the frames.

3.2.1.1 Flexural Strength Capacity. In general, flexural strength can be predicted accurately if the mechanical characteristics of the reinforcement under uniaxial tension and compression, and of the concrete (confined and unconfined) are known [40,43-45]. However, there are still some uncertainties in evaluating the strength capacity of beam critical regions for slender beams in actual structures subjected to real earthquakes. Some of the most important uncertainties are: (1) the effect of the strain rate, particularly in cases where the maximum strength is reached at or just beyond the yielding of the reinforcing bars [16,46]; (2) the effective width of the floor slabs participating in the development of flexural capacity, especially the amount of slab reinforcement contributing to the total tension force.

As pointed out by Paulay [47], "the effectiveness of slab steel placed further away from the web of a beam or the face of a column is likely to depend on the torsional resistance of the beams framing into a column at right angles to the beam, the strength of which is being considered". No definite provisions for the effectiveness of slab steel exists in present codes, although different proposals were made in the draft recommendations of the New Zealand Code [14].

3.2.1.2 Deformation and Energy Dissipation Capacities. Deformation and energy dissipation capacities are controlled by the buckling of the main reinforcing bars, which is difficult to predict. Therefore, it is more difficult to predict these capacities than the flexural strength [22]. To avoid early failure and to assure sufficient deformation (ductility) and energy dissipation capacities most of the codes have introduced more stringent recommendations regarding proportioning and detailing of flexural critical regions. Some of the most important modifications are related to the following factors:

(i) Amount of Longitudinal Reinforcement Analytical and experimental results indicate that to attain large curvature ductility (say higher than 10, which is likely to be developed in the case of severe earthquakes) it would be preferable to use lower tension steel contents than are allowed by present ACI 318-77 [35] or 1976 UBC [36] provisions. (The ACI requires that the reinforcement ratio, ρ , shall not exceed 0.50 of the reinforcement ratio, ρ_b . The UBC requires that ρ shall not exceed 0.75 of ρ_b , or 0.025). Park [25] has reported that in New Zealand, if the compression steel ratio, ρ' , is 0.5 of the tension steel ratio ρ , it is recommended that $\rho < 0.016$ when $f'_c = 3,6000$ psi (25 MPa) and $\rho < 0.022$ when $f'_c = 5,800$ psi (40 MPa), with linear interpolation between for other concrete strengths. When $\rho'/\rho > 0.5$, higher ρ values can be used. These limits are given by formulae based on analytical results [48,49].

(ii) Positive Moment Capacity at Column Connections According to ACI 318-77 [35] and the 1976 UBC [36] the positive moment strength of flexural members at column connections shall not be less than 50% of the negative moment strength. Analyses of experimental results [40] have indicated that to improve the energy absorption capacity of frames it is desirable to require that the ρ'/ρ shall not be less than 0.75. The advantage of designing beams in frames with this larger positive moment capacity has also been pointed out by Paulay [47] and shown by analytical studies conducted by Anderson [50] and by studies of ductility demand in actual design of framed structures. [51].

(iii) Moment Redistribution in Beams of Frames Paulay [47] has pointed out that in the efficient design of reinforced concrete continuous framed beams there are three aims that the designer should attempt to achieve:

(a) Reduce the absolute maximum moment, usually in the negative moment region, and compensate for this by increasing the moment in the non-critical (usually positive) moment regions.

(b) Equalize the critical moment demands in beams at either side of an interior column

(c) Fully utilize the potential positive moment capacity of beam sections at the column faces.

In Ref. 47 Paulay discussed how to carry out efficient moment redistribution and concluded that this redistribution not only leads to a more economical beam steel arrangement but minimizes moment input in the columns.

Bertero and Zagajeski [52] have discussed the importance of proper selection of moment redistribution in applying a recently developed computer-aided optimum design procedure [53,54] to the seismic resistant design of R/C multistory frames. According to results obtained using different moment redistributions, it appears desirable to base the design on a constant amount of top and bottom reinforcement throughout the span. The design based on this approach requires an increase in total steel volume of about 16% without any increase in concrete volume. However, nonlinear dynamic analyses of the responses of the designed frames to different types of ground motions show that the design, based on having same amount of reinforcement along the whole span, performs better than a design in which the beam reinforcement is curtailed according to a moment envelope in which full moment redistribution is assumed. Although the required steel volume is higher, there are some additional costs in designs where the longitudinal reinforcement is curtailed. One of these is the time and therefore cost for properly detailing the reinforcement. Another is the cost of fabricating the steel cage in the field. Furthermore, the probability of human error is greater in detailing and fabricating the reinforcement cutoff than in placing continuous bars. A cut bar introduces a discontinuity in stress, and the section in which this cut takes place can become critical during seismic response. Taking all these factors into consideration, it is believed best (at least in U.S.) to use a constant amount of reinforcement along the length of the beam.

(iv) Transverse Reinforcement It is generally accepted that to obtain large deformation and energy dissipation capacities it is necessary to provide the beam critical regions (potential plastic hinge region), with properly designed, detailed, and fabricated transverse reinforcement. The larger the demand in deformation and energy dissipation capacities, the more stringent the requirements regarding transverse reinforcement should be. This type of reinforcement is required to provide:

(a) Confinement of Concrete: The larger the degree of confinement, the higher the compressive strength and particularly the deformation capacity of the confined concrete. Confinement also improves the bond characteristics of concrete.

(b) Lateral Restraint of Main Longitudinal Reinforcing Bars: The closer the spacing of the transverse reinforcement, the larger the buckling stress resistance of the main bar.

(c) Shear Resistance: The larger the amount of reinforcement, and the closer the spacing, the larger the increase in shear resistance.

A brief discussion follows of recent advances in each of these roles of transverse reinforcement.

(a) Confinement of Concrete: Although the beneficial effects of transverse reinforcement on deformation capacity (ductility) are well known and generally accepted, its influence on strength enhancement is not so well accepted. There is still controversy about the actual increase in ductility and particularly in strength. Reasons for some of the existing controversies are discussed by Bertero and Vallenias in Ref. 55.

In seismic-resistant R/C structures, the designer is interested in the confinement of longitudinally reinforced, not just plain, concrete. Therefore, there has recently been a series of studies on confinement of longitudinally reinforced elements [56-58]. These studies have improved understanding of the effect of different types and arrangements of lateral reinforcement on reinforced concrete. From these investigations, new constitutive laws for confined concrete have been suggested (see Fig. 9). In spite of these advances, there still is not sufficient data about hysteretic behavior of confined reinforced concrete under the state of stress and strain expected in flexural critical regions [55]. Present American seismic code requirements for beam confinement do not appear to be adequate when large ductility is demanded, although the 1976 UBC code requirements for the spacing of transverse steel (i.e. $d/4$, 8 bar diameters or 12 in.) are somewhat more stringent than the ACI-318-77 (i.e. $d/4$, 16 bar diameters or 18 in.).

(b) Lateral Restraint of Main Longitudinal Bars: For flexural critical regions designed and detailing according to present seismic code requirements, the strength and deformation capacities under seismic excitation are usually controlled by buckling of the main reinforcement [16]. The main factors controlling this buckling are: (a) bar size and its mechanical characteristics; (b) concrete cover; (c) the spacing, size, detailing, and fabrication of hoops (ties); (d) strain history of the steel bar; (e) length of the critical region (moment gradient). Based on experimental and analytical studies the author suggested in Ref. 59 that to prevent buckling of the main bar before it is strained to the beginning of strain hardening, the maximum spacing, s , should not exceed $4D$ to $8D$ for grade 40 steel and $3.5D$ to $7D$ for grade 60, where D is the diameter of the bar. As can be inferred from Fig. 10, the higher limit values are obtained assuming that the ties offer perfect restraint - i.e., they do not allow any lateral movement of the main bar, which is difficult to achieve in the field. Inspection during fabrication of steel cages, even in the laboratory, reveals that there is always a gap between the corner of a tie and the main bar. Furthermore the legs of the ties will always deform or even move, particularly when the critical region is subjected to large inelastic deformation.

If large ductility is demanded (requiring a strain higher than that at the initiation of strain hardening), s should be even smaller than that indicated above (see Fig. 10). This is because the E_t at the required large inelastic strain (beyond the initiation of strain hardening) will be smaller than the $E_{T,H}$ of a bar loaded monotonically in uniaxial compression.

Similar observations have been offered by other investigators [25,28,43,60,61]. A detailed discussion of experimental observations regarding buckling is offered in Ref. 43. In the experimental results reported in this Ref. in which buckling was observed, the shear stress in the critical regions was higher than $3 f'_c / \sqrt{\text{psi}}$ ($0.25 \sqrt{f'_c}$ (MPa)).

Because of the results of beam tests [38-41,46,62], it was suggested that each bar should be supported laterally by a corner of a tie. Similar recommendations have been made by Park [25]. Park has also recommended that to prevent buckling in plastic hinge zones, the spacing of stirrup ties surrounding compression steel bars should not exceed six times the diameter of the bar. It is also recommended that stirrup ties spaced at 4 in. (100 mm) should have a force at yielding at least one-sixteenth of the yield force of the longitudinal bar which they laterally restrain. (Note that four inch spacing is not required by present U.S. seismic codes.)

The above requirements have been derived for and applied to beam critical regions of structures that can be subjected to very severe ground motions and in which these regions are the main source of energy dissipation i.e., ductile moment-resisting frames, and therefore they are too stringent for other cases. For this reason, the author believes that the formulation of seismic code requirements by just one set of empirical rules, although desirable for practical applications, usually leads to the use of provisions which are too stringent for most of the structures. Attempts should be made to formulate seismic regulations as a function of the demanded or desired deformation and energy dissipation capacities. Although this may not be possible due to insufficient data and unreliable methods of estimating actual demands, work in this direction should be started.

(c) Shear Resistance: Advances in design requirements for this role of transverse reinforcement will be examined later in a discussion of flexural critical regions under high shear.

3.2.1.3 Prediction of Stiffness. To estimate the demands of strength, deformation, and energy dissipation capacities during an earthquake, it is necessary to predict the dynamic characteristics of the structure at the time when the earthquake shaking takes place. In case of R/C ductile moment-resisting frames, the period of the frame is usually controlled by the stiffness of the beams rather than that of the columns. Thus the initial stiffness of the beams at the moment an earthquake occurs must be estimated as accurately as possible. In as much as the time of occurrence of future earthquakes and the history of excitation to which the structure has been subjected are uncertain it is best to consider a range of probable values of stiffness in analysis. It is even possible that certain beam regions in a structure may have been critically stressed due to service conditions alone (e.g. high service loads, thermal or settlement deformations, environmental conditions) leaving these beams in a state of reduced stiffness. Unfortunately this is an area in which very little progress has been made.

Several investigators have developed sophisticated methods to predict moment vs. average curvature at critical regions and have obtained good agreement with measured values [40,44,45]. This is illustrated in Fig. 11(a) for the case of monotonically increasing moments, up to large displacement and then unloading and in Figs. 11(b) and 11(c) for the case of cyclic bending reversals. However no satisfactory rules have yet been offered to use in practice for predicting initial stiffness. The lack of such rules and the consequent implications for practical seismic design have been discussed by Strand [51]. Strand points out that neither the degree of cracking nor the effective width of the flanges due to floor slab contribution are well defined in either the code or in available literature.

A method for computing lateral stiffness of beams under seismic excitations has been presented by Orudjev and associates in Ref. 63 and appears to give good results. However, again no clear rules are given for estimation of initial beam stiffness.

3.2.2 Beams with Flexural Critical Regions under High Shear. When nominal unit shear stress at the critical region of a framed beam exceeds $3\sqrt{f'_c}$ (psi) ($0.25\sqrt{f'_c}$ (MPa)), and the beam has been designed and detailed according to present U.S. seismic codes, the critical region is capable of developing maximum flexural strength and flexural deformation capacity under monotonically

increasing loads. However, this kind of critical region, under repeated moment reversals and particularly under full rotation reversals, will undergo a degradation in stiffness, and energy absorption and dissipation capacities considerably larger than the degradation of a similar critical region with very low shear stresses. Degradation in strength starts to occur as the number of similar loading cycles inducing reversal of rotation increases. Although such regions are capable of developing flexural yielding strength, an early shear failure mechanism (sliding shear) starts to develop after one cycle of full bending reversals beyond the yielding strength level. This behavior was discussed in Ref. 16 in 1972 but at that time it was pointed out that the data available was scarce. Sources given at that time include Refs. 64-67. Since 1972 significant advances have been achieved thanks to the work of many researchers. Some of the results obtained have been published and discussed in Refs. 25, 28, 37-43, 47, 62, 68-72.

A detailed discussion of the effects of high shear in flexural critical regions is given in Ref. 40. Figures 12 and 13 illustrate the results obtained from two beams, R-5 and R-6, which were tested to examine the effects of a high shear force on flexural critical regions [40]. These beams were identical except for their shear span. The shear span of R-5 was $l/d = 2.75$; the shear span of R-6 was $l/d = 4.46$. Comparison of Figs. 12(a) and 12(b) show the pinching effect induced by high shear on the load-displacement relationship. This pinching effect resulted in a reduction in the energy dissipation capacity of more than 66 percent - (349 k./in. for beams R-5 vs. 738 k./in. for beam R-6). There was also a reduction in the plastic hinge rotation capacity from 0.036 radians to 0.026 radians.

Perhaps a better picture of the effect of high shear can be obtained from Fig. 13, which compares the shear force-shear distortion loading curves of beams R-5 and R-6 at comparable ductilities. As the deflection ductility of the loading reversals increased, there was increasingly more degradation in the shearing stiffness occurring in beam R-5 during the initial loading stages. Thus, there was a greater amount of shear distortion at comparable cycles. The value of average shear stiffness, K_{sh} , during the initial stage of loading to a δ/δ_y of about two was 200 k./in. for beam R-6, while shear distortion $\Delta\delta_{sh}$ at peak loading constituted about eight percent of the total tip deflection. The corresponding value for beam R-5 were 130k./in., and about 17 percent of the total deflection. After loading reached a δ/δ_y of about four, the values of K_{sh} and $\Delta\delta_{sh}/\delta$ were about 63 k./in. and 0.12, respectively, for beam R-6; and K_{sh} 7 k./in. and 0.37, respectively for beam R-5.

A detailed discussion of the mechanisms involved in the observed degradation, mechanical models, and a quantitative analysis of the degradation of shearing stiffness in beam R-5 are presented in Ref. 40. Results of studies at Berkeley, and other investigators reveal that:

(1) When maximum nominal shear stress induced during inelastic reversals is high in both loading direction (e.g. $5.3\sqrt{f'_c}$ (psi) or $0.44\sqrt{f'_c}$ (MPa) for beam R-5 in Fig. 12[a]) the degree of shear stiffness degradation becomes very significant. For example, the shear distortion of beam R-5 constituted about 37 percent of the tip deflection as the displacement ductility reached four. In the similar beam, R-6 (Fig. 12[b]), with a maximum nominal shear stress of $3.5 f'_c$ (psi) ($0.30 f'_c$ (MPa)) this value was less than 13 percent.

(2) The shear resistance in cracked R/C critical regions subjected to monotonically increasing load is developed through: (a) shear stress of

uncracked concrete; (b) aggregate interlocking and frictional resistance along cracked faces; (c) web reinforcement resistance at inclined cracks; and (d) dowel action of the main steel reinforcement. As the beam is subjected to several loading reversals, flexural and/or flexure-shear cracks may develop across the entire beam section; therefore, the shear must be resisted by web reinforcement, dowel action, and aggregate interlocking and friction. The last two resistances become less effective as the crack width increases and concrete crushes in the compression zone. As a result, large shear distortion could occur and become an important source of beam deflection as well as a significant parameter in the overall behavior of the flexural member. It should be re-emphasized, however, that this degradation occurs because of the opening of the cracks induced by yielding of the main reinforcement and is therefore a combined flexure-shear type of degradation mechanism. Because bond slippage of the main reinforcing bars can contribute significantly to the opening of flexural cracks, the deterioration observed is the result of a combined flexure-bond slippage-shear type of degradation.

(3) Photogrammetric studies conducted during the tests at Berkeley reveal that, at a ductility level of four during the initial loading state, the deformation pattern in the critical region is dominated by the shear deformation at those cracks which remain open throughout the entire beam section. For this reason this behavior has been named "Shear Sliding" and the resistance mechanism "Interface Shear Transfer" [72].

(4) The recorded shear force-shear distortion diagrams indicate that after flexural yielding occurred in both loading directions, the degradation of shear resistance and the amount of shear distortion increased with the magnitude of applied load and/or deformation as well as with each repeated cycle of reversal. The possible shear degradation mechanisms include: (a) the opening of cracks due to yielding and or slippage of the main reinforcement; (b) the spalling of the concrete cover around the periphery of the flexural critical region; (c) the degradation in the stirrup-tie anchorage due to large variations in the strains where it is crossed by inclined cracks, and/or by the splitting and spalling of the concrete cover; (d) the crushing and grinding of concrete at the crack surfaces which could lead to a less effective aggregate interlocking resistance along the open cracks; and (e) the local disruption of bond between the longitudinal steel and concrete due to the dowel action along the open cracks.

(5) The shear force-shear deformation model developed in Ref. 40 offers a reasonable prediction of the shear degradation that occurred during the initial stage of loading reversals at a beam displacement ductility ratio of one, and the first reversal at a ductility level of two. The most important parameters for determining the shear stiffness degradation appear to be the aggregate interlocking along the large cracks and the dowel action of the longitudinal steel. When loading reversals were carried out at a displacement ductility of two, the aggregate interlocking resistance could not be predicted by the analytical model since it does not account for the effect of degradation due to reversals.

As pointed out by Gergely [72], who has reviewed the problem of "Interface Shear Transfer", in beams and other R/C elements (columns and walls), several approaches have been developed for the study of cyclic interface shear transfer across open cracks in concrete. In some experimental investigations [73] the crack width was held constant during shear cycling. In another study the bars were yielded first to produce the desired initial crack width

[74]. In a third approach the bars crossing the crack were stressed in tension during shear cycling; the tension was applied to obtain the desired initial crack width [75]. An important factor affecting the behavior of interface shear transfer is the amount of steel near the crack. Reinforcement parallel and close to the crack delays or prevents shear deterioration because the concrete is confined. In addition, diagonal cracks are not allowed to propagate from the crack plane and dowel splitting is restrained. The mechanism of interface shear transfer for various types of experiments is described in several papers and reports [40, 72-79]. However, the interface shear transfer mechanism under generalized (variable repeated) loading inducing large inelastic deformation still cannot be predicted accurately; more experimental studies are needed.

Experimental results have shown that the behavior of flexural critical regions under high shear stress can be significantly improved by the addition of diagonal reinforcement. This is illustrated in Fig. 14 which compares the results obtained with different types of web reinforcement [68]. The use of diagonal reinforcement is an effective means of controlling sliding shear [28, 38,39,41,68,80-83].

In a recent publication, Scribner and Wight [43] present valuable results regarding the effect of shear in beam flexural critical regions, as well as a detailed evaluation of these results and their implications in seismic resistant design. Specimens were designed with a variety of longitudinal beam reinforcement and tested using four different shear spans such that maximum shear stresses varied from $2\sqrt{f'_c}$ (psi) to $6\sqrt{f'_c}$ (psi) [$0.16\sqrt{f'_c}$ (MPa) to $0.5\sqrt{f'_c}$ (MPa)]. Half the specimens contained beam web reinforcement as specified by seismic provisions of the ACI Building code (318-71) [35] and half the specimens contained two layers of intermediate longitudinal shear reinforcement in addition to the Code-specified ties. Based on the results of these tests and in conjunction with research done by others, these authors have concluded that:

(1) The repeatability of member hysteretic behavior was related to maximum beam shear stress; (2) Intermediate longitudinal shear reinforcement provided significant increases in energy dissipation and repeatability of hysteretic response for beams with shear stresses between $3\sqrt{f'_c}$ (psi) and $6\sqrt{f'_c}$ (psi) [$0.25\sqrt{f'_c}$ (MPa) and $0.5\sqrt{f'_c}$ (MPa)]; (3) Beams with shear stresses below this range performed satisfactorily without intermediate longitudinal shear reinforcement and beams with shear stresses higher than $6\sqrt{f'_c}$ (psi) [$0.5\sqrt{f'_c}$ (MPa)] did not perform totally satisfactorily, regardless of the type of shear reinforcement used.

3.3 Seismic Behavior of R/C Coupling Beams in Shear Wall Structural Systems

In the last 10 years, significant accomplishments have been made in the study of seismic behavior of R/C coupling beams in shear wall structural systems. In Ref. 82, Paulay has made a detailed examination of the observed performance of coupling beams in coupled shear wall structural systems. He has pointed out that these beams are often deep relative to their span. Because of this, large shear forces are generated which dominate the inelastic behavior of these beams. Typically the $V_u d/M_u$ ratio is equal to or less than unity. Thus the problem of these coupling beams is one of flexure with very high shear. Furthermore, the deformation capacity (ductility), the number of yielding excursions and the number of plastic rotation reversals that are demanded from these coupling

beams are very large when compared with those encountered in beams of ductile-moment-resisting frames (see Section 3.1).

The performance of coupling during the 1964 Alaska [5] and the 1972 Managua earthquakes demonstrated that a conventional approach to designing and detailing these beams results in poor performance. Because of the low value of the $V_u d/M_u$ ratio, significant interaction between shear and flexure - usually disregarded in conventional design procedures - may be present.

Paulay [82] has analyzed the behavior of coupling beams that have been designed and reinforced according to conventional procedures and those that have been designed and reinforced on the premise that the shearing force in these beams resolves itself into diagonal compression and tension forces, intersecting each other at midspan where no moment is to be resisted. This last procedure results in diagonally reinforced beams. A summary of Paulay's findings are presented below. For a more detailed discussion see Ref. 82.

3.3.1 Behavior of Conventional Reinforced Coupling Beams. This type of beam is illustrated in Fig. 15(a). Paulay has analyzed the flexural and shear behavior of reinforced coupling beams. He has also analyzed the effects of reversed cyclic loading and the effects of cracking on the stiffness of these beams. His conclusions follow.

Flexural Behavior. 1. For coupling beams with a small aspect ratio, the flexural reinforcement would experience tension over the entire span of the beam. A low stress area in the vicinity of zero bending, at midspan, does not exist and this should be noted when it is intended to splice bars near the point of contraflexure.

2. The design or analysis of the critical support sections cannot be based on the customary assumptions of doubly reinforced concrete beams. Both the top and bottom reinforcement would experience tension after diagonal cracking. For this reason the beneficial effect of the compression reinforcement ductility is not available.

3. The unexpected distribution (vis a vis, conventional theory) of the internal forces suggests that a different approach to the assessment of distortions and stiffness characteristics of coupling beams is warranted.

4. In spite of the high intensity of shearing forces, the flexural bond stresses are not likely to become critical because the rate of change of the internal tension would be considerably less than that of the bending moment.

5. Because the flexural reinforcement would be in tension over the entire clear span the length of the beam would increase with the load.

6. Because both the top and the bottom flexural bars are in tension, the internal tension resultant will be located between the levels of the top and bottom reinforcement. This suggests that such beams attempt to resist the variable moments along the span by means of near constant internal forces $T = C$ operating on a variable internal lever arm, z .

Shear Behavior. The concepts of shear resistance on which the traditional approach of designing shear reinforcement is based need to be modified for coupling beams. According to conventional assumptions, a considerable

portion of the transverse force could be resisted after diagonal cracking by arch action, because of the small shear span-to-depth ratio. However, this arch action cannot be developed in coupling beams after yielding of the web reinforcement, because the reactive shear forces at the boundaries are applied over the full depth of the beam; not in concentration form at the top and bottom surfaces. To prevent separation failure along a main diagonal (i.e. diagonal tension failure), shear must be transferred entirely by web reinforcement. Other mechanisms which might assist in shear resistance should not be relied on.

The Effect of Cracking on Stiffness. The effect of cracking on the stiffness of coupling beams may be more important in assessing the elastic response of coupled shear walls than in assessing a similar response in a ductile reinforced concrete frame. Diagonal cracking has a much larger effect on shear stiffness than flexural cracking has on flexural stiffness. Thus, diagonal cracking will have a major influence on the overall stiffness of short (small span-to-depth ratio) coupling beams in which shear distortion can dominate. Loss of stiffness due to cracking can be of the order of 85%, a quantity significant enough to be considered in the design process.

The Effects of Reversed Cyclic Loading Beyond the Elastic Limits. In conventionally reinforced coupling beams with a span-to-depth ratio of less than two, the strength and ductilities designed in earthquake resistant coupled shear walls are not likely to be attained. The load-rotation relationship shown in Fig. 15(a) indicates that only limited rotational ductility may be developed. Furthermore a sliding shear failure may result after a single large flexural yield excursion.

3.3.2 Behavior of Diagonally Reinforced Coupling Beam. The ductility and useful strength of coupling beams can be improved by placing principal reinforcement diagonally in the beam (Fig. 15[b]) instead of using the conventional steel arrangement (Fig. 15[a]). The design of such a beam can be based on the premise that shear force resolves itself into diagonal compression and tension forces intersecting at midspan where there is no moment to be resisted. Under severe seismic actions the diagonal bars can be subjected to large compression stress, and perhaps yielding that may lead to buckling, before the previously formed cracks close. Therefore it is important to have ample ties around the diagonal bars to confine the concrete inside the bars and to inhibit buckling of the diagonal steel. Figure 15(b) shows the load-rotation relationship for a beam similar to that in Fig. 15(a), except for the reinforcement arrangement. Comparison of hysteretic behavior in these two figures shows the superior response of the diagonally reinforced beams. This superior response of diagonally reinforced coupling beams has also been shown in tests carried out at the Portland Cement Association [83]. This type of reinforcement has already been used in real buildings [80].

3.4 Implications of Results Obtained to Seismic Design

In the ultimate strength design, as well as in the seismic design of R/C members, it is essential to provide sufficient shear capacity in possible hinge locations to develop required flexural and deformation capacities. In seismic resistant design, it is important to assure that such regions will not fail in shear before adequate rotation is developed at a nearly constant maximum moment. It is also important that the effect of shear degradation (pinching of the hysteretic loops) on the energy dissipation capacity of these regions be minimized. To reduce the potential shear degradation in all the

critical regions, it is necessary to develop good shear resistance along the regions where large cracks might occur. The use of closely spaced stirrups and supplementary ties has proven to be effective in improving the rotation and energy capacities of R/C flexural critical regions. This is so not only because more shear reinforcement is provided, preventing formation of inclined cracks, but also because such reinforcement provides better concrete confinement and provides more effective lateral support for the longitudinal compression steel. In very short beams, however, a major crack transversing the whole section can develop between two adjacent vertical ties. Consequently, these ties cannot function as shear reinforcement. In this case, the use of inclined reinforcing bars appears to be a practical solution.

4. SEISMIC BEHAVIOR OF STRUCTURAL CONCRETE COLUMNS

4.1 General

In several structural systems, and particularly in moment-resisting frames, there are columns which are subjected to very low axial forces; under lateral load the behavior of their critical regions is controlled by flexure. There is very little difference between the behavior of these columns and that of the beams, except that the columns are usually subjected to higher shear than the beams because they are shorter. Therefore, these columns can be classified with the beams under the general denomination of flexural members. This has been recognized by certain seismic codes like the ACI 318-71 and 318-77 [35] which specify that columns shall be designed and detailed in accordance with requirements for flexural members when: the maximum factored axial load P_e is not greater than $0.4\phi P_b$, where ϕ is the strength reduction factor and P_b is the nominal axial load strength at balanced strain conditions.

This section of the report emphasizes behavior of concrete columns in moment-resisting space frames, which are ordinarily reinforced and whose critical regions are subjected to significant axial forces. In seismic-resistant analysis and design, a frame structure can be modelled as a planar frame and subjected independently to the horizontal component of the ground motion acting in the plane of the frame [36]. Therefore at first discussion will be limited to the behavior of columns loaded in one of the principle axes (1D). Later, the importance of three dimensional loading (3D) and particularly bi-axial loading will be reviewed.

4.2 Columns in 1D R/C Moment-Resisting Frames: Ordinarily Reinforced and Subjected to High Shear Forces and Significant Axial Forces

4.2.1 Experimental Studies. A review of the work carried out up to 1972 is given in Ref. 16. Since 1972 there have been many investigations of the behavior of columns subjected to seismic excitations. Work carried out between 1972 and 1977 has been reviewed in a series of papers [25, 28, 47, 72, 84] presented at the Workshop on Earthquake-Resistant Reinforced Concrete Building Construction [17]. Recent work on columns is discussed also in Refs. 85-92. Despite these studies and some significant improvements in understanding behavior of columns, some of the problems whose solutions were unknown in 1972 [16] still have not been solved. For example, some very few studies have been conducted on the behavior of columns subjected to combinations of tension and bending induced by generalized cyclic excitations. Such studies would be especially relevant because during an extreme earthquake the axial forces in columns can be lowered to values that can crack the concrete throughout the sections, especially when there are large creep and shrinkage effects. Research in this area is urgently needed because the importance of interface shear transfer in members in tension has not been examined as pointed out by Gergely [72].

The importance of such studies is illustrated by a simple example. A 16 in. by 16 in. (400 mm by 400 mm) column with eight #9 bars, when subjected to pure tension such that the stress level in the bars approach yield, will develop crack widths of about 0.02 in. (0.5 mm). Such cracks usually form at ties and therefore the ties closest to a crack would be one tie spacing away. In the absence of transverse reinforcement close to the crack, the reversed cyclic interface shear transfer capacity for such crack widths might vary from 200 to 300 psi (1.4 to 2.1 MPa); and considerable slip and crack deterioration may occur at lower stresses. The dowel capacity of the bars

is equivalent to only about 50 psi (0.35 MPa), thus sliding shear distress is possible in columns subjected to tension. For a given interstor. relative displacement of, say 0.5 in. (13 mm), the compression columns would also have to distort the same amount and could undergo damaging sliding shear displacements. A slip of less than about 0.05 in. (1.3 mm) is already harmful; such a slip is quite conceivable considering the relative magnitudes of approximate sliding shear and column lateral stiffnesses [72].

All the available data have been obtained under excitations which produce compressive axial forces, shear, and bending in only one main plane of the element. Since columns are usually subjected to biaxial shear and bending, there is an urgent need for experimental and analytical studies of the inelastic behavior of columns under the combined effects of axial force and biaxial shear and bending. Also, during extreme earthquakes tension forces can be developed due to overturning moments and the vertical component of acceleration. Therefore it is of paramount importance to carry out studies on columns in which the axial force is varied from compression to tension. To the best of the author's knowledge, the only experimental work on the effect of varying axial force in columns has been carried out in Japan [142] and more recently at the University of Texas. These studies will be discussed later.

The columns are still the elements most susceptible to failure in destructive seismic ground motions. This has been demonstrated by inspection of damage in many recent earthquakes. In Ref. 93 Aoyama discusses the causes of shear failure of columns and countermeasures taken in Japan. The causes of such failure can be found, the author believes by: (1) Analyzing present methods of evaluating column action during severe earthquakes, and estimating the range of demands placed on columns; (2) Studying the sensitivity of the nominal unit shear stress to the main factors involved in its computation; (3) Comparing this sensitivity with the values specified by present seismic codes.

Park [25] and Paulay [47] discuss the problems encountered in estimating the column actions and therefore in formulating a design procedure that will give an acceptable degree of protection against undesirable behavior.

To illustrate the sensitivity of the nominal unit shear stress to the main factors involved in its computation the following equation compares the probable realistic value of the maximum nominal unit shear stress, v_{max}^R , with the value given by ACI or UBC codes v_u^C [35, 36].

$$\frac{v_{max}^R}{v_u^C} = \frac{M_{max}^R}{M_u^C} \frac{L_c^R}{L_c^C} \frac{\phi_V^C}{\phi_{(M,P)}^C} \frac{(b_w d)^R}{(b_w d)^C} \quad (1)$$

where:

M_{max}^R = Maximum moment that can be developed in the real column

M_u^C = Ultimate moment capacity computed according to code provisions

- L_C^R = Actual distance between critical regions where M_{max}^R developed
 L_C^C = Nominal clear height of the columns assumed in the analysis and design of column
 ϕ_V^C = Code strength reduction factor for shear
 $\phi_{(M,P)}^C$ = Code strength reduction factor for columns
 $(b_w d)^R$ = Actual size of columns
 $(b_w d)^C$ = Assumed size of columns used in code equations for estimating v_C^C

In eq. 1, the M_{max}^R / M_U^C can be expressed as:

$$\frac{M_{max}^R}{M_U^C} = \frac{f_{s \max}^R}{f_y^C} F \left[\frac{p^R \& M_{max}^R}{p^C \& M_U^C} \right] \quad (2)$$

where:

- $f_{s \max}^R$ = Maximum steel stress that can be generated
 f_y^C = Code specified yield strength
 p^R = Actual axial load action on section where M_{max}^R is generated
 p^C = Axial load estimated based on code force acting on section where M_U^C is computed

Considering that $f_{s \max}^R$ can be up to twice f_y^C and $F \left[\frac{p^R \& M_{max}^R}{p^C \& M_U^C} \right]$ can also

be considerably larger than one, either because p^R is a compression force smaller than the P corresponding to the balanced point but larger than the assumed or estimated p^C or because p^R can be a tension force decreasing the actual shear resistance, the value of the M_{max}^R / M_U^C can be larger than two.

Additionally, because of the actual effects of lap splicing and/or nonstructural elements, the value of L_C^R / L_C^C could be larger than one, the $\phi_V^C / \phi_{(M,P)}^C$ is 0.85/0.70 (ACI 318-71), and $(b_w d)^R / (b_w d)^C$ can be larger than one.

therefore the real nominal unit shear stress, v_{\max} , can be four or more times than the value obtained using code procedure v_u^C ; the value for which the shear reinforcement was designed. Thus it is not surprising that many of the frame failures observed have been due to shear failure of the columns. Therefore there is a need to conduct statistical studies of the value of v_{\max}^R / v_u^C in existing buildings.

4.2.2 Experimental Research and Development in Japan. Ohmori in Ref. 84 points out studies in Japan where the behavior of columns was investigated in order to improve the design and construction of real R/C structures. Among the important experimental findings of the research, the following deserve special mention.

Newly Developed Transverse Reinforcements--The three types of lateral reinforcement shown in Fig. 16 (a), typical of present construction, were tested, considering three levels of reinforcement ratio for each type. The results reviewed in Ref. 16 and summarized in Fig. 16(b) show the advantages of tied (type A) and spiral (type S) columns when compared with hooped columns (type J). However construction of tied columns presents some difficulties. Therefore, new types of transverse reinforcements that could offer good confinement and could be easily fabricated were sought [142]. A combination of spiral and hoop reinforcements was developed which was named the KS type. It showed ductile and stable hysteretic behavior similar to that observed for tied columns (Fig. 16[b]). Figure 16(c) shows the different types studied and Fig. 16(d) shows the results obtained. It is clear that the KS type columns showed the most stable and ductile behavior. The other two types which showed good behavior for the same reinforcement ratio, were the spirals (S) and the tied (T) arrangements.

Splices of Large Size Re-Bars--In the lower story columns of tall buildings it becomes necessary to use large size rebars. In this case the use of lap splices offers serious difficulties. Various types of welded and sleeve joints were tested. Among the most effective in the sleeve category were the squeezed joint, and the Caldwell joint [94].

Very little information is available on the behavior of lapped splices. As pointed out by Gergely [72] impact type tests of splices showed an increase in splice capacity and stirrups enhance the toughness and ductility of splices. Research is needed on the behavior of lapped splices and mechanical splices at high-level load reversals.

4.2.3 Concluding Remarks Regarding Experimental Studies. From analysis of results obtained in different investigations up to date it can be concluded that:

(1) Short R/C columns, if designed and detailed to satisfy code recommendations for ductile moment-resisting frames [36] can develop moderate inelastic deformation prior to either a brittle shear failure or significant shear degradation, when subjected to high constant axial loads and to cyclic shear reversals. The word moderate should be emphasized. It is felt that the inelastic deformation capacities found in the investigations (particularly in Ref. 88) would prove adequate when compared to the magnitude and nature of inelastic deformation demands that may be expected for columns that are components of frame systems designed on the basis of a weak girder-strong

column philosophy. However, these deformation capacities may be insufficient when compared to the magnitude and nature of deformation demands that may be expected in frames designed with soft stories. Furthermore, the above observations are valid for cases where there is essentially no fluctuation in axial force. The change from a ductile shear-compression failure mode in columns with certain axial compressive force to a brittle diagonal tension mode in similar columns in which the axial load decreased, suggests the need to investigate the inelastic behavior of short columns in which the axial force varies. The axial force should be varied with shear reversal from a maximum compression to either a tension value or a smaller compression.

(2) A comparison of analytical and experimental shear strengths indicates that code shear capacities are adequate if actual mechanical characteristics are used. However, if the expected inelastic deformations are higher than those used in the tests, these code provisions may be inadequate. The concrete degradation associated with large inelastic cyclic deformations will result in an entirely different state than that on which the code recommendations are based. To develop such large deformation and still maintain shear strength, the contribution of concrete should be ignored unless the core concrete can be kept effectively confined, even under the largest deformation.

(3) Comparison of the behavior of columns subjected to different deformation histories demonstrates that cyclic deformation reduces the maximum inelastic deformation a member can experience in a given direction. This fact should be kept in mind when design is controlled by inelastic deformation demands. It will be necessary to specify not only the deformation level that is expected, but also the number and type of reversals (partial, full) expected. The magnitude of the nominal shear stresses developed in some of the columns tested show that moderate ductile behavior and high shear stresses are compatible. However, it is necessary to provide sufficient and properly detailed transverse reinforcement.

(4) A comparison of the behavior of columns with different types of transverse reinforcement indicates that the circular spiral is more effective in maintaining a member's shear strength. Its continuity and relatively close spacing provide excellent confinement for the core concrete and restrain the width of inclined shear cracks. However, the close spacing of the spiral, and the fact that it is responsible for significant spalling through the height of the column, reduces the area of concrete with the longitudinal reinforcement and thus contributes to bond deterioration along this reinforcement.

4.2.4 Analytical Prediction of the Hysteretic Behavior of Columns. Many attempts have been made to predict the hysteretic behavior of columns, starting from the mechanical characteristics of the materials used and following the classical approach of continuous mechanics. In Ref. 88 Zagajeski and Bertero discuss different methods and models that have been used, and the difficulties encountered in predicting the hysteretic behavior. Perhaps an easier approach is to directly model the load-deformation relationship as was done by Atalay and Penzien for flexural members subjected to high shear [95, 96]. This was done also by others [98] using a degrading trilinear model for the restoring force-deformation characteristics of reinforced concrete structures failing primarily in flexure. Jirsa in Refs. 28 and 97 reviewed the analytical work done in modeling behavior of columns and classified these different models in two categories: "conceptual model" and "element or filament model". An example of good agreement obtained by using conceptual models is shown in Fig. 17(a).

In 1977, after reviewing analytical studies, Gergely [72] concluded:

(1) Many researchers have used various types of idealizations and hysteresis rules in nonlinear analyses and have shown that good results can be obtained when the idealizations directly correspond to the system being modeled. In most cases, however, not all modes of stiffness deterioration were included in the analysis and in the corresponding tests. Significant advances have been made in system identification techniques that allow the determination of stiffness properties from test results, or enable linearization of non-linear systems. Most nonlinear analyses are too complex for design use but they are helpful in identifying the effects of various factors as well as in aiding in the planning of test programs.

(2) Many factors affecting nonlinear response have not yet been isolated or studied sufficiently. Therefore, most analyses are reasonably accurate only for the test program for which they were derived. If other factors modify the behavior or if a different type of loading is applied, the agreement between analysis and test is generally poor, especially after two or more load cycles.

4.3 Hysteretic Behavior of Columns under Three Dimensional Loading

An earthquake ground motion at the foundation of a structure has six simultaneously acting components: three translational and three rotational. Thus, the columns in a space frame are subjected to three dimensional (3D) loading components, which will vary with time during dynamic response to the ground motion. This is particularly true in the case of exterior columns in a space frame. In the case of interior columns the variation of axial force during the earthquake might not be important and therefore, although there is a state of 3D-loading, only the biaxial bending and shear will vary with time. It is common to refer to this as a case of biaxial bending or two dimensional (2D) behavior, although strictly speaking a 3D-state of loading exists even for a 2D ground motion.

In 1972 the author pointed out the lack of data regarding the 3D behavior of columns [16]. As a consequence of damage from the 1968 Tokachioki and 1971 San Fernando Earthquakes, several studies were conducted to see if it was possible to analytically predict such damage. Most of these analytical studies were based on the conventional planar behavior of the structural elements. Since these studies did not successfully justify the observed damage, and since there was evidence of biaxial bendings in certain columns, particularly in the case of the main buildings of the Olive View Hospital, analytical studies of the effects of 2D ground motions were started.

4.3.1 Analytical Studies on the Effects of 2D Ground Motions and Biaxial Loading on Columns. Japanese and American researchers have conducted a series of analytical studies on the effects of 2D ground motions on columns. The analytical work of Takizawa and his associates in Japan [99] and Pecknold and his associates in the U.S. [100] deserves special mention.

In Ref. 99 Takizawa concludes that "The margin of safety against collapse of R/C structures is very small when the effects of biaxial response, deteriorating ductility, and gravity are all combined. In Ref. 100 Pecknold and Suharwardy review the analytical work conducted until 1977 and summarize the findings as follows:

"2D excitation of single mass systems produces a greater period shift, which in turn can lead to larger displacement response, depending to some extent on the initial system period. Gravity loads acting through the increased lateral displacements may cause collapse. Although details of input motion and shape of hysteresis curve play a role, they do not appear to decisively influence the general trends. The combined effect of correlation of the orthogonal components of response and of inelastic interaction generally appears to increase with relative strength of the excitation. 2D ductilities about twice as large as 1D ductilities are typical at 1D ductilities of about 5 or more.

Since the effect of gravity load is consistent, an examination of responses without the P- δ effect is sufficient to indicate possible problems. Two criteria are useful for this purpose: 1D ductility demand and system period. The most important indicator is the 1D ductility demand calculated from a one-dimensional inelastic response analysis. If the system strength is sufficient to restrict the 1D ductility demand to about two, no difficulties should occur. In conjunction with this, however, the system period should be taken into account, since the consequences of a slight underdesign are more serious for short period (stiff) systems than for long period (soft) systems.

Frames resisting seismic loads in both horizontal directions should be designed so that column deformations do not substantially exceed "yield". An important factor not accounted for by response studies of single mass systems is the distribution of inelastic deformation between girders and columns in space frames. This distribution is different for 2D motion than for 1D motion, since columns may yield sooner in 2D motion. The few results available for multi-story structures indicate that 2D motion increases column response ductility demand and decreases girder response ductility demand. While a varying axial load does produce large changes in the lateral restoring force-deformation characteristics of a single column, when these characteristics are averaged over several columns in a story, the effect on the total lateral force-deformation resistance curve for the story appears to be slight. The influence of ground motion characteristics should be more thoroughly explored. Besides duration and general intensity level of the excitation, the relative strength of all components is important. Extensive work remains to be done along these lines."

Jirsa, et al. presents a thorough review not only of analytical work in this field but also of the experimental studies that have been conducted until 1978 [97]. In reviewing the analytical work, Jirsa, et al., classified the proposed models in two categories: conceptual; and element or filament models. They then summarized the models, applications, advantages, and disadvantages. One of the main problems in conducting experimental studies is the selection of realistic loading histories. The problems discussed for 1D models are increased considerably because of the many possible combinations of the path of the two components.

4.3.2 Experimental Studies. These studies can be classified as studies of flexural behavior and shear behavior [97].

4.3.2.1 Flexural Behavior. Takizawa and Aoyama [98] conducted some experiments and compared their test results with analytically predicted values on a conceptual model. Measured and analytically predicted response for unidirectional and 2D loading histories are shown in Fig. 17: The measured and analytical responses for the square (or diamond) loading history (Fig. 17[b])

are shown in Fig. 17(c). Note that the general shape of the measured curves is predicted by the analytical procedure. However, the magnitude of forces tends to differ, particularly at the largest deformation level, where the measured forces were considerably less than the predicted ones. This is apparent in the plot of the experimental and analytical force orbits shown in Fig. 17(d). The force orbit represents the locus of forces in the principal directions produced by the deflection orbit shown in Fig. 17(b).

Takiguchi and Kokusho [101], presented a summary of results from 26 specimens subjected to biaxial bending moments. The specimens were small, 10 cm. and 15 cm, square cross sections. The experimental results were compared with analytically predicted values using a finite filament model, and good agreement was found. Takiguchi and Kokusho concluded that "The influence of bending moment about one axis due to dead load on hysteretic characteristics about the other axis should be taken into consideration when conventional seismic resistant design methods (i.e. methods in which lateral forces are applied independently in two directional orthogonal to each other) are used for reinforced concrete columns."

Okada, Seki, and Asai [102] compared experimental results with the analytically predicted ones using a finite element model, and concluded that their analytical model simulated behavior reasonably well. As the severity of the 2D loading increased, the measured response clearly indicated the deterioration of strength and deformability of the columns.

Effect of Axial Load on Flexural Behavior As pointed out by Jirsa [97], the effect of axial load in the above studies was not significant. However, in the specimens tested the axial load was small or zero and remained constant throughout the 2D moment or lateral loading history.

4.3.2.2 Shear Behavior under 2D Loading. From the point of view of seismic resistant design, the ideal frame system would be one of which column hinging is prevented. This is not usually economically feasible. However, an acceptable degree of protection against premature yielding and excessive hinging should be attempted [20, 25, 47]. This design philosophy implicitly requires that shear failure be prevented or delayed so that the column may dissipate, by flexure yielding, an energy larger than that demanded by the most severe earthquake. This degree of protection against shear is not always easily achieved in practice, when columns are loaded in 2D.

As pointed out by Park [25], "The diagonal shear force resulting from biaxial bending in two-way frames due to concurrent seismic loading should be considered in design". The shear strength of rectangular column sections loaded along a diagonal has received little attention in the past. Tests have been conducted recently in New Zealand [103] on four reinforced concrete members with a 16 in. (406 mm) square section subjected to uniaxial or diagonal shear force and flexure with no axial load applied. Two arrangements of overlapping hoops were used. The difference between the diagonal shear strength and the uniaxial shear strength of identical specimens was zero for one pair and 3% for the other pair. The result is not surprising, since, although for diagonal shear the component of transverse bar forces in the direction of the shear force is smaller, the diagonal tension crack has a greater projected length and therefore intercepts more transverse bars: these effects compensate each other [25].

Jirsa and his associates have started an extensive experimental program

on the effect of high shear on columns [97, 104]. The primary variable is the loading history. The geometry of the specimens is the same for all tests. The column is a stiff element (12 in. square, 36 in. long) framing into fixed ends representing a stiff floor system. Two series of tests, (one with no axial force and the other with varying axial load), have already been carried out and reported by Jirsa and his associates [97, 104].

2D Behavior - No Axial Load Figures 18(a) and 18(b) compare the lateral force-deformation curves for two tests. In one test, the load history was applied in 1D, in the other it was applied in 2D following a square deflection path. The force-deformation relationships are shown for a principal axis of the column. Such a comparison indicates a severe reduction of capacity due to prior or simultaneous loading in the orthogonal direction. This is shown by the force orbit in Fig. 18(c), for the specimen subjected to a square load path. If, under 2D loading, the resultant force ($V_R = V_N^2 + V_{EW}^2$) is plotted against the resultant deformation or the radial deformation from the original position ($\Delta_R = \Delta_{NS}^2 + \Delta_{EW}^2$), differences between 1D and 2D response are not as large (Fig. 18[d]). Jirsa and his associates [97] pointed out that, while a great deal of additional testing will be needed to qualify the response, results to date indicate that 2D response "may be well correlated to resultant force-resultant deformation behavior regardless of the deformation path".

Otani, of the University of Toronto, Canada has recently started an experimental program to investigate the effects of 2D deformation on columns. He has reported the results from tests of two relatively slender columns (12 x 12 x 60 in.) [105]. Because of early fracture of the longitudinal reinforcement at the welding in a critical region, no data has been obtained under cyclic loading requiring large inelastic deformations. From the results obtained, Otani concluded that:

(a) An effect of biaxial lateral load reversals on the behavior of reinforced concrete columns was evident prior to the tensile yielding of longitudinal reinforcement;

(b) The effect of biaxial lateral load reversals was relatively small, in the specimens tested, after the tensile yielding of longitudinal reinforcement;

3D Behavior with Varying Axial Load As "mentioned above, more research on the effects of varying axial load on column behavior is needed." (research to date has been reported by Ohmori [84], Kokusho, et al. [106, 107], and Jirsa and associates [97]. The experiments in Japan were conducted under uniaxial bending; the work done by Jirsa was under biaxial bending. Jirsa concluded that while constant compressive loads had a slight influence, constant tensile loads had a greater influence on columns subjected to biaxial bending in comparison to an axially unloaded column subjected to biaxial bending. In particular, under cyclic biaxial bending, compressive loads increased the shear capacity slightly and tensile loads substantially reduced the stiffness of the column and the shear capacity at low load. However this reduced shear capacity did not deteriorate, even under large lateral deformation. Additional tests were conducted with 2D lateral loadings and axial load variation; however, the trends are not significantly different from those under constant tension or compression. Axial loads appear to have an influence on response only while the load is on the structure and do not influence subsequent response. This is quite different from lateral loading where loads in one direction influence subsequent response in the orthogonal

direction. It should be noted that since columns were short, the P- δ effect was negligible.

4.4 Concluding Remarks

Although there have been many advances in understanding column seismic behavior most of these have been for columns under uniaxial bending and shear. Several analytical methods and models have been suggested for the prediction of real behavior of columns. However, most of these models are reasonably accurate only for the test program for which they were derived. If other factors modify the behavior or if a different type of loading is applied, the agreement between analysis and test is often poor, especially after two or more load cycles beyond yielding of reinforcement. Furthermore, most of the models are too complex for use in analysis or design practice. However, they are needed to do parametric and sensitivity studies, thus helping to: identify the importance of various factors; and aid in the planning of comprehensive experimental programs.

The Building Research Institute in Japan recently reported the result of 140 tests carried out during 1973-1976 [108]. "This report presents some of the most comprehensive information available on the behavior of R/C elements". Thorough analyses of this and other data will permit the improvement of present seismic design of columns.

Present seismic code provisions regarding detailing of columns appears to guarantee sufficient ductility to resist moderate demand of inelastic deformations if these take place in just one of the principal planes. However, during an earthquake a column can be subjected not only to biaxial bending but also to varying axial force. Although there have been some studies of these problems, there are many more factors influencing behavior for 3D than for 1D response. Therefore, it is not surprising that few advances have been made and that some of the results obtained do not, apparently, agree. It appears that bending and shear reversals in the two lateral directions increase the degree of stiffness deterioration under uniaxial bending. There can also be a significant decrease in strength and energy dissipation if the axial force can be a tensile force when large bending and shear exists. A practical solution to minimize the problems that tensile forces can create in columns has been developed by the Kajima Corporation [84, 94]. The outer columns of the first 5 stories of a modern 18 story building were post-tensioned.

No analytical model has been developed for predicting the behavior of columns under cyclic 3D loading inducing high shear and variable axial load. Some experimental programs have been started to gather the data necessary to formulate such a model. This model is needed to carry out realistic analysis of the actual performance of real reinforced concrete structures under seismic ground motion.

5. SEISMIC BEHAVIOR OF BEAM-COLUMN JOINTS

5.1 General

Efficient seismic resistant design may be achieved through predictions, or at least visualization of the structure's mechanical behavior under the excitations which it may be subjected to during its service life. To facilitate this prediction, the ideal would be to test real structures under such excitations. Since such tests are not economically feasible, basic structural components have been investigated separately. In the case of moment-resisting frames, the beams and columns have been investigated. Significant data on behavior have been obtained, and analytical methods of prediction have been formulated and used. Therefore the question is: Can the response of the whole structure be predicted from the independent behavior of its components? Because of the interactions between these members, it is necessary to have information regarding the behavior of certain structural subassemblages. The author has discussed this problem in detail in Refs. 16 and 26.

Figure 19 illustrates the basic subassemblages of a moment-resisting frame whose behavior is essentially planar. Note that the beam-column joints are included and that there is distinction between the exterior and the interior beam-column joints. As will be discussed later, the actual subassemblages should be 3D and should consist of at least: a column; beams framing into the columns in two orthogonal directions; the joint between these two elements; and the floor slab they support. The behavior of these subassemblages should be studied under 3D loading conditions.

Because a failure of the joint means a failure of the column, ideally the joint should be the strongest and the stiffest element of the basic subassemblage. In the past this usually has been so. Surveys of earthquake damage usually show no evidence of joint failure, except in cases of very poor detailing and construction. However, because of numerous failures in beams, and particularly in columns, recent seismic codes have much more stringent requirements regarding design and detailing of these two elements. Therefore the author believes that the joint may become the weakest link in the subassemblage. This belief has been corroborated by recent experimental results in laboratories and in the field. In many cases, although there is no visible sign of distress in the joint, it has failed internally with a loss of the required anchorage to the main reinforcing bars of the beams and/or columns.

Current knowledge of the behavior of joints subjected to forces in one principal plane of a space frame is reviewed below. Following this is a more general discussion of the problem of joints in a space frame loaded in three directions.

5.2 Beam-Column Joints in Planar Frame System

In Ref. 16, the author made the following observations:

(1) Types of specimen: Subassemblages like those indicated in Fig. 19(a), where part of the floor slab is reproduced and gravity forces are applied through this slab; should be tested.

(2) Method of Testing: All tests must have a standard loading arrangement and sequence. The proper loading sequence can only be obtained by integrating analytical and experimental studies. The usual sequence of

loading is that of gradually increasing the peak value of the load or deformation (Fig. 5[b]). This method can be conservative or not, depending on what element controls the behavior of the subassembly. If the behavior is controlled by the beam or column, this loading sequence will give upper bounds for strength and energy absorbed and dissipated. If a lower bound is desired, it is best to use a sequence starting with large peak load and deformation cycles. However, if a weak panel zone controls the behavior, the gradually increasing load sequence will give a lower (conservative) bound. Another important consideration is the magnitude of peak deformations in each cycle and the number of cycles to which a specimen should be subjected. The magnitude of the peak deformation and number of cycles to which the specimen should be subjected depends on the type of construction as well as on the type of earthquake. Again, only integrated analytical and experimental studies can give correct answers.

(3) Overall behavior: Stiffness degradation observed with reversal of loading is considerably larger than that obtained for critical regions under pure flexure, or bending and low shear forces. The major factors contributing to this degradation for exterior beam-column connections appear to be: diagonal cracking in the joint; crushing of the concrete around the curved portion of the anchorage of the beam-column reinforcing bars; and grinding of the concrete in these regions and along the diagonal cracking, which increases with the number of cycles. No reliable method exists to predict the quantitative effect of these factors on the joint. Thus, there is a need for research on the behavior of joints under repeated reversal cycles. Behavior of interior beam-column connections also should be more thoroughly investigated than it has been to date.

(4) Seismic design: For exterior beam-column connections, premature failure of the joint can be avoided by beams or stubs framing into all four faces of this zone. If this is not possible it is advisable to: (1) use large numbers of small diameter bars for beam reinforcement rather than a small number of large-diameter bars; (2) use steel with a low yielding strength and a large plastic plateau or low strain-hardening modulus of elasticity; (3) use the widest possible column to increase length of anchorage, or extend the anchorage of beam bars into a concrete stub added in the outer face of the column; (4) design the shear reinforcement of the panel zone, neglecting the concrete's contribution in resisting shear and considering the maximum actual stress that can be developed in the reinforcing bars, including strain-hardening characteristics.

Some of these observations are still valid today, and some of the problems still remain, although beam-column joints in planar frames have been studied in many countries since 1972. Experimental results up to 1977 [25,28,39,42,47,84,85,109-116] and their implications have been discussed by Park [25], Jirsa [28], Paulay [47], and Ohmori [84] during the workshop held at Berkeley [17]. The results of these studies have been incorporated in a series of recommendations [15,16] and even in new seismic code provisions [12,14]. Although some of these recommendations have been questioned [117,118], there is no doubt that overall they are a step toward more efficient seismic resistant joint design.

Since 1977 new studies have been conducted on beam-column joints; some of which are reported in Refs. 29, 43, and 119-124. However, all these studies have been concerned with joint strength. There has been very little improvement in predicting stiffness, stiffness deterioration, and deformation

capacity of reinforced concrete joints. These problems will be discussed later.

Following is a summary of results from the above studies, and application of these results to seismic resistant design, starting with a suggested design criteria for the joints. Exterior joints are distinguished from interior joints. The summary is based on results and discussions in Refs. 25, 28, 39, 47, 119 and 124.

5.2.1 Design Criteria of Beam-Column Joints. Paulay in Ref. 47 suggested the following design criteria for joints in ductile moment-resisting space frames:

(1) The strength of a joint should not be less than the maximum strength of the weakest members it connects.

(2) The capacity of a column should not be jeopardized by possible strength degradation within the joint due to inelastic cyclic displacements of a frame.

(3) A joint should not be a prime source of energy dissipation.

(4) During moderate seismic disturbances a joint should respond within elastic limits so that no repair would be necessary for these inaccessible areas of the structure.

(5) The joint reinforcement that will ensure satisfactory performance should not present undue construction difficulties.

Although most researchers and designers agree with the above design criteria, approaches for practical design and detailing of joints vary considerably [25,28,47,116,118,124].

5.2.2 Exterior Beam-Column Joints. As Park [25] points out, an analysis of the forces acting on an external beam-column joint of a reinforced concrete frame (Fig. 20) and of the associated cracking shows that the bond conditions for the longitudinal beam and column bars are unfavorable because: (a) large steel forces need to be transferred to the concrete over relatively short lengths of bar; (b) flexural and diagonal tension cracks are present which will alternate in direction during cyclic loading; and (c) bond deterioration will occur during cyclic loading. For example, if the outer column bars are near to yielding in compression above the core and are yielding in tension below the core, approximately twice the yield force of the bar needs to be transferred to the joint core by bond over the depth of the core. The extremely high bond stresses so induced, and the anchorage forces from the beam bars, can result in vertical splitting of the concrete along the outer column bars. Thus the concrete cover over these bars spalls easily, particularly when heavy horizontal ties are used. This spalling may extend beyond the joint area, significantly reducing the flexural strength of the column, leading to hinging in the column rather than in the beam [42, 124]. Therefore, it has been suggested that the computation of column strength should be based on the strength of the column core area only [124].

If plastic hinging occurs in the beam at the column face, the anchorage of beam steel should be considered to commence within the joint core at one-half the column depth or ten bar diameters, whichever is less, from the face of the column where the steel enters. An anchorage block, in the form

of a beam stub at the far face of the column where the longitudinal beam bars can be anchored (Fig. 20[c]) has been shown to improve joint performance and is being used by some designers in New Zealand. The maximum diameter of longitudinal column bars should not exceed $1/20$ th of the beam depth for steel with $f_y = 40 \text{ ksi} = 275 \text{ MPa}$ or $1/25$ of the beam depth for steel with $f_y = 55 \text{ ksi} = 380 \text{ MPa}$.

It is recommended that the nominal shear stress, v_c , carried by the concrete shear resisting mechanisms in the joint core should only be taken into account if the compressive load on the column exceeds $0.1f_c' A_c$. The degradation of shear carried by the concrete occurs due to repeated opening and closing of diagonal tension cracks in alternating directions and full depth cracks in the beam which results in the beam compression being transferred into the joint core by bond. The ACI 318-71 [35] assumption at 45° cracking is difficult to justify since the cracking will be parallel to the diagonal compression strut which runs from corner to corner. Hence, the design horizontal shear force in Fig. 20(a) is $T-V'$, where T is the force in the beam bars enhanced for overstrength and V' is the column shear force. This design shear force should be resisted by the concrete, if the compressive load exceeds $0.1f_c'$, and by the force in the horizontal shear reinforcement which crosses the corner to corner crack. Vertical shear reinforcement should also exist in the form of vertical column bars around the perimeter of the column section (spacing not to exceed 6 in. (150 mm), with at least one intermediate bar between the corners. Such vertical bars are necessary to help transfer vertical shear forces. That is, four bar columns should not be used. A procedure for the design of vertical shear reinforcement has been developed [125].

The use of all these rules could lead to very conservative joint construction, but until new data is available, such requirements should not be relaxed.

5.2.3 Interior-Beam-Column Joints. Until 1972, relatively little attention was paid to interior-beam-column joints. This could have been due to the philosophy of some seismic codes regarding anchorage of the beam bars in this joint. For example, the commentary of ACI 318-71 and even ACI 318-77 [35] states, "The code does not require anchorage calculations for top and bottom reinforcement continuous through beam-column connections except for anchorage within each flexural member". The argument given is that "reverse loading tests of interior connections conforming to ACI 318-71 provisions show that the advantages of continuity offset any theoretical deficiencies in embedment length within the connections". Bertero and Popov, in Ref. 39, have questioned the soundness of this provision, because the slippage of the longitudinal beam reinforcing bars through the joint can lead to deterioration of the subassembly's energy dissipation capacity. The importance of this degradation is illustrated in Fig. 21, which shows test results for one specimen [39,41].

Using the third-floor framing in a 20-story moment-resisting reinforced concrete building as a prototype, a half-scale subassembly with an interior joint was designed (Fig. 21[a]). In this subassembly, inelastic action was to develop in the beams, i.e., the design philosophy of strong columns-weak girders was followed. The beams were reinforced in exactly the same manner as beam specimens of a half-scale cantilever series of experiments (Fig. 21[b]) [40,69]. The testing arrangement for the cross-shaped specimen was such that an axial column force, as well as vertical forces at the ends of the beams, could be applied to it. Whereas the top hinge of the

subassemblage remained fixed in position, the other three hinges could be displaced horizontally upon application of a horizontal force at the lower hinge. At large displacements of the lower hinge, the P- δ effect caused by the vertical load in the column was significant.

Eight similar subassemblages have been tested to date. A brief discussion of the major results follows. One of the cantilever specimens was tested under a monotonically increasing load. The lateral load-deformation relationship (H vs δ) is shown in Fig. 21(c). From this figure, it can be seen that the curve is of the softening rather than the strain-hardening type. This is as to be expected from the results obtained with the beams, Fig. 21(b) together with the added P- δ effect. The significance of the P- δ can be noted from the comparison of the two curves shown in Fig. 21(c). Besides the H-curve, there is another one for the equivalent story shear, H_{eq} , which is related to the measured story shear by the relationship, $H_{eq} = H + P\delta/h_{col}$.

In Fig. 21(d), an analytic hysteretic loop is compared with the experimental one of Fig. 21(c). The agreement for the monotonically increasing story shear is excellent. However, large discrepancies can be noted during the loading in the reverse sense and these discrepancies become greatly magnified during the initial reloading of the second cycle. The following questions therefore arise:

(1) Why is there such a sharp degradation in strength during the first reversal, after just the first loading to a displacement ductility ratio of 4.5?

(2) Why is there such a pronounced degradation in stiffness during the first reloading, after just one cycle of a full reversal?

Since nominal shear stress developed in the beams was small [on the order of $3\sqrt{f'_c}$ (psi) ($0.25\sqrt{f'_c}$ (MPa))], similar to that induced in the cantilever beams of Fig. 21(b), it is clear that the observed degradation was not the result of shear in the beams. The main reason for this behavior was the slippage (pull-out) of the beams' main longitudinal reinforcement along the column joint. This is clearly shown in Fig. 21(e) where the sum of the measured pull-out and push-in of the steel bars is plotted.

The effect of repeated load reversals can be seen from the results presented in Fig. 21(f). These results were obtained from tests conducted on the specimen used in obtaining the results of Fig. 21(c) after it was repaired by injecting epoxy into the cracks. Although it was possible to achieve the strength attained during the first loading of the virgin specimen, this strength was achieved at a considerably greater deformation. During the second cycle, there was a large drop in strength from the first peak deformation reached during initial loading. As the number of cycles increased, both resistance and stiffness dropped as a result of bond deterioration along the embedment length of the beam bars.

Recently, there have been many studies of the interior joint [25,47, 114,117-123]. Many of the points made regarding exterior beam-columns apply to interior beam-column joints. In discussing ways to improve seismic behavior of interior joints, Park [25] points out that:

(1) When plastic hinging occurs in the beams at the column faces, it is recommended that the maximum diameter of longitudinal beam reinforcing

bars should not exceed 1/25th of the column depth for steel with $f_y = 40 \text{ ksi} = 275 \text{ MPa}$ or 1/35th of the column depth for steel with $f_y = 55 \text{ ksi} = 380 \text{ MPa}$. The diameters of longitudinal column bars are limited as for exterior joints.

(2) The degradation of shear strength with cyclic loading occurs in the joint core for the same reason as in exterior joints. Repeated opening and closing of diagonal tension cracks, and full depth cracking in the beam at the column face, lead to a reduction in the effectiveness of the concrete diagonal compressive strut. Figure 22 illustrates the forces acting on a beam-column joint core. The forces entering the joint core are transferred across it by the diagonal compression strut (Fig. 22[b]) and by a truss mechanism involving diagonal tension and compression induced by the bond forces of the longitudinal bars (Fig. 22[c]). The shear carried by the concrete, v_c , arises mainly from the diagonal compression strut. When full depth cracking of the beam leaves the longitudinal steel as the only effective beam force transmitter, the mechanism involving truss action becomes dominant and this mechanism requires the presence of both horizontal and vertical bars to carry the diagonal tension forces across the joint core. Hence the force to be carried by the horizontal shear reinforcement increases as cyclic loading proceeds and vertical steel crossing the joint core is needed to carry the vertical forces necessary to complete the truss mechanism.

As noted by Paulay [47] although it is possible to transfer joint shear across the joint core with sufficient ties and intermediate vertical column bars, providing adequate anchorage for the main beam reinforcement presents a more difficult problem. The bond of the main beam reinforcement, anchored in the joint in the plane of the frame, can be adversely affected by the same mechanisms that are responsible for joint-core shear strength degradation: In particular by the transverse tensile strains imposed by the main reinforcement of the beams framing at right angles to the plane of the frame, and yield penetration into the joint when the inelastic regions (plastic hinges) developed adjacent to the faces of the joint. Generally, ACI 318-71 [35] development requirements cannot be satisfied for beam bars passing continuously through interior joints that are subjected to severe earthquake loading.

Excellent response to reversed cyclic loading (elimination of hysteretic pinching) was obtained at the University of Auckland [114] in specimens in which the steel forces were transferred to the core by welded bond (bearing) plates. Although this arrangement cannot be considered as a practical solution to the joint problem, the tests have clearly shown the great significance of proper anchorage within the joint.

When plastic hinges may form adjacent to columns, the diameter of the steel beam bars, passing through a joint, should not exceed the limits indicated above: 1/25th or 1/35th (depending on the grade of the steel) of the column depth in the relevant direction. If this is done, experimental evidence indicates that a large number of excursions with adequate ductility in both directions of seismic loading can be made before slippage of the bars will reduce the strength of the joint [47].

5.2.4 Elastic Joints. Two of the critical aspects of joint seismic behavior discussed above have been found to result in construction difficulties [47]. Unless the flexural tension reinforcement content in beams is kept small (i.e. less than 1.5 percent) the horizontal joint stirrup reinforcement may become so large that serious congestion of steel results. The limitation of bar size

in beams, to reduce the danger of slippage, may result in the use of an excessive number of bars. Some designers have found it necessary to increase member sizes for the sake of steel placement within the joint. In spite of these measures, in conventionally reinforced joints a satisfactory safeguard does not yet appear to exist against pullout of beam bars from joints. Whenever practical, the prime cause of these difficulties, beam hinges adjacent to column faces, should be eliminated. This may be achieved by curtailing the beam reinforcement so that a deliberate weakness in flexural resistance results at a more suitable beam section. The relocated potential plastic hinge should be as near as practicable to the column face but far enough to ensure that, as a consequence of reversed cyclic loading, yield penetration will not extend to the column face. In such a beam when well designed, the steel stresses at the column face will approach but not exceed the level of nominal yield when the overstrength capacity at the relocated plastic hinges is simultaneously being developed. Therefore, if the joint core is adequately reinforced to resist horizontal and vertical joint shear force, it will remain elastic during cycling loading. This design philosophy, of moving the formation of plastic hinges from the face of the column and thereby assuring elastic joint behavior, was suggested by Bertero and Popov [38,39,68]. Experimental studies [42,119] show this to be a sound and practically feasible philosophy. Figures 23(a) and 23(b) illustrate one of the techniques used to move the beam inelastic regions (plastic hinges) away from the face of the column. (The specimen used is similar to that shown in Fig. 21[a].) The two top interior main bars of the beams were bent downward; and the two corresponding bottom bars were bent upward, intersecting 16 in. (406 mm) away from the column face. The hysteretic behavior of the specimen was excellent (see Fig. 23[c]). The hysteretic loops became pinched only after the first cycle with a full deformation reversal at displacement ductility seven. Comparison of test results of Figs. 23(c) and 21(f) shows a significant improvement achieved by moving the plastic hinge away from the column faces.

The above results have been confirmed by an experimental study carried out by Bull [126], and has been discussed by Paulay [127]. Paulay has also made recommendations which have been incorporated in the seismic provisions of the Draft New Zealand Code [14].

5.2.5 Prediction of Stiffness and Energy Dissipation Capacity of Beam-Column Joints. Analysis of results from investigations into the seismic hysteretic behavior of beams and beam-column subassemblages indicate that joints of R/C frames should not be considered rigid as is usually assumed. Two possible sources of deformation that may develop at the joint must be included to accurately predict the actual hysteretic behavior of the frame, particularly when large displacement ductility demands are expected. These two sources of deformation are illustrated in Fig. 24, and will be identified as the shear distortion of the joint, γ_j , and the fixed-end rotation at the column face, θ_{FE} . Often the most important deformation is the one due to θ_{FE} . In contrast with the amount of research carried out to improve the design of beam-column joints for shear strength, very little has been conducted to improve methods of predicting stiffness, deformation capacity, and energy dissipation capacity of these joints. These mechanical characteristics are controlled by the θ_{FE} , which in turn depends on the bond-slippage characteristics of the beam bars along its embedment length at the joint.

Although excellent work has been done by several investigators on bond under generalized loading [128], to the best of the author's knowledge none of these investigations specifically addressed the problem of bond deterioration

developing at the joint of an interior column. In the case of a joint in an interior column, we are dealing with bond-slippage of steel bars which are embedded in a well confined reinforced concrete but which can still be adversely affected by the mechanisms discussed in section 5.2.3. At Berkeley, there has been an investigation of the simplified problem of bond-slippage of bars embedded in well confined reinforced concrete, which simulates the conditions of a beam-column joint in a plane frame loaded laterally in its plane [129-133]. From the results of these experimental and analytical studies it has been concluded that:

(1) The assumption that beam-column joints of moment-resisting R/C frames are rigid needs to be reexamined. The main reinforcing bars of the beams do pull-out, and thereby cause beams to experience fixed-end rotation. The consequences of this behavior on the overall structural response must be examined.

(2) In the joints, it is essential to distinguish between the bond of unconfined concrete in the column cover from that of the confined core. The latter is appreciably better.

(3) Under monotonically increasing loads, when the beam main bar reaches yielding the accompanying pull-out can cause a fixed-end rotation in the order of 0.001 radians.

(4) The displacement of a bar due to monotonic loading at the column face can be estimated using simple idealizations of bond stress distribution [131]. The dependence on concrete strength, type of lugs, embedment length, concrete confinement, etc. requires further investigation.

(5) Significant bond deterioration occurs from cyclically applied load reversals, particularly when the applied stresses exceed yield.

(6) It appears that bond resistance deterioration is gradually stabilized at the value of friction between two concrete cylindrical surfaces which have a common diameter equal to the outer dimension of the bar, including the lugs.

(7) More comprehensive analytical models are required for generalized loading of a bar. (A model has been developed by Iwathanatepa [133].)

(8) The implications of the effect of θ_{FE} on the behavior of structural systems should be studied analytically. (A computer program that permits inclusion of θ_{FE} in nonlinear analysis has been developed by Soleimani [120].)

5.3 Beam-Column Joints of Space Frames Subjected to 3D Loading

As pointed out in the discussion of columns under 3D loading, the moment-resisting frame is usually a space frame having two-way frames in each joint, i.e., beams framing into the joint along the two orthogonal main axes of the structures, and subjected to ground motions with components in both directions. In spite of this, most seismic codes presently require that the joint be designed independently in each direction. Furthermore, some codes, such as ACI [35] allow the transverse reinforcement in the connection to be reduced by one-half if every beam has a width not less than one-half the column width and a depth not less than three-fourths that of the deepest beam

framing into the connection. Even the new recommendations of the ACI-ASCE Committed 352 [116] for design of beam-column joints allows an increase in the shear stress carried by concrete when the joint is confined by lateral members framing into the joint. It is agreed that transverse confinement can enhance the shear capacity of the concrete. However, the question is how effective this confinement can be when critical regions (plastic hinges) are developed in the beams framing transversely into the joint.

In Ref. 25 Park has shown that if the beams in the two directions are identical and they yield simultaneously, the horizontal shear force acting along the diagonal of the joint cross section (Fig. 25) is $\sqrt{2}$ times the uniaxial shear force. However, the diagonal tension crack intersects the same number of reinforcing bars as for uniaxial shear. If these bars are parallel to the sides of the section, the diagonal component of the bar force is only $1/\sqrt{2}$ that available to resist uniaxial shear. Hence design for biaxial shear for symmetrical two-way frames can lead to approximately double the quantity of shear reinforcement required for uniaxial shear design. This can create serious practical problems, such as congestion of steel. Experimental studies of this problem are needed. Some experiments are presently being carried out at the University of Canterbury, New Zealand [121], and at the University of Texas, Austin, Texas.

5.4 Concluding Remarks

Research concluded since 1972 has resulted in significant advance in understanding the behavior of beam-column joints, leading to development in the practical design and construction of such joints. However there are some problems that still need further research and development. There is a need to study how the strength capacity of the joint can be affected by (a) the slab; (b) 3D loading; (c) the eccentricities of the elements framing into the joint; (d) the amount and type of both transverse and longitudinal reinforcement. The main parameters controlling such strength capacity should be identified. There is also an urgent need to study the joint's stiffness, the deterioration of this stiffness, and its deformation capacity and energy dissipation capacity. It is important to develop simple but reliable mathematical models of joint behavior that can be used in computational analysis to study the affect of joint behavior on seismic response of ductile moment-resisting space frames.

Until further information is available, joint design should be based on the stringent rules given above or should be based on the philosophy of keeping the joint elastic by moving potential critical regions in the beams away from the face of the columns.

6. SEISMIC BEHAVIOR OF LIGHTWEIGHT CONCRETE LINEAR STRUCTURAL ELEMENTS AND THEIR CONNECTIONS

6.1 General

There are a number of advantages to using lightweight, rather than normal weight, aggregate concrete in seismic-resistant reinforced concrete construction. One of the basic principles of such construction is to avoid use of unnecessary mass. The lower the weight of the reactive masses the lower the seismic forces that will develop as a consequence of earthquake ground motions. If one compares the standard mechanical characteristics obtained from compression test per unit weight of lightweight concrete with those of normal weight concrete (Fig. 4) or analyzes results available from experimental studies on individual structural elements there is no doubt that it would be advantageous to use lightweight aggregate concrete. Therefore, some investigators have concluded that the use of this type of concrete results in more efficient earthquake resistant construction [134, 135]. However, proper assessment of the performance of any structural system requires not only analysis of the behavior of the individual elements, but also of the assemblage of these elements. As already discussed, this is of particular importance in the case of R/C structures where connections between elements depend upon transfer of forces between the two constituent materials, reinforcing steel bars and concrete.

Current seismic codes in both the U.S. [35, 36] and Canada [136] permit the use of lightweight concrete in the construction of ductile moment-resisting space frames. The only precaution is that "the maximum specified strength for lightweight concrete shall be limited to 4000 psi (28 MPa)". Unfortunately, because of its lower modulus of elasticity, very high compressive strength concrete mixes have been used to achieve a higher degree of stiffness and this has caused some problems regarding the use of these mixes for seismic-resistant construction, particularly regarding the effectiveness of confinement, bond, and shear transfer of such concrete.

6.1.1 Confinement. References 20, 23 and 137 discuss the problems of using confined lightweight aggregate concrete for seismic construction. A summary of the observations made in these references follows.

Confinement of concrete with all types of aggregate tested was effective in developing large deformability. However, the effectiveness of concrete confinement in the performance of earthquake-resistant reinforced concrete structures should not be based only on the extent to which the deformability is increased, but also on the ability of the confined concrete to sustain large deformations without loss of strength. Therefore, confinement should also increase the compressive strength of the concrete, so that it is possible to offset the loss of strength due to the reduction of the cross-section resulting from crushing and spalling of the concrete cover.

Figure 26 shows some results of the study in Ref. 23. These results show that the conditions of increased deformability and compressive strength are satisfied to a varying extent for different concretes, and the effectiveness of confinement is highly sensitive to the type of aggregate used. The effectiveness of confinement can be characterized by two material constants, k_0 and k_u , which are defined by relating the increased compressive strength f_c^* to

the confinement pressure, f_r .

The maximum compressive strength $f_c^* \text{ max}$, occurs after some strain, ϵ_0^* , and can be related to the unconfined compressive strength of the same concrete, f_c , and the confinement pressure as:

$$f_c^* \text{ max} = f_c + k_o f_r \quad (3)$$

At very large deformations, $\epsilon_U^* \gg \epsilon_0^*$, the compressive strength usually decreases to a value of f_{cU}^* , and can be related to these same parameters as:

$$f_{cU}^* = f_c + k_U f_r \quad (4)$$

The confinement pressure, f_r , depends on the geometric and material characteristics of the spiral wire, and can be approximated by:

$$f_r = \frac{2A_{sp} f_s}{D_c s} = \frac{1}{2} \rho_s f_s \quad (5)$$

where ρ_s is the ratio of volume of spiral to total volume of core and f_s is the stress that had been developed by the spiral wire. Assuming that the ductile spiral wire yields when the longitudinal strain in the concrete is in the range ϵ_0^* to ϵ_U^* , and that the strain-hardening of the spiral is negligible in the range of these concrete strains: (a) f_s is equal to f_y ; (b) f_r can be calculated for given values of A_{sp} , D_c , and s from Eq. 5; (c) values of k_o and k_U can be calculated from Eqs. 3 and 4, using the test results. The values for the five different concretes used in this study are shown in Table 1. Early investigators have shown that the confinement effectiveness coefficient, k , varies with lateral pressure intensity and with longitudinal strain. However, in developing the ACI criterion for spiral reinforcement (Section 10.9.2 of ACI 318-71) [35] and similar criteria which are based on the confinement of concrete, a constant value of k , usually taken as 4.0 to 4.1, has been assumed.

TABLE 1.- EFFECT OF CONFINEMENT ON COMPRESSIVE STRENGTH AND DEFORMATION OF CONCRETE.

Type of Concrete	Confinement Stress Ratio (f_r/f_c')	Maximum Compression		Ultimate Compression	
		Strain Ratio	Confinement Effectiveness	Strain Ratio	Confinement Effectiveness
		(ϵ_0^*/ϵ_0)	k_o	(ϵ_U^*/ϵ_0)	k_U
Normal E-5	0.13	2.8	7.0	11.5	0
	0.32	7.8	5.0	11.5	3.1
Lightweight R-5	0.13	1.9	4.4	8.7	-0.5
	0.32	4.0	2.0	6.7	2.0
B-5	0.13	1.35	3.9	10.6	0
	0.32	1.85	1.0	8.6	0.9
R-3	0.11	1.8	2.7	8.9	-1.0
	0.24	5.9	2.5	8.9	2.0
B-3	0.11	1.7	1.35	11.6	0
	0.24	8.7	2.1	9.0	2.1

As shown in Table 1, the values of k for normal weight aggregate concrete vary in the range of 0 to 7.0. For the two lateral pressures ($0.13 f_c$ and $0.32 f_c$), values of k_0 at maximum compression are 7.0 and 5.0 respectively, and values of k_u at ultimate strength are 0 and 3.1 respectively. Based on these values, and noting from Fig. 26 that concrete behaves in a relatively ductile manner throughout a significant range of strains, a constant value of $k = 4.0$ may be justified for normal weight concretes such as E-5, particularly in the case of $f_r = 0.32(f_c)_{10}$.

For lightweight concretes B-3, B-5, R-3, and R-5, the values of k vary in the range of -1.0 to 4.4. Negative values of k_u indicate that compressive failure in the confined concrete may occur at values below the compressive strength of unconfined concrete. For the two lateral pressures ($f_r \approx 0.1 f'_c$ and $f_r \approx 0.3 f'_c$), values for k_0 at maximum compression range from 1.0 to 4.4 and values for k_u at ultimate range from -1.0 to 2.1. Based on these results, a value of k in the range of 1.0 to 2.0 should be taken in developing design criteria based on the increase in strength due to confinement of lightweight concrete. Therefore, the amount of spiral steel required in a column of lightweight aggregate concrete will be 2 to 4 times greater than that currently prescribed by the ACI Code [35]. Because of the geometric limitations introduced by the size of the spiral wire and the minimum spacing, it would be virtually impossible to produce a spiral which would also allow normal placing of concrete.

The effect of the variable coefficient, k , is illustrated in Fig. 27. In this figure, the loss of the axial load carrying capacity for spirally reinforced concrete columns due to spalling is plotted against k , assuming that the spiral reinforcement was designed in accordance with the ACI criterion [35]. This loss of capacity is expressed as a ratio and derived as:

$$\text{Loss} = 0.85f'_c(A_g - A_c) - kfrA_c ;$$

and using Eq.5

$$\text{Loss} = 0.85f'_c(A_g - A_c) - 0.5k\rho_s f_s A_c \quad (6)$$

According to the ACI criterion, $\rho_s = 0.425 [(A_g/A_c) - 1](f'_c/f_s)$. By substituting this equation into the above, and dividing by $0.85f'_c A_g$, the following ratio is obtained

$$\frac{\text{Loss}}{0.85f'_c A_g} = \left(1 - \frac{A_c}{A_g}\right) - 0.25k\left(1 - \frac{A_c}{A_g}\right) \quad (7)$$

Typical values of A_c/A_g (where A_c is the area of core and A_g is the gross area) for spirally reinforced square columns vary from approximately 0.4 to 0.6. For round columns this ratio varies from approximately 0.5 to 0.7. The loss ratio for typical values of A_c/A_g is plotted in Fig. 27, which illustrates the significant losses that can occur due to k values lower than 4.

Most of the recent suggestions and requirements for improved design of

earthquake-resistant reinforced concrete structures rely on the beneficial effects of confinement on concrete behavior. Thus it is important to analyze the implications of the results summarized above [23] with regard to seismic behavior of concrete structures. Some observations obtained from such analyses follow [137].

1. Confinement of concrete with all types of aggregates is effective in developing large deformability, i.e. large ultimate strains. This characteristic is the major factor in the improved performance of elements with spirally confined concrete, as it compensates for some of the losses in strength and stiffness of concrete under cyclic loading.

2. The increase in compressive strength due to confinement is about twice as great for normal weight concrete as for lightweight concrete. Therefore, one should be cautious in using equations from tests on normal weight aggregate concrete to predict behavior in lightweight concrete.

3. The low effectiveness of confinement in some concretes may lead to significant losses in compression capacity when spalling occurs. This is of utmost importance in the seismic design of column elements, since these elements should be able at all times to resist the effects of gravity loads and overturning moments.

These conclusions have been confirmed in a recent experimental study[138].

6.1.2 The Bond and Shear Transfer Problems. Recent bond tests performed at Berkeley [129-133], on specimens simulating the conditions of an interior beam-column joint, demonstrated that the deterioration of bond in lightweight concrete occurred under smaller steel strains than in normal weight concrete [132].

In the case of flexural critical regions under high shear, one of the main factors controlling the degradation of stiffness is shear transfer along the cracks. Mattock has conducted a series of studies on the problem of shear transfer along cracked concrete[78, 79, 139]. Based on test data obtained in these studies, Mattock has concluded that "the shear transfer behavior of initially cracked all lightweight concrete is more brittle than that of sanded lightweight or sand and gravel concrete," and that "shear transfer behavior across a crack becomes more brittle as the concrete strength increases".

The above studies examined the three basic problems in the behavior of lightweight concrete - the effectiveness of confinement, bond, and shear transfer. The studies showed that, for seismic-resistant construction, lightweight concrete has certain deficiencies in addition to its low modulus of elasticity. These deficiencies indicate a need for further studies in order to properly modify the proportioning and detailing rules obtained from and used for members cast of normal weight concrete, so that these rules can be applied to lightweight concrete.

6.2 Behavior of Linear Elements and their Subassemblages.

6.2.1 Studies of Beam Behavior. Very few studies have been reported on lightweight concrete beams subjected to seismic action. Mihai, et al. [140] have

carried out some tests on lightweight aggregate concrete beams columns and their connections and have concluded that:

"Generally the ductility of bending members of granulate lightweight concrete is 15-40% greater in comparison with that of similar members of heavy concrete. In the case of members subjected to compression with bending, the ductility factors are close for the similar members made of heavy concrete, and lightweight concrete. With a proper detailing conception, the joints realized with lightweight concrete are more ductile, with 15-25% increases, in comparison with heavy concrete ones. The more elastic and also more breakable behavior of lightweight concrete, requires detailed and careful experimental and theoretical research for all types of granulate material".

Because of insufficient detail it is difficult to judge what definition of ductility the author of Ref. 140 has used.

6.2.2 Studies of Column Behavior. Experimental studies show it is possible to achieve good ductile behavior by properly confining lightweight concrete with spiral or closely spaced and carefully detailed rectangular hoops and ties [140, 141, 142]. However the only comparison available between similar specimens cast of lightweight and normal aggregate concrete show better strength, stiffness and ductility for the normal aggregate concrete [142]. In Section 6.1, some drawbacks of the use of lightweight aggregate concrete were discussed. In addition, lightweight concrete has a higher rate of creep than normal weight concrete. Therefore, serious questions remain regarding the use of lightweight concrete in columns, especially in tall frame buildings. In the lower stories of buildings, high axial loads caused by gravity loads can cause: a higher rate of creep and larger P- δ effects of lightweight than for normal weight concrete, due to the lower stiffness of lightweight concrete. Comprehensive experiments are needed to find the role of these effects on the hysteretic behavior of lightweight concrete columns.

6.2.3 Subassemblage Behavior. As discussed in Section 6.1, proper assessment of the performance of any structural system requires studying the behavior of the system's basic subassemblages. Studies were conducted at Berkeley [29] of the behavior of basic subassemblages of a ductile moment-resistant space frame (DMRSF) built of lightweight aggregate concrete. The completed study had two main objectives. The first was to study the behavior of a DMRSF subassemblage constructed of lightweight aggregate concrete under earthquake-like load conditions and to compare such behavior to that observed under monotonic loading, paying particular attention to the effects of bond degradation in the joint region. The second objective was to compare the performance of lightweight R/C subassemblages to that of previously tested normal weight subassemblages for both monotonic and cyclic loadings. Figure 21(a) shows the specimens which were used: half-scale models of interic beam-column subassemblages from the third floor of a twenty-story office building. A summary of the results of these tests follows.

Figure 28 compares the behavior of lightweight aggregate specimens (BC7 and BC8) with that of normal weight subassemblages (BC3 and BC4) of similar concrete strength and steel yield strength subjected to similar applied displacement programs. Due to the greater flexibility of lightweight concrete, ductility, μ_s , rather than absolute displacement was used as the base of comparison.

Monotonic Loading - From analysis of the curves shown in Fig. 28(a) it is clear that the overall behavior of the lightweight concrete was very similar to that of normal weight concrete. Furthermore, the contribution of the fixed end rotation θ_{FE} , due to slippage of the beam main bars along the joint, to the lateral displacement, δ , was approximately the same for BC4 and BC7. However, the initial stiffness, which is highly dependent on the material stiffness of the concrete, was 52 percent higher in BC4. This was in agreement with the relative moduli of elasticity of the two specimens, as BC4 had a 46 percent higher modulus of elasticity. This signifies that lightweight R/C structures will have greater nonstructural damage and higher P- δ moments for the same displacement ductility.

Cyclic Loading - The performance of the normal and lightweight concrete specimens under incrementally increasing cyclic loading differed significantly as shown in Fig. 28(b). Specimen BC3 reached a peak strength at LP25 ($\mu_{\delta} = 3.9$) and LP26 ($\mu_{\delta} = -4.2$) while the strength of specimen BC8 peaked much earlier; at LP17 ($\mu_{\delta} = 1.45$) and LP18 ($\mu_{\delta} = -1.75$). At LP22 ($\mu_{\delta} = -2.7$) the capacity of BC8 was already only 70 percent of that of BC3. The difference in behavior was due to the premature total slippage of the reinforcement in specimen BC8. By LP24 ($\mu_{\delta} = -2.7$), the contribution of the θ_{FE} at the column face to δ was over 75 percent for BC8 while it was less than 35 percent for BC3. Total slippage of the beam bars did not occur in BC3 until LP29 ($\mu_{\delta} = 5.4$) when over 50 percent of δ was due to θ_{FE} . This strikingly different behavior under cyclic loading indicated that the bond within the joint deteriorates at lower μ_{δ} in lightweight concrete. Although the cause of this earlier deterioration is not completely understood, it is speculated that the lightweight aggregate is sheared and crushed by the lugs of the deformed bars at lower stresses, leading to earlier bond deterioration. Propagation of cracks formed by the action of the lugs might also be affected by the type of aggregate used.

6.3 Concluding Remarks. From the available information, particularly from results of studies carried out at Berkeley, the following observations can be made. Because of the relatively meager data available, these observations are of a preliminary nature.

1. Individual lightweight aggregate members have a similar hysteretic behavior to normal weight aggregate members of similar strength. The only remarkable difference is the lower stiffness of lightweight concrete, which means larger deformation is needed to develop the same displacement ductility.

2. Beam-column subassemblages subjected to monotonic loading show that a displacement ductility (μ_{δ}) in excess of 5 can be achieved without a decrease in resistance. Behavior is very similar to that of the normal weight specimen. For the same ductility displacement ratio the total displacement and the story drift is greater than that of the normal weight specimen, causing larger P- δ moments.

3. Under cyclic loading, the behavior of beam-column subassemblages cast of lightweight aggregate concrete is drastically different than that under monotonic loading, due to earlier slippage of the beam reinforcement through the joint. Yielding of this reinforcement accelerates bond deterioration and therefore slippage.

4. Under cyclic loading, the energy dissipated by beam-column subassemblages is smaller than that of similar normal weight subassemblages. The main reason for this was that total slippage of the beam reinforcement through

the joints occurred earlier in the lightweight specimen, at $\mu_\delta = 2.4$ as compared to $\mu_\delta = 5.4$ for the normal weight specimen, resulting in a more pinched hysteretic behavior.

5. The assumption of a rigid joint appears to be inaccurate not only at large ductilities, but even at the yield level, under monotonic and particularly cyclic loading. The contribution of the fixed-end rotation to the total story drift under monotonic loading is about 13 percent at the yield level, increasing to 22 percent at higher ductilities. Under cyclic loading the contribution is 18 percent at the yield and increases to greater than 90 percent at higher ductilities.

6.4 Recommended Design Improvements and Research Needs.

1. Development of new design and construction methods is needed to prevent yielding of the reinforcement at the beam-column interface, which usually triggers or accelerates total slippage of the beam reinforcement. One such method is to move the regions of the inelastic action away from the joint. This can be accomplished by: (i) bending or cutting off at a short distance from the joint some of the top and bottom beam reinforcing bars, forming a region of sufficiently lower moment capacity to be the critical one. Some research has already been conducted in this area using normal aggregate [119, 126]; or by (ii) designing haunches which sufficiently increase the moment capacity near the joint to prevent yielding of beam reinforcement at the column face. Another method consists of improving the anchorage of the reinforcement within the joint by using special mechanical devices [114] or better detailing, such as crossing the top and bottom beam reinforcement [127, 143].

2. The basic causes for more rapid bond deterioration in lightweight concretes should be explored further.

3. Experiments with beam-column subassemblages having floor slabs are needed to more accurately simulate the actual conditions found at joints in buildings.

4. Analytical programs need to be developed, based on a stiffness degradation model, which include fixed-end rotations at the joint in order to study the affect of the observed deterioration on the response of framed structures to earthquake ground motions.

7. SEISMIC BEHAVIOR OF PRESTRESSED AND PRECAST R/C LINEAR ELEMENTS AND THEIR CONNECTIONS

7.1 General

7.1.1 Prestressed Concrete. In 1972, the author reviewed the state-of-the-art in prestressed and partially prestressed concrete structures and their elements. [16]. He reported the conclusions reached by Blakely and Park in their historical review of the seismic resistance of prestressed concrete (1971) [144], as well as the conclusions of their tests on four full-size, precast prestressed concrete beam-column assemblies. A brief summary of these conclusions follows:

From the 1971 review:

(1) Most structures containing prestressed concrete elements which have been subjected to earthquakes have performed well. Failures which have occurred appear to have been due mainly to failure of the supporting structures or of the joint connections. However, there is very little information on the behavior of fully framed prestressed concrete structures under strong earthquakes.

(2) Although the energy absorbed by a prestressed concrete member could be the same or even larger than a similar reinforced concrete member the greater elastic recovery of the prestressed concrete member will result in a lower energy dissipation for cyclic loading. This lower energy is a drawback in seismic design. However, little is known of the energy-dissipation capacity of prestressed concrete members under high-intensity cyclic loading.

(3) High intensity cyclic loading tests of prestressed concrete members and subassemblages including different joint details is needed.

From the test results:

(1) Energy dissipation is relatively small prior to commencement of crushing in the concrete, but substantial once crushing has occurred. (2) Large post-elastic deformation can be available in prestressed concrete members, even where the transverse reinforcement satisfied only normal prestressed-concrete code requirements for shear. (3) Substantial stiffness degradation is apparent for prestressed concrete members after high-intensity cyclic loading. (4) Mortar joints between precast post-tensioned frame members can behave satisfactorily under high-intensity load reversal. (5) Prestressed-concrete framed structures can be capable of resisting moderate earthquakes without structure damage, and of withstanding severe earthquakes although structural damage may occur, with a consequent difficulty of repair back to fully prestressed condition.

In the concluding remarks of Ref. 16, the author enumerated a series of problem areas in which research was needed to improve understanding of the behavior of concrete structures under generalized excitations. The author then stated, "All the above required research applies as well to reinforced concrete as to prestressed concrete. However, in prestressed concrete other problems such as questions of the optimum degree of partial prestressing, of bonded versus unbonded prestressing tendons, the behavior of prestressed anchorage under dynamic loading, etc. still remain to be answered." The author would like to emphasize that the basic problems encountered in the seismic

behavior of ordinary reinforced concrete are also present in prestressed concrete, since prestressed concrete is just a special case of reinforced concrete structure in which an initial, desirable state of compression is introduced to the concrete. The only difference is the degree of severity of these problems. (For example, one cannot expect good seismic hysteretic behavior of prestressed elements whose critical regions have not been properly confined with lateral reinforcement. These points - that the basic problems of ordinary and prestressed concrete are the same, and that the severity of the problems may differ - should be kept in mind in judging results from experiments of prestressed concrete elements.

In order to obtain a good sense of the state-of-the-art and the state-of-the-practice, up to 1977, of seismic behavior of prestressed concrete framed structures and their elements, one can review papers presented at the ERCBC Workshop held at Berkeley in 1977 [17]. Particularly appropriate are the papers by Lin and associates [145]; Park [146]; Hawkins [147]; and Park and Thompson [148]. Hawkins, in Ref. 149, has reviewed and synthesized the information presented in this workshop and several other researchers and practicing engineers have discussed it. From this review it is apparent that although the advances in knowledge about seismic behavior of prestressed concrete elements have been not as great as the advances for ordinarily reinforced concrete elements, there is sufficient evidence to formulate comprehensive seismic design recommendations for prestressed concrete [150,151]. A brief summary of some of the new information on seismic behavior of prestressed concrete elements is presented later in this section.

It is generally agreed that the response of a prestressed concrete structure to a given earthquake will be greater than that of a comparable reinforced concrete structure, because of its lower energy dissipation and viscous damping properties. However, because the use of higher concrete strength results in a smaller neutral axis depth, prestressed concrete members may sustain greater curvatures before crushing than comparable reinforced concrete members of the same flexural strength and section size. Alternatively, prestressed concrete members may be of smaller section, and therefore less mass. These factors may well counteract the effect of the smaller energy dissipation capacity under cyclic loading [152]. From the review of all the available information, it becomes apparent that proper use of prestressing can be an asset to seismic resistant construction of concrete frame structures.

7.1.2 Precast Elements. In the zones of high seismic risk in the United States, precast concrete framing is not widely used as a primary lateral load resisting system: little information exists regarding seismic behavior of this type of concrete construction. Hawkins, in Refs. 147 and 149, reviews the state-of-the-art in seismic resistance of precast concrete structures, although most of the review is devoted to precast panel construction rather than to precast concrete frames. Ikeda and associates, in Ref. 153, have reviewed the state-of-the-art of precast concrete techniques in Japan, pointing out that the main problem is the prediction of strength and deformation capacities of beam-column connections. It is clear that there is nothing wrong with the elements. The problem is in the joints between these elements. It is believed that proper use of prestressing can improve the performance of joints between precast elements. There is a tremendous potential for the use of lightweight aggregate concrete, precast, prestressed elements in seismic resistant construction.

7.2 Seismic Behavior of Prestressed Concrete Beams, Columns, and their Subassemblage

7.2.1 Beams. As with ordinarily reinforced concrete structures, it is convenient to classify prestressed beams according to stresses controlling behavior of their critical regions: i.e., Flexural and Flexural with High Shear.

7.2.1.1 Flexural Critical Regions. Hawkins [147], after analyzing the experimental results obtained in numerous experiments as well as the performance of prestressed concrete beams in real earthquakes, drew a series of conclusions. The most important conclusions are summarized below, together with some conclusions from recent studies carried out in New Zealand [148,152].

(1) Most prestressed concrete beams, when designed for loading reversals, perform well in earthquakes. Generally, deformed bar reinforcement and confinement by stirrups are necessary to provide adequate strength under moment reversals. The failures that have occurred have been due mainly to failures of the supporting structures or connections. Major consideration must be given to the strength of connections and supporting structures.

(2) Experimental flexural strengths of the beams are usually greater than theoretical flexural strengths because experimental moments reach their maximum at an extreme concrete fibre strain greater than 0.003. This is due to the extra confinement given to the beam concrete by its reinforcement and the adjacent column concrete. With stirrups and compression reinforcement, ultimate strength can increase by as much as 16 percent.

(3) Unless the first damaging load exceeds about 80 percent of the collapsed load, the capacity in the reverse direction is unaffected. If the concrete is not confined, cycling to strains greater than 0.002 induces a loss in strength and stiffness due to spalling of the compressed concrete and penetration of crushing into the core of the member. That degradation can be slowed and the ductility and energy absorption increased by the addition of either bonded compression reinforcement or confinement - preferably both. Unless confinement is provided there is a marked degradation in the flexural capacity for beams reversed cyclically and loaded to an excess of 90 percent of their flexural capacities. Confinement should be achieved by closed stirrups with a spacing not exceeding $d/4$.

(4) High seismic loading rates can result in strength increases of four to seven percent and ductility increases of 10 to 15 percent. It is generally appropriate for design computations to be based on static loading strengths only.

(5) Prior to crushing of the concrete or marked inelastic flow of the prestressing steel, loading-unloading curves are bilinear with ranges corresponding to crack open and crack closed conditions. The loading and unloading curves closely parallel each other with small amounts of dissipation of energy.

(6) Prestressed beams show marked elastic recoveries even after considerable inelastic deformations, leading to pinching of the hysteretic loops. Figure 29 compares beam moment-end deflection relationships for three beam-column specimens with similar theoretical flexural strengths and with prestress levels of 1160, 386 and 0 psi, (8.1, 2.7 and 0 MPa,) respectively. Energy dissipation for prestressed concrete elements is less than that for

reinforced concrete elements because of elastic recovery effects. In general, the residual tensile force in the prestressing steel is adequate to close previously open cracks. Thus, significant energy dissipation does not develop until the deformed bar reinforcement yields, the prestressing steel yields, or the concrete crushes. Recent test results of beams where flexural behavior controls inelastic response have been promising. The use of these beams in seismic resistant prestressed concrete frames should be investigated further. Most previous tests have primarily involved symmetrical arrangements of prestressed and nonprestressed steel: these tests need to be extended to other arrangements. Further study is also needed of the spacing of stirrup ties that are required to prevent buckling of nonprestressed steel under reversed loading.

7.2.1.2 Flexural Critical Regions with High Shear. As noted by Hawkins [147], there is little information available on the behavior of these prestressed critical regions. In the tests carried out by Park and his associates [148, 152], the nominal unit shear stresses developed were very small: less than $2\sqrt{f'_c}$ (psi) [$0.16\sqrt{f'_c}$ (MPa)] and less than 1/3 of the theoretical computed shear strength using ACI 318-71 [35]. Therefore, no adverse shear effects were observed. There is an urgent need for systematic studies on the behavior of the prestressed elements subjected to high shear stresses.

There is general agreement that beams should be proportioned and detailed so that they will not fail in shear. The FIP Commission [150] recommends that in calculating the design shear force the plastic hinge moments should be determined considering the possible overstrengths of the material. These enhanced plastic hinge moments may be estimated as 1.15 times the flexural capacities based on the characteristic strengths of the materials. The proposed provisions for the New Zealand Code [14] contains specific requirements for designing against shear force, neglecting the concrete's contribution in resisting shear when the design axial compressive force produces an average stress smaller than $0.1 f'_c$.

7.2.1.3 Bond, Grouting and Anchorage. According to Lin and associates [145], seismic safety can be equally obtained by either bonded or unbonded construction. However, this is a controversial issue, on which the FIP Commission on Seismic Structures has prepared a special report [145]. Present FIP guidelines [150] recommend grouting the prestressing ducts in flexural members of a ductile structural frame. The New Zealand Code has similar requirements, except for special cases where post-tensional tendons may be ungrouted. Bond transfer lengths and performance under cyclic loading are very sensitive to surface conditions and to the method of release for the strand.

Careful consideration must be given to the location of tendon anchorages. They should not be placed in regions of high bending or rotation, which can adversely affect their capacity. Consideration must also be given to the flow of forces from the anchorage.

7.2.2 Columns. Except for experiments carried out by Hisada and associates [142] there has not been much research done on prestressed columns alone. Usually, columns have been studied as part of a subassembly, in which they were stronger than the beams and hence were not critical elements. An exception to this was the joint core regions which will be discussed later. The ductility of prestressed concrete columns have been studied by Blakeley [154]. As expected, the available curvature ductility of a prestressed concrete column decreases with increased axial load level. Special transverse confining

steel is necessary in prestressed columns (as it is for reinforced concrete columns) once the axial load exceeds some nominal value such as $0.1 P_0$ where: P_0 = strength of columns when load is applied with zero eccentricity.

Prestressing can improve the behavior of reinforced concrete columns [142] and therefore of the whole frame, provided the peculiarities of prestressing are considered in the design as well as in the detailing of the columns. Figure 30 illustrates an example of post-tension prestressing the outer columns of the first 5 stories of an 18 story building (to reduce the possibility of tensile cracking strength during severe earthquakes). This application has been discussed by Ohmori [84], Muto [94] and Hisada and associates [142].

There is a need for experimental work on partially prestressed columns under severe seismic actions. Among the parameters that need to be studied the following deserves special attention:

- optimum degree of prestressing; and optimum location of the pressure line;
- quantity of confining steel necessary to achieve adequate rotation ductility, particularly under high compressive loads, and to prevent buckling of the bars;
- the affects of unbonded tendons, particularly when used continuously over several column stories.

7.2.3 Beam-Column Joints: Following design criteria similar to that used for ordinarily reinforced concrete structures, the FIP Commission on seismic structures [150] recommends: "The connections between members in prestressed concrete construction should be carefully designed for effectiveness at all earthquake limit states, on the following basis:

(a) Connections should be checked for both seismic stresses and deformations.

(b) The load-carrying capacities of connections should not be less than those of the adjacent structural members.

(c) Connections should be capable of failing in a ductile manner."

In their commentary the FIP Commission emphasizes that inelastic loading cycles (particularly those involving not only load but also deformation reversals) can result in a degradation of the concrete shear-resisting mechanism due to breakdown of the joint core, caused by alternating bond force and diagonal tension cracking.

The above design philosophy is clear and well accepted. However, adequate provisions, methods and rules for quantifying and practically applying this philosophy are still lacking despite improvements in understanding hysteretic behavior of beam-column joints. Most of the studies have been related to the strength of the joint, very little has been done regarding prediction of stiffness and its degradation with increasingly severe cyclic loading, or with the prediction of deformation capacity and energy dissipation capacities.

The work of Park and his associates [146,152] has significantly increased knowledge of the effects of prestressing on joint behavior. Their work showed that serious difficulty in preventing joint core distress during severe seismic loading can only be minimized by careful proportioning and detailing. Their main findings follow:

(1) The ACI 318-71 Appendix A [36] approach for joint core shear strength cannot be regarded as adequate for plane frames subjected to intense cycles of seismic loading. It fails to make any provision for vertical shear reinforcement in the plane of bending.

(2) The use of a reasonable level of prestress through a central tendon improved the hysteretic behavior of the joints.

(3) The contribution of the concrete to shear strength should be neglected except when the mean column compressive stress exceeds to $0.1 f'_c$.

(4) The inclusion of vertical shear reinforcement within beam-column joint cores, in the form of intermediate column bars, and horizontal shear reinforcement, in the form of ties, allows the joint core shear force to be resisted more effectively than when intermediate column bars are not present (Fig. 31).

(5) The draft of the New Zealand Concrete Design Code [14] recommends the provision of the vertical shear reinforcement to transmit vertical shear forces within the joint core. The amount of horizontal and vertical shear reinforcement required by this draft Code approach was found to be safe but rather conservative.

Although the above results led to improved understanding of the hysteretic behavior of prestressed concrete beam column joints, research is needed in the following areas:

(1) The actual contribution of concrete to joint strength, stiffness and energy dissipation capacity when subjected to different levels of compressive stress.

(2) Other means of vertical joint shear reinforcement.

(3) Maximum bar diameters allowable for longitudinal steel to prevent total slippage through the joint core.

(4) The affect of unbounded tendons.

(5) The potentials of moving the critical regions away from the face of the columns.

7.3 Seismic Behavior Precast Concrete Beam, Column and their Connections

As discussed in Section 7.1.2, the main problem in using these elements is associated with their connections. As noted by Hawkins [147], while many types of connections have been developed [155,156] more information is needed regarding the behavior of these connections under severe earthquake loading conditions. A comprehensive experimental research program is needed where these connections, as well as those already in use, will be studied under simulated seismic conditions. Meanwhile, it is recommended that designers

and fabricators of these precast elements try to locate the connections so they can be easily constructed and are not subjected to severe simultaneous bending, shear and axial forces. An example of proper location of field connections is shown in Fig. 32.

7.4 Concluding Remarks

Prestressed and precast linear concrete elements are not widely used to form primary seismic resistant structural systems. The amount of research in this area has been relatively small compared with that on ordinarily reinforced concrete, and some fundamental questions remain unanswered. Nonetheless, in the last decade, there have been significant advances in understanding problems introduced by these techniques of reinforced concrete construction.

There is tremendous potential in the use of prestressed and precast lightweight concrete structural elements. To realize this potential quickly, it is necessary to recognize - that prestressed and precast concrete elements are just a particular case of R/C structures and practically all drawbacks of ordinary R/C elements are also present in prestressed and precast elements. Therefore, existing knowledge of seismic behavior of the ordinary R/C elements should be used. The problems to concentrate on are those that are peculiar to prestressing (i.e. problems of anchorage, bond, transfer, grouting, type of steel and level of prestressing); and to the precasting technique (like the problems of joint).

8. SUMMARY, CONCLUSIONS, AND RECOMMENDATIONS FOR FUTURE RESEARCH AND DEVELOPMENTS

8.1 Summary

Significant advances have been made in the last ten years in understanding seismic behavior of structural concrete linear elements and their connections. This improved understanding has had some impact in earthquake resistant design of R/C structures where these elements are used. However, much of present knowledge has not yet been practically applied. There are several problems in predicting seismic behavior of these linear elements and their connections. Some of these problems are of a general nature and apply to all types of elements, regardless of the material used (e.g. problems in predicting demand due to uncertainties about the ground motion and the overall response of the structure). There are other problems, inherent to the type of member and associated with the peculiar sensitivity of reinforced concrete construction to all those aspects which affect structural behavior - design, construction, maintenance, modification, and repair - which should be considered in order to obtain efficient seismic resistant construction.

Problems of a general nature have been discussed in section two. The seismic behavior of any element of a structure depends upon the interaction of the ground motion and the structure; there are many uncertainties in predicting both ground motion and structural response. All these uncertainties must be considered in order to judge the reliability of experimental results and to assess the implications of these results for design and construction of seismic resistant structures. To characterize these uncertainties properly, data from field and laboratory studies must be collected and statistically reviewed. Then studies may be carried out on the probability of failure of R/C elements.

Section two emphasizes the importance of loading history in the behavior of elements. The importance of properly selecting a structural layout and choosing the material to be used is also discussed.

The requirements for suitable seismic resistant structural materials are discussed. The relatively low value of strength per unit weight of normal weight concrete suggests the desirability of using lightweight concrete. The use of precast, partially prestressed lightweight aggregate concrete elements has tremendous potential in seismic resistant construction. However, the technology of lightweight aggregate; the problems of determining the optimum degree of prestressing; and the problems of connections of prefabricated elements, have not yet been resolved. Thus the most suitable R/C material for earthquake resistant design is still cast-in-place, ordinarily reinforced, normal weight concrete.

Section two also discusses the importance of studying the seismic behavior of basic structural components and their subassemblages, rather than the response of a whole structure.

A review of the inherent problems of linear reinforced concrete members and their connections shows that no general theory has been formulated to accurately predict the real seismic behavior (stiffness, strength, deformation, and energy dissipation capacities and their variation with load) of such structural components. It is doubtful that such a theory will ever be developed. However, there have been significant accomplishments in the understanding of such behavior, particularly of R/C elements that are used in plane moment-resisting frames subjected to unidirectional (1D) loading conditions in the plane. For these elements not only have the problems been determined, but the different sources of the problems

have also been identified. The author considers these advances of paramount importance and would like to emphasize the need to present these advances to the profession. The author considers this to be more important than developing simple empirical rules for the design of standard elements. If the designer knows what the problems and their sources are, he has two possibilities for coping with them. First, he can try to avoid them. Since he knows the sources of the problems, if he cannot avoid them, he can try to minimize them by proper design, particularly proportioning and detailing. Two typical examples follow:

Most failures of R/C linear elements are caused by the development of high shear in flexural critical regions. The designer can avoid such problems by proper selection of structural form, selecting relatively slender members and/or using a low percentage of steel reinforcement of low yielding strength and strain hardening characteristics. Since such failures are due to sliding shear, designers can avoid or sufficiently delay the failure of such members by proper use and detailing of special web reinforcement in the flexural critical regions.

Another problem that has been observed in seismic behavior is the degradation in stiffness and strength of beam-column subassemblages with repeated cycles of deformation reversals. This problem occurs at the beam-column joints; its sources have been identified as high shear and/or high bond stress through the joint. The designer can avoid this problem by selecting wider columns, and beams with a low percentage of steel with low yielding strength and strain hardening characteristics. Or he can avoid the formation of beam plastic regions at the faces of the columns. If this cannot be done, proper detailing of the reinforcement of the beam, column, and joint can minimize the detrimental consequences of stiffness and strength degradation.

Following, with the presentation of the conclusions, there is a summary of advances in the design and understanding of seismic behavior of normal weight R/C elements and their cast-in-place subassemblages under 1D loading conditions. There has been very little research for 2D or 3D loading. However, some parameters influencing the seismic behavior of frame subassemblages under two dimensional-lateral motions have been identified.

There have been some significant advances in understanding behavior of lightweight concrete. Some of the peculiarities of this type of concrete have been identified by comparing its behavior with the behavior of similar normal weight concrete. These peculiarities include: a lower gain in strength and ductility with confinement (particularly with high strength [e.g. greater than 4,000 psi]); lower bond; and lower shear transfer. More comprehensive studies are needed of the mechanical characteristics of this type of concrete and its interaction with reinforcing steel under seismic conditions.

The amount of research in the area of prestressed and precast linear concrete elements has been small. However, there have been some advances in the proper use of prestressing, particularly for improving behavior of beam-column joints and columns in tall buildings. The main problem for precast construction is connection. Although many types of connections have been suggested, and some used, there is no available information about their behavior under seismic loading.

8.2 Conclusions

The following conclusions emphasize findings which have helped to advance the design and construction of normal weight R/C elements and their cast-in-place subassemblages subjected to 1D loading conditions. General observations

applying to all members are presented first. Then observations for beams, columns and their connections are presented separately.

Reliable methods are lacking to predict demands, particularly deformation and energy dissipation demands, that can be expected during a structure's response to extreme earthquake shaking. Therefore, it is highly desirable to design R/C elements and their subassemblages so that they will be capable of dissipating the largest possible amount of energy through stable hysteretic behavior. Special attention should be paid to proportioning and detailing. The following recommendations are designed to achieve such stable, tough behavior.

8.2.1 Beams. Most of the following observations apply to the design of the potential beam critical regions.

(1) It is essential to provide sufficient shear capacity in potential critical (plastic hinge) regions to develop the required flexural deformation and energy dissipation capacities.

(2) Lower tension steel contents, ρ , are recommended than those presently allowed by R/C codes.

(3) It is recommended that beams be designed so that, at their connection with columns, they have a larger positive moment capacity than presently required by seismic codes ($\rho'/\rho \geq 0.75$ has been recommended).

(4) The location of splicing of main reinforcing bars should be carefully established. As much as economically feasible, curtailing of the main bars should be avoided.

(5) The effectiveness of different arrangements of transverse steel in confining concrete has been studied and constitutive laws for such confined concrete have been formulated.

(6) Present seismic code requirements for beam confinement are not adequate when large ductility is demanded.

(7) To prevent premature buckling of main reinforcing bars, each of these bars should be supported laterally by a corner of a tie and tie spacing should not exceed six bar diameters.

(8) The use of beams where the nominal unit shear stress, v_{\max} , can exceed $6\sqrt{f'_c}$ (psi) ($0.5\sqrt{f'_c}$ (MPa)) should be avoided.

(9) Present code requirements result in satisfactory hysteretic behavior when v_{\max} is $\leq 3\sqrt{f'_c}$ (psi) ($0.25\sqrt{f'_c}$ (MPa)).

(10) When v_{\max} is in the range of $3\sqrt{f'_c}$ (psi) to $6\sqrt{f'_c}$ (psi) ($0.25\sqrt{f'_c}$ (MPa) to $0.5\sqrt{f'_c}$ (MPa)), it is necessary to use special web reinforcement. Although the use of intermediate longitudinal bars improves hysteretic behavior, the addition of diagonal reinforcement seems to be more effective in controlling sliding shear at critical regions.

(11) Conventional seismic resistant design is inadequate for coupling beams, of coupled shear wall systems, which have V_{ud}/M_u ratios of one or less. The energy dissipation capacity (ductility and useful stable strength) can be improved by placing the main reinforcement diagonally in the beams.

8.2.2 Columns. These elements are still the most susceptible to failure in destructive earthquakes, particularly when subjected to high axial and shear forces. This is because of the sensitivity of shear stress to variations in the values of many of the factors affecting such column stress.

(1) Short columns designed and constructed according to present U.S. seismic codes can dissipate moderate amounts of energy through inelastic deformations. This can be adequate for ductile moment-resisting frames which are properly designed, constructed, and maintained and in which the short columns are not subjected to significant fluctuations of axial force.

(2) In the case of large flexural ductility demands, the contribution of concrete to shear resistance should be ignored.

(3) Circular spiral is the most effective transverse reinforcement to confine concrete and prevent the main reinforcing bars from buckling.

(4) New types of column reinforcement have been developed in Japan. A combination of spiral and square hoops resulted in excellent hysteretic behavior.

(5) Because joint core behavior can lead to some damage of the concrete cover of the column, the column strength computation should be based on the strength of the core area only.

8.2.3 Beam-Column Joints. Design criteria have been formulated for this type of joint. The criteria for the strength of the joint is that the beam-column joint should be the strongest and stiffest component of a basic moment-resisting frame subassembly. While this usually has been so in the past, it might not be so in future structures, because while more stringent requirements for seismic design of beams and columns have recently been included in codes, no changes have been introduced for the design of joints. Research results have indicated that:

(1) The effectiveness of concrete to resist shear should only be considered when there is a compressive load on the column which exceeds $0.1f'_c A_g$.

(2) Vertical shear reinforcement should be provided to help transfer vertical shear force to complete the truss mechanism at the joint core. Vertical column bars should be used around the perimeter of the column section with spacing not exceeding six in. (150 mm).

(3) For exterior beam-column joints, if plastic hinging occurs in the beam at the column face it is recommended that the diameter of the longitudinal column bars should not exceed 1/25th or 1/20th of the beam depth (for 55 and 40 grade steel, respectively).

(4) For interior beam column joints, if plastic hinging occurs in the beams at the column face it is recommended that the maximum diameter of the longitudinal beam reinforcing bars should not exceed 1/35th or 1/25th of the column depth (for 55 and 40 grade steel, respectively). The diameter of longitudinal column bars are limited as for exterior joints.

(5) If plastic hinging occurs in the beam at the column face, in determining the anchorage length of beam steel it is necessary to distinguish between the effectiveness of the bond offered by unconfined concrete in the column cover (which is small and should be neglected) and that offered by the confined concrete core. In exterior joints, the anchorage should be considered to begin within the joint core at a distance of either one-half the column

depth or ten bar diameters, whichever is closer to the column face where the steel enters.

(6) Performance of exterior joints can be improved by using a beam stub at the far column face where the longitudinal beam bars can be anchored.

(7) Significant bond deterioration occurs at the joint core from load reversals cyclically applied to the beam bars. This results in beam fixed-end rotations, particularly when the stress applied to the beam bars entering the columns equals or exceeds yield.

(8) To avoid detrimental beam fixed-end rotations, beam hinges adjacent to column faces should be eliminated. Practical techniques to accomplish this have been suggested, tested, and proven to be satisfactory.

8.2.4 2D and 3D Loadings. The following observations are of a tentative nature, because of insufficient data.

(1) 2D column displacement ductility demands about twice as large as 1D ductilities are typical at a 1D displacement ductility of about five or more.

(2) To avoid difficulties under 2D it is recommended that frames be designed so that column displacement ductility demands under 1D are restricted to two.

(3) While compressive axial loads have little influence on column behavior under 2D loading, tensile axial loads substantially reduce the stiffness and shear capacity at low loads.

(4) Theoretically, for a symmetrical two-way frame, joint design for biaxial shear leads to approximately twice the shear required for uniaxial shear design. Because this can create serious practical problems, it is suggested that beam hinges adjacent to column face be eliminated.

8.2.5 Use of Lightweight Aggregate Concrete. Because of the relatively meager data available, the following observations are of a preliminary nature:

(1) The effectiveness of the confinement, bond and shear transfer of lightweight aggregate concrete is inferior to that of normal weight aggregate concrete of similar strength. The higher the strength of the concrete the larger the difference in confinement effectiveness. Furthermore, lightweight aggregate concrete has higher creep. Therefore caution should be used in applying equations or seismic code provisions derived for normal weight aggregate to lightweight aggregate concrete, particularly in designing columns.

(2) Under cyclic loading, the energy dissipated by beam-column subassemblages cast of lightweight aggregate concrete is significantly smaller than that of similar normal weight concrete subassemblages.

(3) The compressive strength of lightweight aggregate concrete used in seismic resistance construction should be limited according to the mechanical characteristics of the aggregate.

8.2.6 Use of Prestressed and Precast Techniques. In addition to the problems common to any kind of reinforced concrete elements, the main findings of the reviewed research are:

(1) Prestressed beams show marked elastic recoveries even after considerable inelastic deformations, leading to pinching of the hysteretic loops.

(2) Energy dissipation of prestressed concrete elements can be increased, and degradation of stiffness decreased, by the proper addition of bonded compression and transverse (confinement) reinforcements.

(3) Although high seismic loading rates of prestressed elements can result in strength increases of four to seven percent, and ductility increases of 10 to 15 percent, it is recommended that design computations can be based on static loading strengths only.

(4) The use of a reasonable level of prestressing through a central tendon improves hysteretic behavior of joint.

(5) The use of prestressing can improve behavior of ordinarily reinforced concrete exterior columns in tall slender buildings by decreasing the possibility of cracking due to tensile forces originated by overturning moments.

(6) Use of prestressing can improve the behavior of connections between linear elements.

(7) The use of prestressed and precast lightweight concrete structural elements has great potential for seismic resistant construction.

8.3 Recommendations for Future Research and Developments.

Among the different recommendations formulated in this report the following deserve special mention:

(1) Perform integrated analytical and experimental research on the three dimensional behavior of actual structures under realistic seismic loading conditions to determine the demands on different structural components. In order to carry out more realistic experiments than has been done up to date it is important to determine the expected loading or deformation histories that the structural elements will undergo. Seismic performance of R/C structures is very sensitive, not only to how the structures have been designed and detailed, but also to how they are constructed, and to the modifications, maintenance, and repair which they can undergo before an earthquake strikes. All these aspects must be considered in establishing design criteria.

(2) Improve quality control of the R/C materials. Statistical data regarding mechanical characteristics of the material from existing structures should be collected and studied.

(3) Perform experiments to improve prediction of the interface shear transfer in plastic hinge regions of beams and columns subjected to generalized loadings.

(4) Perform experiments under seismic loading conditions, on the contribution of the floor slab to: development of beam flexural capacity; behavior of the beam-column joint; and overall strength, stiffness, deformation, and energy dissipation capacity of basic frame subassemblages.

(5) Perform experiments to study the behavior of columns and beam-column joints subjected to two and three-dimensional loadings. Emphasis should be

placed on the effects of high shears and the fluctuation from high compressive to high tension axial forces.

(6) Conduct statistical studies of the variation of v_{\max}^R / v_u^C in elements of existing buildings.

(7) Perform experimental studies of behavior of lapped and mechanical splices under high intensity load reversals and at different loading (strain) rates.

(8) Perform experiments to study behavior of construction joints in beams and columns.

(9) Perform experimental studies to establish reliable bond-slippage constitutive law for the beam's reinforcing bars along the confined concrete of beam-column joints.

(10) Conduct analytical studies of how the fixed-end rotations at the beam ends of column faces affects seismic response of framed structures.

(11) Conduct integrated experimental and analytical studies on the seismic behavior of reinforced lightweight aggregate concrete elements, with emphasis on: the effectiveness of confinement, bond, and shear transfer of such concrete; the higher rate of creep for lightweight than for similar normal weight; and how that higher creep can effect the seismic performance of framed structures.

(12) Conduct coordinated analytical and experimental studies to define: the degree of stiffness; damping; abruptness of failure; and hysteretic behavior of prestressed concrete subassemblages. These subassemblages should contain combinations of prestressed tendons and deformed bar reinforcements similar to those likely to be found in practice.

(13) Make generic studies of hysteretic behavior of different types of connections between precast elements. These studies should cover non-tensioned and post-tensioned connections subjected to loading intensities and histories similar to those which would exist during extreme earthquakes. These studies should examine precast elements of various types (particularly lightweight prestressed) and various cross sections.

(14) Conduct research programs which examine the applicability of reduced ductility and strength requirements for areas other than those of highest seismicity.

It is hoped that this report can serve as a basis for spirited discussions at the Symposium, and that these discussions will contribute toward the solution of the many problems and questions that have been raised here. Because of the complex nature of these problems, international collaboration is needed between practitioners, educators, researchers, and representatives from industry and government agencies in the field of earthquake resistant construction.

ACKNOWLEDGEMENTS

Appreciation is expressed to the National Science Foundation, whose financial support through Grant Nos. ENV76-01419 and ENV76-01923, made the preparation of this report possible. Stimulating discussions in this area with Professors Bresler, Mahin, and Popov are gratefully acknowledged. Thanks also are due to J. Axley, Research Engineer, for his constructive criticism of the manuscript. The author would also like to acknowledge the editorial assistance of M.C. Randall, and the assistance of D. Ullman and F. Jackson.

References

1. Sharpe, R.L., "Evolution of Codes and Standards for Earthquake-Resistant Concrete Building Construction," Proceedings, Workshop on Earthquake-Resistant Reinforced Concrete Building Construction, University of California, Berkeley, July 11-15, 1977, Vol. II, pp. 371-407.
2. International Association for Earthquake Engineering, Proceedings, First World Conference on Earthquake Engineering, Berkeley, California, 1956.
3. "Recommended Lateral Force Requirements," Seismology Committee, Structural Engineers Association of California, San Francisco, California, 1959.
4. Blume, J.A., Newmark, N.M., and Corning, L.H., "Design of Multistory Reinforced Concrete Buildings for Earthquake Motions," Portland Cement Association, Chicago, Illinois, 1961.
5. National Academy of Sciences, "The Great Alaska Earthquake of 1964," Washington D.C., 1973.
6. U.S. Department of Commerce, "San Fernando, California, Earthquake of February 9, 1971," Washington, D.C., 1973.
7. International Association for Earthquake Engineering, Proceedings, Second World Conference on Earthquake Engineering, Tokyo Japan, 1960, 3 vols., 2229 pp.
8. International Association for Earthquake Engineering, Proceedings, Third World Conference on Earthquake Engineering, Auckland, New Zealand, 1965, 3 vols., 2482 pp.
9. International Association for Earthquake Engineering, Proceedings, Fourth World Conference on Earthquake Engineering, Santiago, Chile, 1969, 4 vols., 2462 pp.
10. International Association for Earthquake Engineering, Proceedings, Fifth World Conference on Earthquake Engineering, Rome, Italy, 1973, 2 vols. 3013 pp.
11. International Association for Earthquake Engineering, Proceedings, Sixth World Conference on Earthquake Engineering, New Dehli, India, 1977, 3 vols. 3389 pp.
12. Building Code for the Federal District, Safety and Serviceability Requirements for Structures, Mexico, 1976. (In Spanish).
13. Rosenblueth, E., "Seismic Design Requirements in a Mexican 1976 Code," Proceedings, Workshop on Earthquake-Resistant Reinforced Concrete Building Construction, University of California, Berkeley, July, 11-15, 1977, Vol. II, pp. 216-223.

14. NZS 4203: 1976, New Zealand Standard, Code of Practice for General Structural Design and Design Loadings for Buildings, Standard Association of New Zealand, 80 pp.
15. "Tentative Provisions for the Development of Seismic Regulations for Buildings," Prepared by Applied Technology Council, National Bureau of Standards, Special Publication 510, Washington, June, 1978.
16. Bertero, V.V., "Experimental Studies Concerning Reinforced Concrete, Prestressed and Partially Prestressed Concrete Structures and their Elements," Introductory Report of the Symposium on Ultimate Deformability of Structures Acted on by Well Defined Repeated Loads," International Association for Bridge and Structural Engineering, Lisboa, 1973.
17. Bertero, V.V., Organizer, Proceedings, Workshop on Earthquake Resistant Reinforced Concrete Building Construction, University of California, Berkeley, July 11-15, 1977, 3 vols., 1941 pp.
18. Bresler, B., "Behavior of Structural Elements, a Review," Building Practices for Disaster Mitigation, National Bureau of Standards Building Science Series 46, Washington, D.C., 1973.
19. Bertero, V.V. and Bresler, B., "Failure Criteria (Limit States)," Panel discussion paper, 6WCEE, New Dehli, India, January 1977; also, Earthquake Engineering Research Center Report No. UCB/EERC-77/06, University of California, Berkeley, 1977.
20. Bertero, V.V., "Seismic Performance of Reinforced Concrete Structures," Argentina Academy of Science, November, 1978.
21. Bertero, V.V., "State-of-the-Art in Establishing Design Earthquakes," Proceedings, Workshop on Earthquake-Resistant Reinforced Concrete Building Construction, University of California, Berkeley, July 11-15, 1977, Vol. II, pp. 315-343.
22. Bertero, V.V., "Strength and Deformation Capacities of Buildings Under Extreme Environments," Structural Engineering and Structural Mechanics, Proceedings of the Popov Symposium, Prencice Hall (In Press).
23. Bresler, B., and Bertero, V.V., "Olive View Medical Materials Studies, Phase I," Report No. EERC 73-19, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, 1973.
24. Kubota, T., and Sozen, M.A., "A Study of Methods Used in Japan and the U.S.A. for Design of Web Reinforcement in Reinforced Concrete," A report to the National Science Foundation, Civil Engineering Studies Structural Research Series No. 452, University of Illinois, Urbana, Illinois, August, 1978.
25. Park, R., "Accomplishments and Research and Development Needs in New Zealand," Proceedings, Workshop on Earthquake-Resistant Reinforced Concrete Building Construction, University of California, July 11-15, 1977, Vol. II, pp. 255-295.

26. Bertero, V.V., "Identification of Research Needs for Improving Aseismic Design of Building Structures," Report No. EERC 75-27, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, 1975.

27. Higashi, Y., Ohkubo, M., and Ohtsuka, M., "Influence of Loading Excursions on Restoring Force Characteristics and Failure Modes of Reinforced Concrete Columns," Proceedings, Sixth World Conference on Earthquake Engineering, New Delhi, January, 1977, Vol. III, pp. 3127-3132.
28. Jirsa, J.O., "Behavior of Elements and Subassemblages--R.C. Frames," Proceedings, Workshop on Earthquake-Resistant Reinforced Concrete Building Construction, University of California, Berkeley, July 11-15, 1977, Vol. III, pp. 1196-1214.
29. Bertero, V.V., Popov, E.P., Forzani, B., "Seismic Behavior of Lightweight Concrete Beam-Column Subassemblages," Submitted for Publication to ACI Journal, 1979.
30. Dowrick, D.J., Earthquake Resistant Design, John Willey and Sons, 1977.
31. Esteva, L., "Earthquake Resistant Reinforced Concrete Buildings in Mexico: Research Needs and Practical Problems," Proceedings, Workshop on Earthquake-Resistant Reinforced Concrete Building Construction, University of California, Berkeley, July 11-15, 1977, Vol. II, pp. 234-253.
32. Borges, J.F., "A European View on Earthquake-Resistant Reinforced Concrete Building Construction," Proceedings, Workshop on Earthquake-Resistant Reinforced Concrete Building Construction, University of California, Berkeley, July 11-15, 1977, Vol. II, pp. 168-184.
33. Zagajeski, S.W. and Bertero, V.V., "Computer-Aided Optimum Seismic Design of Ductile Reinforced Concrete Moment-Resisting Frames," Report No. UCB/EERC-77/16, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, December, 1977.
34. Mahin, S.A., Bertero, V.V., "An Evaluation of Some Methods for Predicting Seismic Behavior of Reinforced Concrete Buildings," Report No. EERC 75-5, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, February, 1977; also, Mahin, S.A. and Bertero, V.V., "Nonlinear Seismic Response of a Coupled Wall System," Journal of the Structural Div., ASCE, Vol. 102, ST9, pp. 1759-1780, September, 1976.
35. "ACI Standard Building Code Requirements for Reinforced Concrete," (ACI 318-71) and (ACI 318-77), American Concrete Institute, Detroit, Michigan.
36. International Conference of Building Officials, "Uniform Building Code," 1973 and 1976 Editions, Washington, D.C., and Whittier, California.
37. Jirsa, J.O., "Factors Influencing the Hinging Behavior of Reinforced Concrete Members under Cyclic Overloads," Proceedings, Fifth World Conference on Earthquake Engineering, Rome, Italy, 1973, Vol. I, pp. 1198-1204.

38. Bertero, V.V. and Popov, E.P., "Hysteretic Behavior of Reinforced Concrete Flexural Members with Special Web Reinforcement," Report No. EERC 74-9, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, 1974.
39. Bertero, V.V. and Popov, E.P., "Hysteretic Behavior of Ductile Moment-Resisting Reinforced Concrete Frame Components," Report No. EERC 75-16, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, 1975.
40. Ma, S.Y., Bertero, V.V., and Popov, E.P., "Experimental and Analytical Studies on the Hysteretic Behavior of Reinforced Concrete Rectangular and T-Beams," Report No. EERC 76-2, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, 1976.
41. Bertero, V.V. and Popov, E.P., "Seismic Behavior of Ductile Moment-Resisting Reinforced Concrete Frames," Reinforced Concrete Structures in Seismic Zones, Publication SP-53, American Concrete Institute, Detroit, 1977.
42. Popov, E.P., Bertero, V.V., Galunic, B., and Lantaff, G., "On Seismic Design of R/C Interior Joints of Frames," Proceedings, Sixth World Conference on Earthquake Engineering, New Dehli, India, January, 1977, Vol. II, pp. 1933-1938.
43. Scribner, C.F., and Wight, J.K., "Delaying Shear Strength Decay in Reinforced Concrete Flexural Members under Large Load Reversals," Report UMEE 78R2, Department of Civil Engineering, The University of Michigan, May, 1978.
44. Park, R., "Constitutive Relations of Steel: Effects on Hysteretic Behavior of Structural Concrete Members and on Strength Considerations in Seismic Design," Proceedings, Workshop on Earthquake-Resistant Reinforced Concrete Building Construction, University of Berkeley, July 11-15, 1977, Vol. II, pp. 683-695.
45. Menegotto, M., and Pinto, P.E., "Methods of Analysis for Cyclically Loaded R/C Plane Frames Including Changes in Geometry and Non-Elastic Behavior of Elements under Combined Normal Force and Bending," Preliminary Report, IASBE Symposium, Vol. 13, Lisboa, Portugal, 1973, pp. 15-22.
46. Mahin, S., Bertero, V.V., Rea, D., and M. Atalay, "Rate of Loading Effects on Uncracked and Repaired Reinforced Concrete Members," Report No. EERC 72-9, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, 1972.
47. Paulay, T., "Capacity Design of Reinforced Concrete Ductile Frame," Proceedings, Workshop on Earthquake-Resistant Reinforced Concrete Building Construction, University of California, Berkeley, July 11-15, 1977, Vol. III, pp. 1043-1075.
48. Smith, I.C., and Sidwell, G.K., "Beam Flexure and Hinge Zone Detailing in Reinforced Concrete Ductile Frames Requiring Beam Sway Mechanisms," June, 1977, Vol. 10, No. 2, pp. 72-79.

49. Park, R. and Paulay, T., Reinforced Concrete Structures, John Wiley and Sons, 1975.
50. Anderson, J.C., "Double Reinforcement for Seismic Resistance," Presented at ACI Convention, Houston, Texas, November 1978. To be Published in a special ACI Publication.
51. Strand, D.R., "Design of Reinforced Concrete Moment-Resisting Frames," Proceedings, Workshop on Earthquake-Resistant Reinforced Concrete Building Construction, University of California, Berkeley, July 11-15, 1977, Vol. III, pp. 1023-1041.
52. Bertero, V.V. and Zagajeski, S.W., "Computer-Aided Seismic Resistant Design of R/C Multistory Frames," Proceedings, Sixth European Conference on Earthquake Engineering Research Center, University of California, Dubrovnik, Yugoslavia, September, 1978, Vol. II, pp. 289-296.
53. Zagajeski, S.W., and Bertero, V.V., "Computer-Aided Optimum Design of Ductile R/C Moment-Resisting Frames," Proceedings, Workshop on Earthquake Resistant Reinforced Concrete Building Construction, University of California, Berkeley, July 11-15, 1977, Vol. III, pp. 1140-1174.
54. Zagajeski, S.W., and Bertero, V.V., "Application of Optimization Technique in Seismic-Resistant Design of R/C Multistory Frames," Preprint 3142, "Application of Optimization in Structural Design," ASCE Spring Convention at Pittsburgh, Pa., April, 1978, pp. 134-157.
55. Bertero, V.V. and Vallenias, J., "Confined Concrete: Research and Development Needs," Proceedings, Workshop on Earthquake-Resistant Reinforced Concrete Building Construction, University of California, Berkeley, July 11-15, 1977, Vol. II, pp. 594-610.
56. Kaar, P.H., et al., "Confined Concrete in Compression Zones of Structural Wall Designed to Resist Lateral Loads Due to Earthquakes," Proceedings, International Symposium on Earthquake Structural Engineering, St. Louis, August, 1976, Vol. II, pp. 1207-1218.
57. Vallenias, J., Bertero, V.V., and E.P. Popov, "Concrete Confined by Rectangular Hoops and Subjected to Axial Loads," Report No. UCB/EERC-77/13, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, 1977.
58. Sheik, Sharmin A., "Effectiveness of Rectangular Ties as Confinement Steel in Reinforced Concrete Columns," Ph.D. Thesis, Department of Civil Engineering, University of Toronto, June, 1978, 256 pp.
59. Bertero, V.V., and Collins, R.G., "Investigation of the Failures of the Olive View Stair Towers during the San Fernando Earthquake and their Implications on Seismic Design," Report No. EERC 73-26, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, 1973.
60. Gosain, N.K., Brown, R.H., and Jirsa, J.O., "Shear Requirements for Load Reversals on R.C. Members," Journal of the Structural Division, ASCE July, 1977, pp. 1461-1476.

61. Higashi, Y., and Hirosawa, M., "Experimental Research on Ductility of Reinforced Concrete Short Columns under Cyclic Lateral Load," Preliminary Report for International Association of Bridge and Structural Engineers, Symposium on Design and Safety of Reinforced Concrete Compression Members, Quebec, 1974.
62. Popov, E.P., Bertero, V.V., and Krawinkler, H., "Cyclic Behavior of Three Reinforced Concrete Flexural Members with High Shear," Report No. EERC 72-5, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, 1972.
63. Orudjev, F.M., et al., "The Influence of Non-Elastic Properties of the R/C on the Performance of the Frame Constructions under Seismic Loads," Proceedings, Sixth European Conference on Earthquake Engineering, Dubrovnik, Yugoslavia, September, 1978, Vol. II, pp. 305-310.
64. Brown, R.H., Jirsa, J.O., "Reinforced Concrete Beams under Load Reversals," Structural Research at Rice, Report No. 7, Rice University, Houston, Texas, October, 1970; also ACI Journal, Proceedings, Vol. 68, No. 5, May, 1971, pp. 380-390.
65. Krawinkler, H., and Popov, E.P., "Hysteretic Behavior of Reinforced Concrete Rectangular and T-Beams," Proceedings, Fifth World Conference on Earthquake Engineering, Paper 28, June, 1973, Rome, Italy, Vol. I, pp. 249-258.
66. Kano, Y., et al, "Shear Strength of Reinforced Concrete Beams Under Many Cyclic Alternate Loading," Research Report of A.I.J., August, 1969.
67. Paulay, T., "Simulated Seismic Loading of Spandrel Beams," Journal of the Structural Division, ASCE, Vol. 97, No. ST9, Proceedings Paper 3865, September, 1971, pp. 2407-2419.
68. Bertero, V.V., Popov, E.P., "Hysteretic Behavior of R/C Flexural Members with Special Web Reinforcement," Proceedings, The U.S. National Conference on Earthquake Engineering, June, 1975, Ann Arbor, Michigan, pp. 316-326.
69. Ma, I., Popov, E.P., and Bertero, V.V., "Cyclic Shear Behavior of R/C Plastic Hinges," Proceedings, ASCE/EMD Specialty Conference on Dynamic Response of Structures, University of California, Los Angeles, Marcy, 1976, pp. 352-362.
70. Wakabayashi, M., "Special Problems," IABSE Symposium on the Design and Safety of Compression Members, Quebec, 1974.
71. Anicic, D., and Zamolo, M., "Stiffness Deterioration of Cyclic Loaded R/C Structural Elements," Proceedings, Fifth European Conference on Earthquake Engineering, Istanbul, Turkey, September, 1975, Vol. II, Paper No. 113.
72. Gergeley, P., "Experimental and Analytical Investigations of Reinforced Concrete Frames Subjected to Earthquake Loading," Proceedings, Workshop on Earthquake-Resistant Reinforced Concrete Building Construction, University of California, Berkeley, July 11-15, 1977, Vol. III, pp. 1175-1195.

73. Fenwick, R.C. and Paulay, R., "Mechanisms of Shear Resistance of Concrete Beams," Journal of the Structural Division, ASCE, Vol. 94, ST10, Proc. Paper 6167, October, 1968, pp. 2325-2350.
74. Mattock, A.H., "The Shear Transfer Behavior of Cracked Monolithic Concrete Subject to Cyclically Reversing Shear," Structures and Mechanics Report SM74-4, University of Washington, Seattle, Washington, November, 1974.
75. Laible, J.P., White, R.N., and Gergeley, P., "An Experimental Investigation of Seismic Shear Transfer Across Cracks in Concrete Nuclear Containment Vessels," Reinforced Concrete Structures in Seismic Zones, Special Publication SP53, American Concrete Institute, 1977.
76. White, R.N., Bergeley, P., "Shear Transfer in Thick Walled Reinforced Concrete Structures under Seismic Loading, Report No. 78-2, Department of Structural Engineering, Cornell University, Ithaca, New York, May, 1978.
77. Jimenez-Perez, R., Gergeley, P., and White, R.N., "Shear Transfer Across Cracks in Reinforced Concrete," Report No. 78-4, Department of Structural Engineering, Cornell University, Ithaca, New York, August 1978,
78. Mattock, A.H., Li, W.K., and Wang, T.C., "Shear Transfer in Reinforced Concrete with Moment or Tension Acting Across the Shear Plane," PCI Journal, Vol. 20, No. 4, July/August, 1975, pp. 76-93.
79. Mattock, A.H., Li, W.K., and Wang, T.C., "Shear Transfer in Lightweight Reinforced Concrete," PCI Journal, Vol. 21, No. 1, Jan./Feb., 1976, pp. 20-39.
80. Paulay, T., and Binney, J.R., "Diagonally Reinforced Coupling Beams of Shear Walls," Shear in Reinforced Concrete, Special Publication SP42, Vol. II, American Concrete Institute, 1974.
81. Paulay, T., "Earthquake Resistant Structural Walls," Proceedings, Workshop on Earthquake-Resistant Reinforced Concrete Building Construction, University of California, Berkeley, July 11-15, 1977, Vol. III, pp. 1339-1365.
82. Paulay, T., "Coupling Beams of Reinforced Concrete Shear Walls," Proceedings, Workshop on Earthquake-Resistant Reinforced Concrete Building Construction, University of California, Berkeley, July 11-15, 1977, Vol. III, pp. 1452-1460.
83. Fiorato, A.E., Corley, W.G., "Laboratory Tests of Earthquake-Resistant Structural Wall Systems and Elements," Proceedings, Workshop on Earthquake-Resistant Reinforced Concrete Building Construction, University of California, Berkeley, July 11-15, 1977, Vol. III, pp. 1388-1429.
84. Ohmori, N., "The 18-Storeyed Shiinamachi Building, Cast-in-Field Reinforced Concrete Systems," Proceedings, Workshop on Earthquake-Reinforced Concrete Building Construction, University of California, Berkeley, July 11-15, 1977, Vol. II, pp.756-769.

85. Umemura H., Aoyama, H., and Noguchi, H., "Experimental Studies of Reinforced Concrete Members and Composite Steel and Reinforced Concrete Members," Faculty of Engineering, Department of Architecture, The University of Tokyo, Vol. 2 and 3, December, 1977.
86. Umemura, H., Et al., "Experimental Study on Reinforced Concrete Columns with Special Web Reinforcement," Proceedings, International Symposium on Earthquake Structural Engineering, University of Missouri - Rolla, August, 1976, Vol.1, pp. 527-540.
87. Küstü, Ö., and Bouwkamp, "Behavior of Reinforced Concrete Beam-Column Subassemblages under Cyclic Loads," Report No. EERC-73/8, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, 1978.
88. Zagajeski, S.W., and Bertero, V.V., "Hysteretic Behavior of Reinforced Concrete Columns Subjected to High Axial and Cyclic Shear Forces," Report No. UCB/EBRC-78/05, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, 1978.
89. Zagajeski, S.W., and Bertero, V.V., "Hysteretic Behavior of R/C Columns Subjected to High Axial Forces and Cyclic Shear Forces," Proceedings, Sixth European Conference on Earthquake Engineering, Dubrovnik, Yugoslavia, Spetember, 1978, Vol. 3, pp. 159-166.
90. Tanaka, Y., Kaneko, Y., Sakai, A., Takahashi, Y., Uno, H., and Segawa, Y., "The Shear Strength of Reinforced Fiber Concrete Short Columns," Proceedings, Sixth European Conference on Earthquake Engineering, Dubrovnik, Yugoslavia, September, 1978, Vol. 3, pp. 167-174.
91. Zamolo, A., Anicic, D., "Seismic Collapse of Reinforced Concrete Pendulum Columns," Proceedings, Sixth European Conference on Earthquake Engineering Dubrovnik, Yugoslavia, September, 1978, Vol. 3, pp. 191-198.
92. Cismigiu, A.I., and Dogaru, L.C., "A Tentative for Aseismic Design of Reinforced Concrete Columns," Sixth European Conference on Earthquake Engineering, Dubrovnik, Yugoslavia, September, 1978, Vol. 3, pp. 301-308.
93. Aoyama, H., "A Review of Recent Research in Japan as Related to the Earthquake Resistant Design of Reinforced Concrete Building Structures," Proceedings, Workshop on Earthquake-Resistant Reinforced Concrete Building Construction, University of California, Berkeley, July 11-15, 1977. Vol. II, pp. 185-215.
94. Muto, K., "Recent Reinforced Concrete Building Design Development in Japan," Muto Institute of Structural Mechanics, Inc., Report 73-1-1, July, 1976, Tokyo, Japan, 52 pp.
95. Atalay, B.M., and Penzien J., "The Seismic Behavior of Critical Regions of Reinforced Concrete Components as Influenced by Moment, Shear and Axial Force," Report No. EERC 75-19, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, 1978.

96. Atalay, B.M., "A Mathematical Model for the Seismic Behavior of Reinforced Concrete Critical Regions as Influenced by Moment and Shear," Proceedings, Sixth European Conference on Earthquake Engineering, Dubrovnik, Yugoslavia, September, 1978, Vol. 2, pp. 281-288.
97. Jirsa, J.O., Maruyama, K., and Ramirez, H., "Reinforced Concrete Columns under 3D Loading Histories," Paper Presented at the ACI Convention at Houston, November, 1978, (to be published).
98. Takizawa, H., and Aoyama, H., "Biaxial Effects in Modeling Earthquake Response of R/C Structures," Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 4, 1976, pp. 523-552.
99. Takizawa, H., "Biaxial and Gravity Effects in Modelling Strong-Motion Response of R/C Structures," Proceedings, Sixth World Conference on Earthquake Engineering, New Dehli, India, 1976, Vol. II, pp. 1022-1027.
100. Pecknold, D.A., and Suhwardy, M.I.H., "Effects of Two Dimensional Earthquake Motion on Response of R/C Columns," Proceedings, Workshop on Earthquake-Resistant Reinforced Concrete Building Construction, University of California, Berkeley, July 11-15, 1977, Vol. II, pp.950-959.
101. Takiguchi, K., and Kokusho, S., "Hysteretic Behavior of Reinforced Concrete Members Subjected to Biaxial Bending Moments," Proceedings, Sixth World Conference on Earthquake Engineering, New Dehli, India, January, 1977, Vol. 3, p. 3262.
102. Okada, T., Seki, M., and Asai, S., "Response of Reinforced Concrete Columns to Bi-Directional Horizontal Force and Constant Axial Force," Bulletin of Earthquake Research Center, University of Tokyo, No. 10, 1976, pp. 30-36.
103. Makwana, M.D., "Effectiveness of Stirrup Ties of Different Shapes in Laterally Loaded Reinforced Concrete Columns," Master of Engineering Report, University of Canterbury, New Zealand, 1977.
104. Maruyama, K., Ramirez, H., and Jirsa, J.O., "Behavior of R/C Columns under Biaxial Lateral Loading," Proceedings, Sixth European Conference on Earthquake Engineering, Dubrovnik, Yugoslavia, Vol. 3, pp. 135-142.
105. Otani, S., and Tang, C.S., "Behavior of Reinforced Concrete Columns under Biaxial Lateral Load Reversals," Publication 78-03, Department of Civil Engineering, University of Toronto, February, 1978, 1264 pp.
106. Kokusho, S., Hayashi, S., and Teramoto, E., "An Experimental Study on the Bending Behavior of Reinforced Concrete Members under Changing Axial Load;" Proceedings, A.I.J., October, 1975.
107. Kokusho, S., and Hayashi, S., "Study of the Behavior of Reinforced Concrete Members under Changing Axial Load," Proceedings, A.I.J., October, 1977.
108. Building Research Institute, "A List of Experimental Results on Deformation Ability of Reinforced Concrete Columns under Large Deflection (3)," Report No. 21, February, 1978, Ministry of Construction of Japan, Tokyo, Japan.

109. Popov, E.P., Bertero, V.V., and Viwathanatepa, S., "Analytic and Experimental Hysteretic Loops for R/C Subassemblages," Proceedings, Fifth European Conference on Earthquake Engineering, Istanbul, Turkey, September, 1975.
110. Uzmeri, S.M., "Strength and Ductility of Cast-in-Place Beam-Column Joints," Paper Published in Publication SP-53 of the ACI Detroit, Michigan, 1977, pp. 293-350.
111. Townsend, W.H., and Hanson, R., "Reinforced Concrete Connection Hysteresis Loops," Paper Published in Publication SP-53 of the ACI Detroit, Michigan, 1977, pp. 351-370.
112. Thompson, K.J., "Ductility of Concrete Frames under Seismic Loading," Ph.D. Thesis, University of Canterbury, New Zealand, 1975.
113. Blakeley, R.W.G., Megget, L.M., and Priestley, M.J.N., "Seismic Performance of Two Full-Size Reinforced Concrete Beam-Column Joint Units," Bulletin of New Zealand National Society for Earthquake Engineering, Vol. 8, No. 1, March, 1975.
114. Fenwick, R.C., and Irwin, H.M., "Reinforced Concrete Beam-Column Joints for Seismic Loading," Report No. 142, School of Engineering, University of Auckland, 1977.
115. Meinheit, D.F., and Jirsa, J.O., "The Shear Strength of Reinforced Concrete Beam-Column Joints," CESRL Report No. 77-1, University of Texas at Austin, January, 1977.
116. ACI-ASCE Committee 352, "Recommendations for Design of Beam-Column Joints in Monolithic Reinforced Concrete Structures," Journal of the American Concrete Institute, Proc. V 73, July, 1976.
117. Paulay, T., Park, R., and Priestley, M.J.N., "Reinforced Concrete Beam-Column Joints under Seismic Actions," ACI Journal, November, 1978, pp. 585-593.
118. Buchanan, B.W., and McKay, G., "Beam-Column Joints for Seismic Performance," Paper Presented at the 1978 Annual Convention of ACI, Toronto, Ontario, April, 1978.
119. Galunic, B., Bertero, V.V., and Popov, E.P., "An Approach for Improving Seismic-Resistant Behavior of Reinforced Concrete Interior Joints," Report No. UCB/EERC-77/30, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, 1977, 94pp.
120. Soleimani, D., "Reinforced Concrete Ductile Frames with Stiffness Degradation," Ph.D. Thesis, Division of Structural Engineering, University of California, Berkeley, California, December, 1978.
121. Beckingsale, C.W., "Post-Elastic Behavior of Reinforced Concrete Beam-Column Joints," Ph.D. Thesis, Department of Civil Engineering, University of Christchurch, 1978.

122. Briss, G.R., "The Elastic Behavior of Earthquake Resistant Reinforced Concrete Interior Beam-Column Joints," a report submitted in partial fulfillment of the requirements for the Degree of Master of Engineering at the University of Canterbury, Christchurch, New Zealand, 1978.
123. Townsend, W.H., "Shear Capacity of T-Beam-Column Connections," Presented at ACI Convention, Houston, Texas, November, 1978, To be published in a special ACI Publication.
124. Seckin, M., and Uzmeri, S.M., "Examination of Design Criteria for Beam-Column Joints," Proceedings, Sixth European conference on Earthquake Engineering, Dubrovnik, Yugoslavia, September, 1978, Vol. 3, pp. 183-190.
125. Blakeley, R.W.G., "Design of Beam-Column Joints," Bulletin of the New Zealand National Society for Earthquake Engineering, Vol. 10, No. 4, December, 1977, pp. 226-237.
126. Bull, I.N., "The Shear Strength of Relocated Plastic Hinges," Research Report 78/11, Department of Civil Engineering, University of Canterbury, New Zealand, February, 1978, 104 pp.
127. Paulay, T., "Shear Effects on Plastic Hinges of Earthquake-Resisting Reinforced Concrete Frames," Paper submitted to ASCE-ACI Committee 445, November, 1978, 14 pp.
128. Popov, E.P., "Mechanical Characteristics and Bond of Reinforcing Steel under Seismic Conditions," Proceedings, Workshop on Earthquake-Resistant Reinforced Concrete Building Construction, University of California, Berkeley, July 11-15, 1977, Vol. II, pp. 658-682.
129. Popov, E.P., Bertero, V.V., Viwathanatepa, S., "Bond Deterioration under Generalized Loading," Paper presented at ACI Annual Convention, San Diego, California, 1977.
130. Cobb, J.L., Jr., "The Influence of Shock Loading and Axial Compression Upon Bond Deterioration under Cyclic Loading," M. Eng. Thesis, Dept of Civil Engineering, University of California, Berkeley, June, 1977.
131. Bertero, V.V., Popov, E.P., and Viwathanatepa, S., "Bond of Reinforcing Steel: Experiments and a Mechanical Model" Proceedings, IASS Symposium on Nonlinear Behavior of Reinforced Concrete Spatial Structures, Darmstadt, Germany, July 3-7, 1978, Vol. 2, pp. 3-17.
132. Popov, E.P., Bertero, V.V., Cowell, A.D., Viwathanatepa, S., "Reinforcing Steel Bond under Monotonic and Cyclic Loadings," Paper presented at SEAOC Conferente, Lake Tahoe, September 29, 1978.
133. Viwathanatepa, S., "Bond Deterioration of Reinforcing Bars Embedded in Confined Concrete Blocks," Ph.D. Thesis Dept. of Civil Engineering, University of California, Berkeley, December, 1978; 454 pp.
134. Sekhniashvili, E.A., "On the Effective Use of Light Concrete and Reinforced Concrete in Construction in Seismic Regions," Proceedings, Sixth World Conference on Earthquake Engineering, New Dehli, January, 1977, Vol. II, pp. 2034-2040.

135. Paramzim, A.M., and Gorovits I.G., "Analysis of Effect of Lightweight Concrete Use in Seismic-Resistant Multistory Buildings," Proceedings, Sixth World Conference on Earthquake Engineering, New Dehli, January, 1977, Vol. II, pp. 2124-2125.
136. Uzmeri, S.M., Otani, S., and M.P. Collins, "An Overview of the State-of-the Art in Earthquake Resistant Concrete Building Construction," Proceedings, Workshop on Earthquake-Resistant Reinforced Concrete Building Construction, University of California, Berkeley, July 11-15, 1977.
137. Bresler, B., and Bertero, V.V., "Influence of High Strain Rate and Cyclic Loading Behavior of Unconfined and Confined Concrete in Compression," Proceedings, Second Canadian Conference on Earthquake Engineering, Hamilton, Ontario, Canada, June 5-6, 1975.
138. Manrique, M., and Bertero, V.V., "Mechanical Behavior of Lightweight Concrete Confined by Different Types of Lateral Reinforcements," Earthquake Engineering Research Center Report, University of California, Berkeley, (In Press).
139. Mattock, A.H., "Effect of Aggregate Type on Single Direction Shear Transfer Strength in Monolithic Concrete," Report No. SM-74-2, Dept. of Civil Engineering, University of Washington, Seattle, Washington, August, 1974.
140. Mihai, C. et al., "Behavior of Some Members and Joints Made Up of Resistive Lightweight Concrete Compared to Heavy Concrete Ones Under Static and Dynamic Loadings," Proceedings, Fifth European Conference on Earthquake Engineering, Vol. 2, Paper 111, 12pp.
141. Hisada, T., Ohmori, N., and Bessho, S., "Earthquake Design Consideration in R/C Columns," Journal of the International Association for Earthquake Engineering, Vol. 1, 79-91, 1972.
142. Hisada, T., Bessho, S., and Okamoto, K., "Consideration of Earthquake Design for Reinforced Concrete Columns of Tall Buildings," Proceedings, Sixth World Conference on Earthquake Engineering, New Dehli, India, January, 1977, Vol. II, pp. 1892-1897.
143. Poole, R.A., "Reinforced Concrete Ductile Frames: the Use of Diagonal Reinforcing to Solve the Joint Problem," Proceedings, Workshop on Earthquake Resistant Reinforced Concrete Building Construction, University of California, Berkeley, July 11-15, 1977, Vol. III, pp. 1076-1097.
144. Blakeley, R.W.G. and Park, R., "Seismic Resistance of Prestressed Concrete Beam-Column Assemblies," Journal of American Concrete Institute, Proc., Vol. 68, No.9, September, 1971.
145. Lin, T.Y., Kulka, F., and Tai, J., "Design of Earthquake-Resistant, Prestressed Concrete Structure," Proceedings, Workshop on Earthquake Resistant Reinforced Concrete Building Construction, University of California, Berkeley, July 11-15, 1977, Vol. III, pp. 1693-1721.
146. Park, R., "Design of Prestressed Concrete Structures," Proceedings, Workshop on Earthquake-Resistant Reinforced Concrete Building Construction, University of California, Berkeley, July 11-15, 1977, Vol. III, pp. 1722-1752.

147. Hawkins, N.M., "Analytical and Experimental Studies of Prestressed and Precast Concrete Elements," Proceedings, Workshop on Earthquake-Resistant Reinforced Concrete Building Construction, University of California, Berkeley, July 11-15, 1977, Vol. III, pp. 1871-1909.
148. Park, R., and Thompson, K.J., "Experimental Investigations of Subassemblages of Partially Prestressed and Prestressed Concrete Framed Structures," Proceedings, Workshop on Earthquake-Resistant Reinforced Concrete Building Construction, University of California, Berkeley, July, 11-15, 1977, Vol. III, pp. 1910-1941.
149. Hawkins, N.M., "State-of-the-Art Report on Seismic Resistance of Prestressed and Precast Concrete Structures," PCI Journal Vol. 22, No. 6, Nov.-Dec., 1977, pp. 80-110 and Vol. 23 No. 1, Jan.-Feb, 1978, pp. 40-58, and Comments in Vol. 23, No. 6, Nov.-Dec. 1978, pp. 83-97.
150. Federation Internationale de la Precontrainte (FIP), "Recommendations for the Design of Aseismic Prestressed Concrete Structures," FIP Commission on Seismic Structures, Cement and Concrete Association, Wexham Springs, England, November, 1977, 28 pp.
151. Seismic Committee of the New Zealand Prestressed Concrete Institute, "Recommendations for the Design and Detailing of Ductile Prestressed Concrete Frames for Seismic Loading," Bulletin of the New Zealand National Society for Earthquake Engineering, Vol. 9, No. 2, June, 1976, pp. 89-96.
152. Keong Yeoh Sik, "Prestressed Concrete Beam-Column Joints," Research Report 78/2, Department of Civil Engineering, University of Canterbury, Christchurch, New Zealand, February, 1978, 71 pp.
153. Ikeda, A., Yamada, T., Kawamura, S., Fujii, S., "State-of-the-Art of Precast Concrete Technique in Japan," Proceedings, Workshop on Earthquake-Resistant Reinforced Concrete Building Construction, University of California, Berkeley, July 11-15, 1977, Vol. II, pp. 89-96.
154. Blakeley, R.W.G., "Ductility of Prestressed Concrete Frames under Seismic Loading," Ph.D. Thesis, University of Canterbury, New Zealand, 1971.
155. "Architectural Precast Concrete," Prestressed Concrete Institute, Chicago, Illinois, 1973.
156. "Report of FIP Commission on Seismic Structures," Commission Reports, 7th Congress of Federation Internationale de la Precontrainte, New York, 1974, Vol. 1, pp. 63-74.

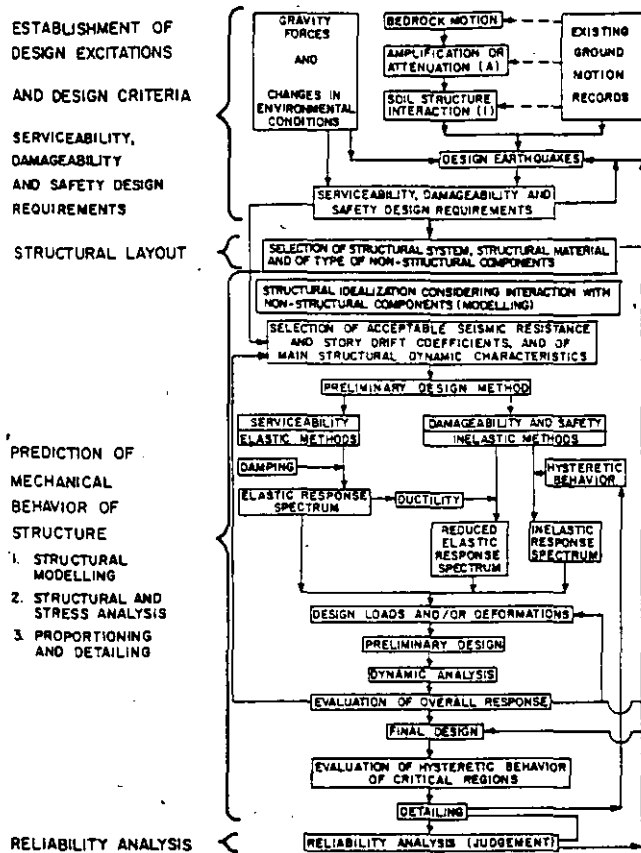
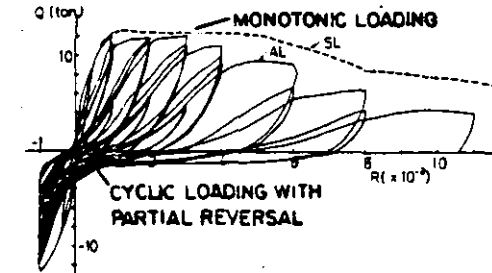
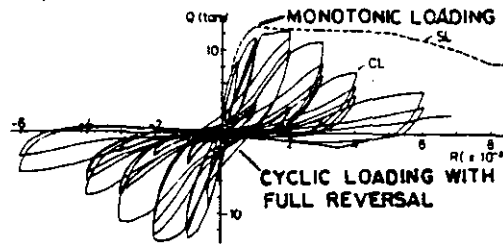


FIG.1 FLOW DIAGRAM OF GENERAL ASPECTS AND STEPS INVOLVED IN SEISMIC-RESISTANT DESIGN [21]



(a) Monotonic vs. Cyclic with Partial Reversal



(b) Monotonic vs. Cyclic with Full Reversal

FIG. 2 INFLUENCE OF LOADING HISTORY ON DEFORMATION BEHAVIOR OF COLUMNS [27]

FIG.3 INFLUENCE OF LOADING HISTORY ON LATERAL LOAD-DISPLACEMENT OF BEAM-COLUMN SUBASSEMBLAGE [29]

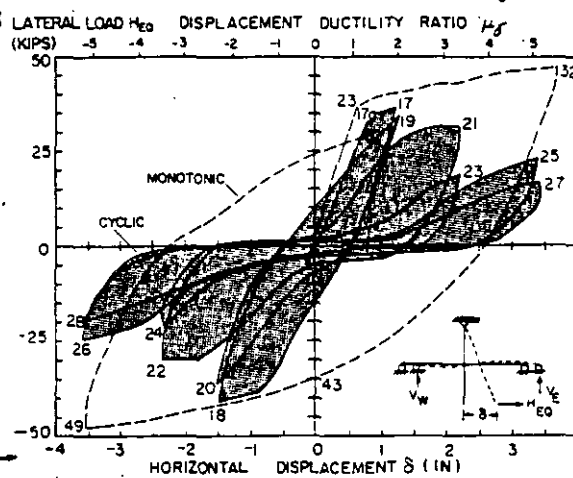
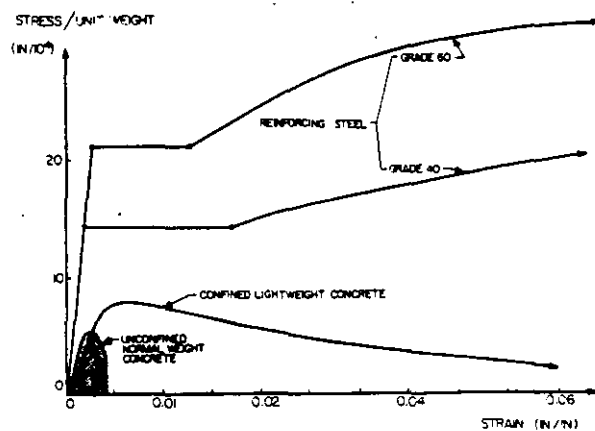


FIG.4 STRESS/UNIT WEIGHT STRAIN DIAGRAMS FOR DIFFERENT R/C STRUCTURAL MATERIALS [19]



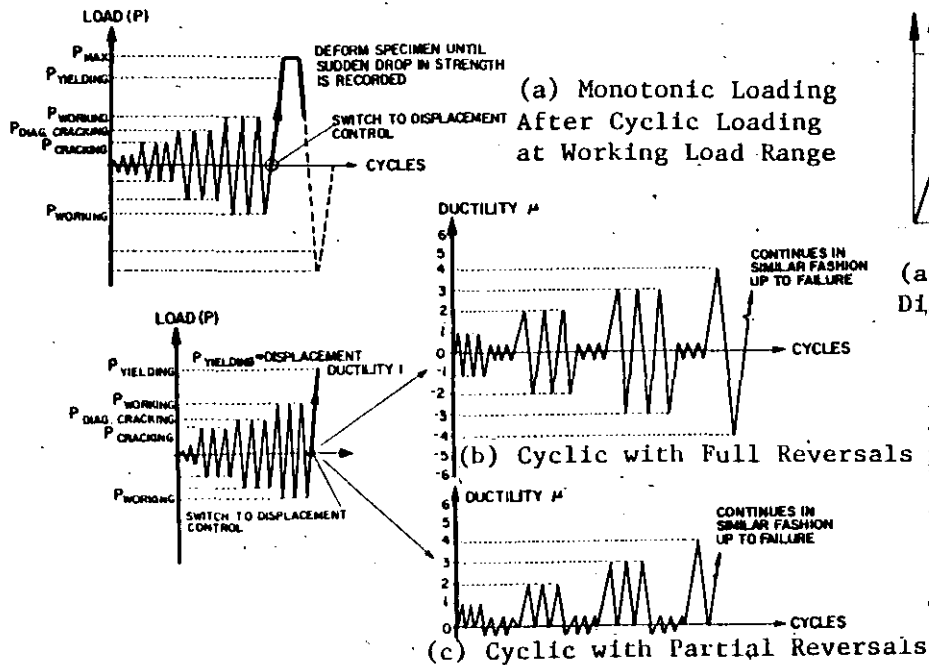


FIG.5 LOADING HISTORIES USED IN EXPERIMENTS AT BERKELEY

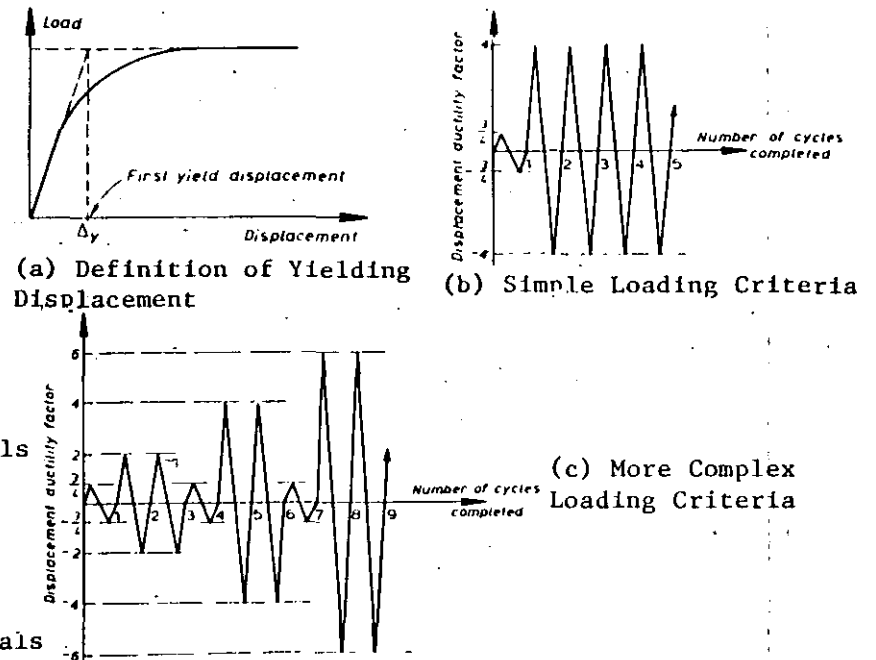


FIG.6 LOADING CRITERIA USED IN NEW ZEALAND [25]

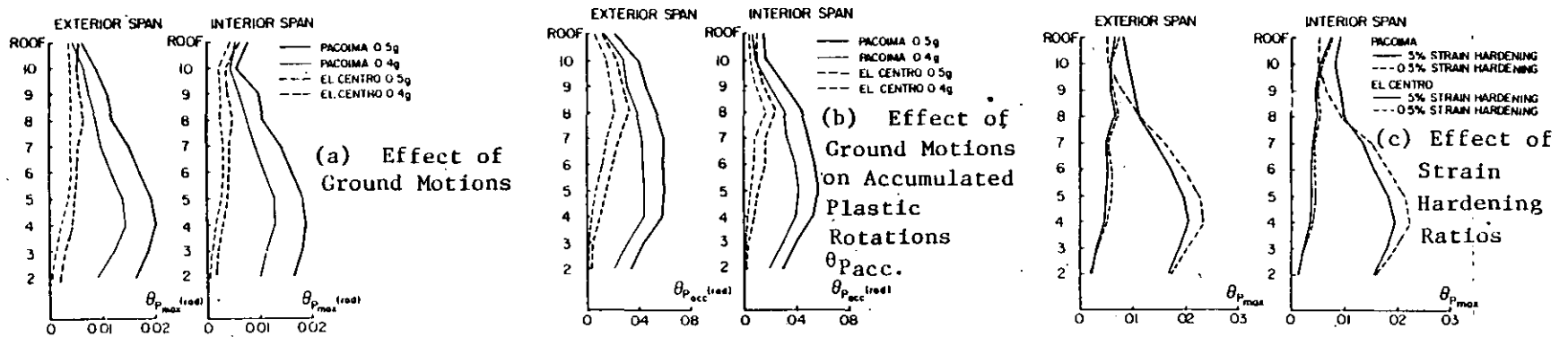


FIG. 7 BEAM PLASTIC ROTATION REQUIREMENTS FOR DIFFERENT GROUND MOTION AND STRAIN HARDENING RATIOS [33]

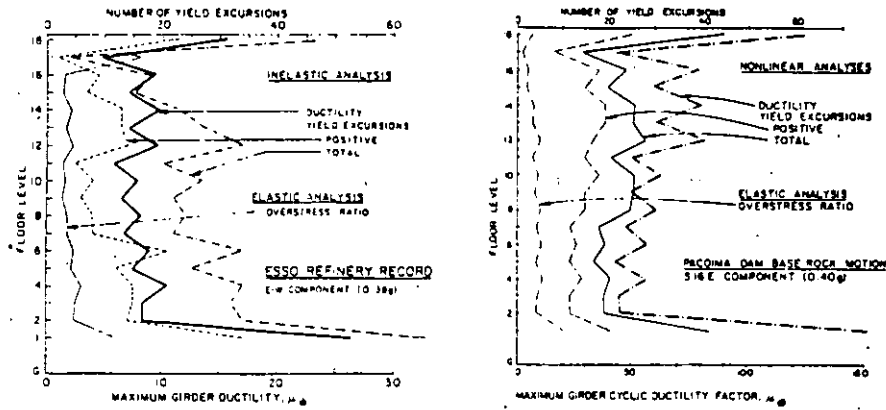


FIG. 8 COMPARISON OF COUPLING GIRDER CURVATURE DUCTILITY AND NUMBER OF YIELD EXCURSION REQUIRED DURING RESPONSE OF COUPLED WALL SYSTEMS TO DIFFERENT GROUND MOTIONS [34]

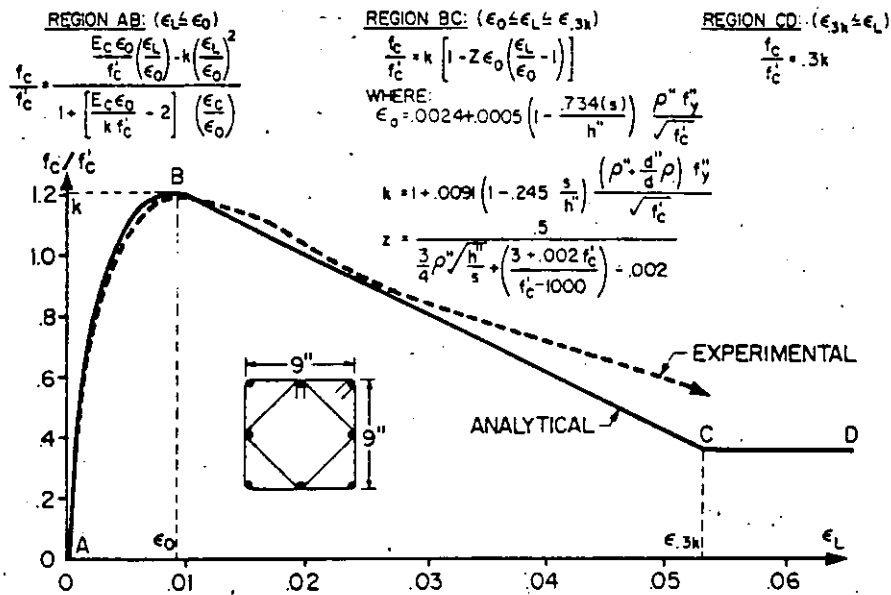


FIG. 9 COMPARISON OF NEW ANALYTICAL CURVE AND EXPERIMENTAL RESULTS FOR CONFINED CONCRETE WITH LONGITUDINAL REINFORCEMENT [57]

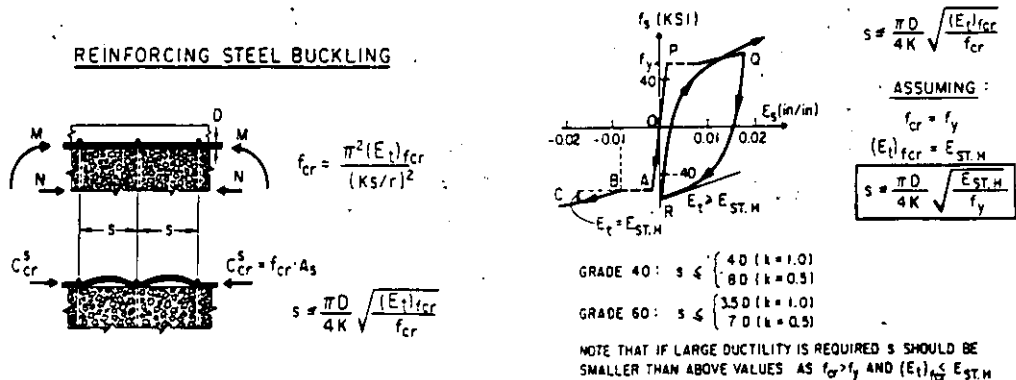
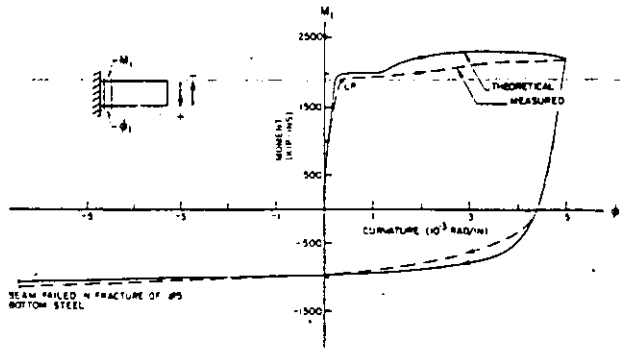
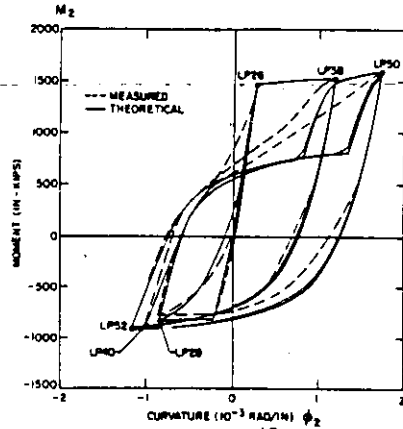


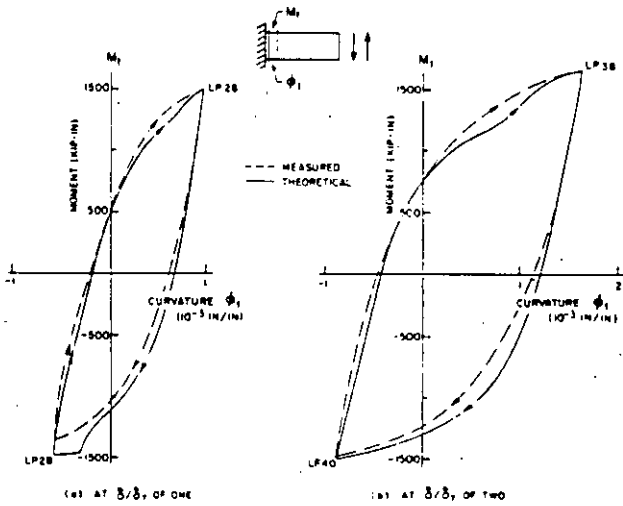
FIG. 10 DERIVATION OF PROPER SPACING, s , FOR LATERAL REINFORCEMENT TO DELAY BUCKLING OF LONGITUDINAL REINFORCING BARS [57]



(a) Monotonic Loading and Unloading

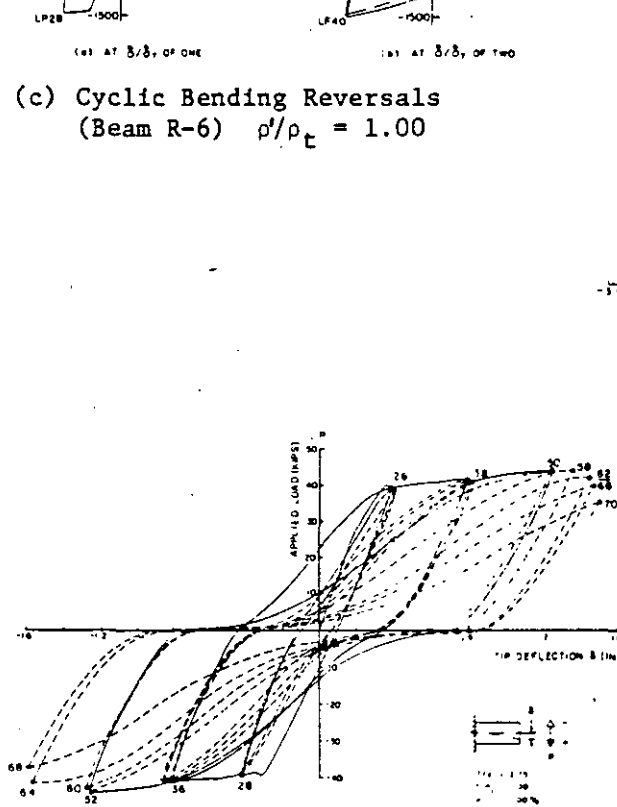


(b) Cyclic Bending Reversals
(Beam R-3) $\rho'/\rho_t = 0.53$

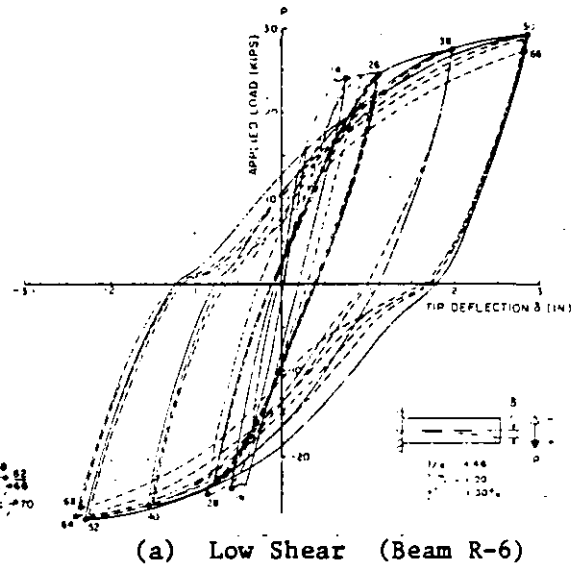


(c) Cyclic Bending Reversals
(Beam R-6) $\rho'/\rho_t = 1.00$

FIG.11 COMPARISON OF EXPERIMENT- AND ANALYTICAL PREDICTION OF MOMENT-CURVATURE RELATIONSHIPS [69]



(b) High Shear (Beam R-5)



(a) Low Shear (Beam R-6)

FIG.12 COMPARISON OF HYSTERETIC BEHAVIOR OF FLEXURAL MEMBERS AS AFFECTED BY DIFFERENT AMOUNTS OF SHEAR FORCES [40]

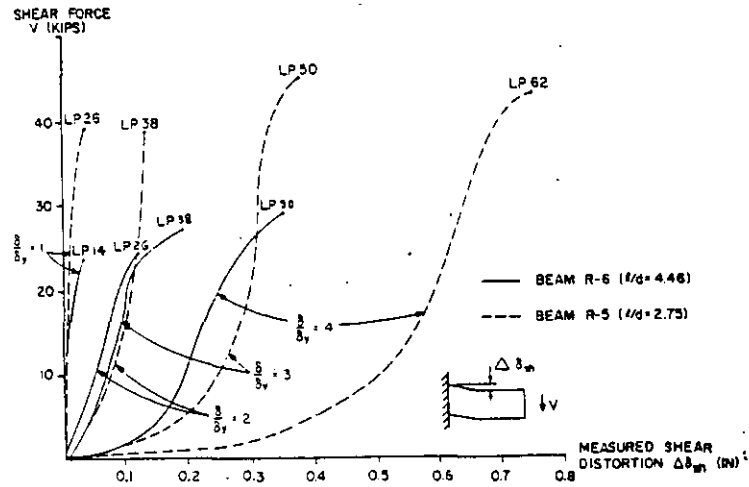


FIG. 13 COMPARISON BETWEEN SHEAR FORCE-SHEAR DISTORTION RESPONSE OF BEAMS R-5 and R-6 [40]

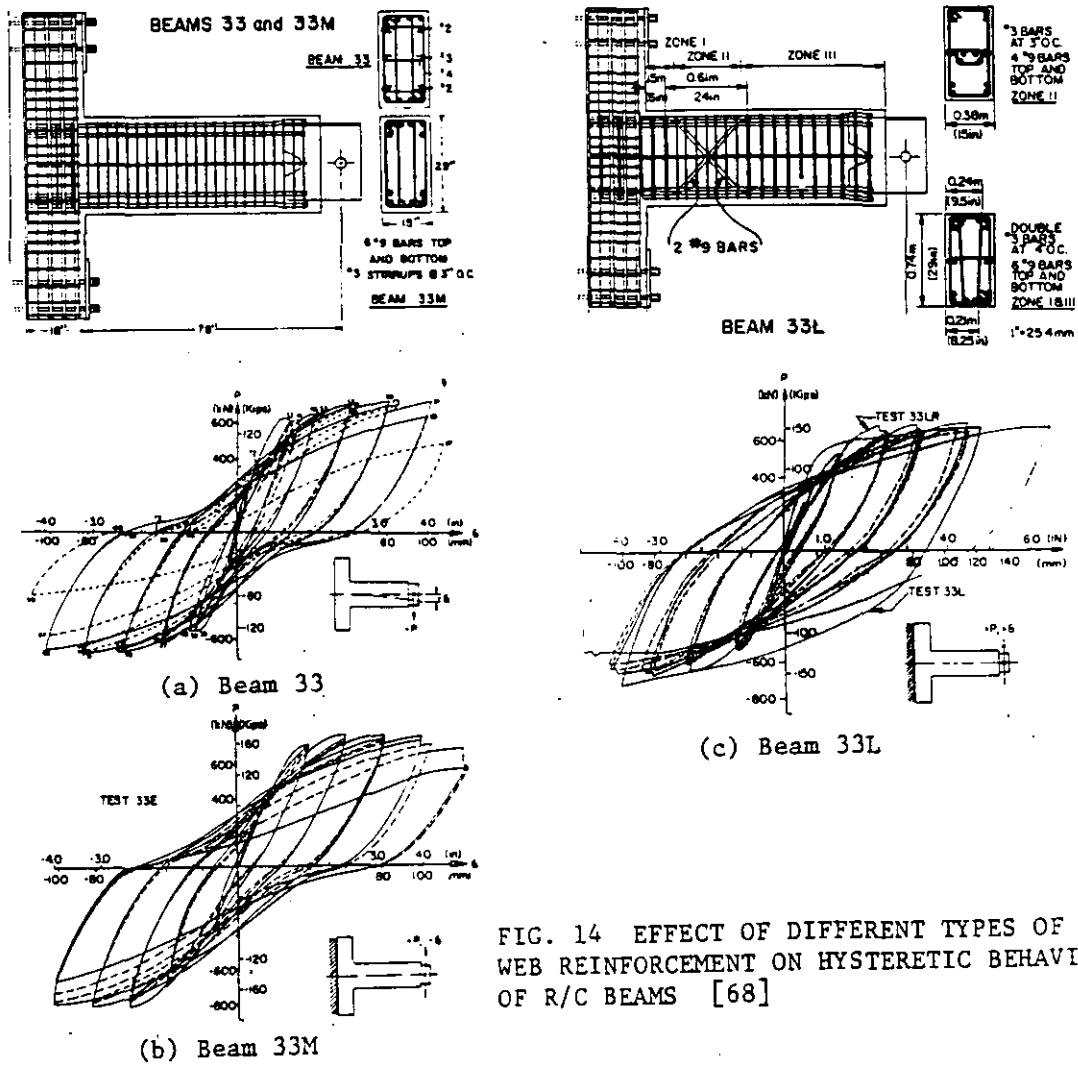


FIG. 14 EFFECT OF DIFFERENT TYPES OF WEB REINFORCEMENT ON HYSTERETIC BEHAVIOR OF R/C BEAMS [68]

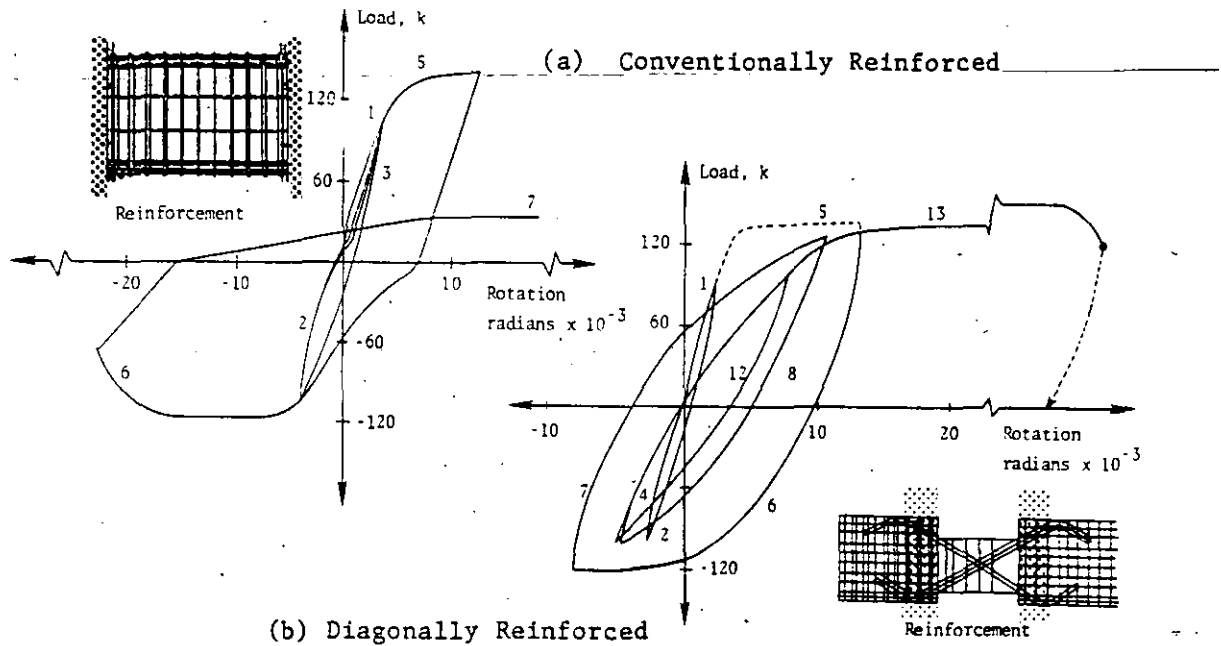
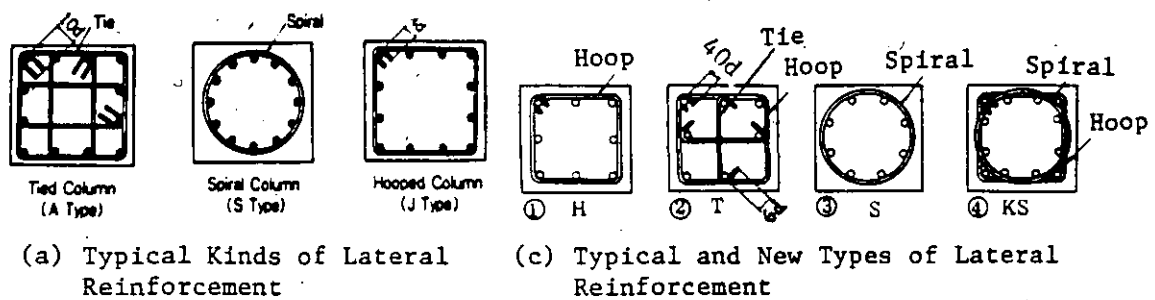
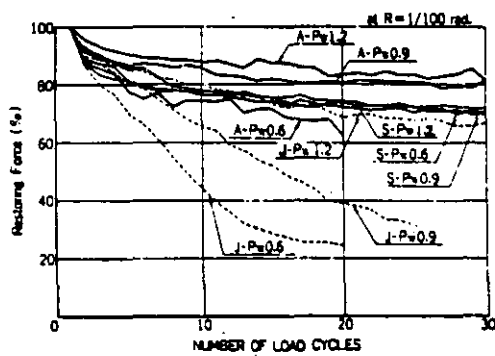


FIG. 15 LOAD-ROTATION RELATIONSHIPS FOR R/C COUPLING BEAMS [82]

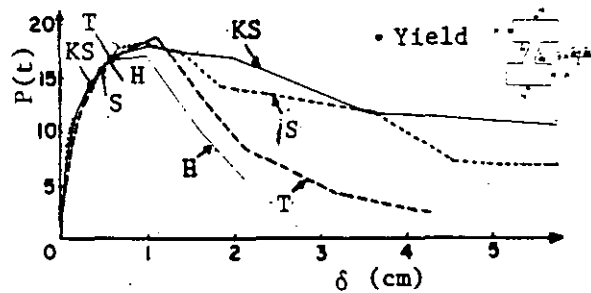


(a) Typical Kinds of Lateral Reinforcement

(c) Typical and New Types of Lateral Reinforcement



(b) Reduction of Restoring Force of Columns in Fig. 10(a), with Increased Number of Cycles



(d) Envelope of Hysteretic Behavior of Columns in Fig. 16(c)

FIG. 16 EFFECT OF DIFFERENT TYPES OF LATERAL REINFORCEMENT ON R/C COLUMN BEHAVIOR UNDER CYCLIC DEFORMATIONS [84, 141, 142]

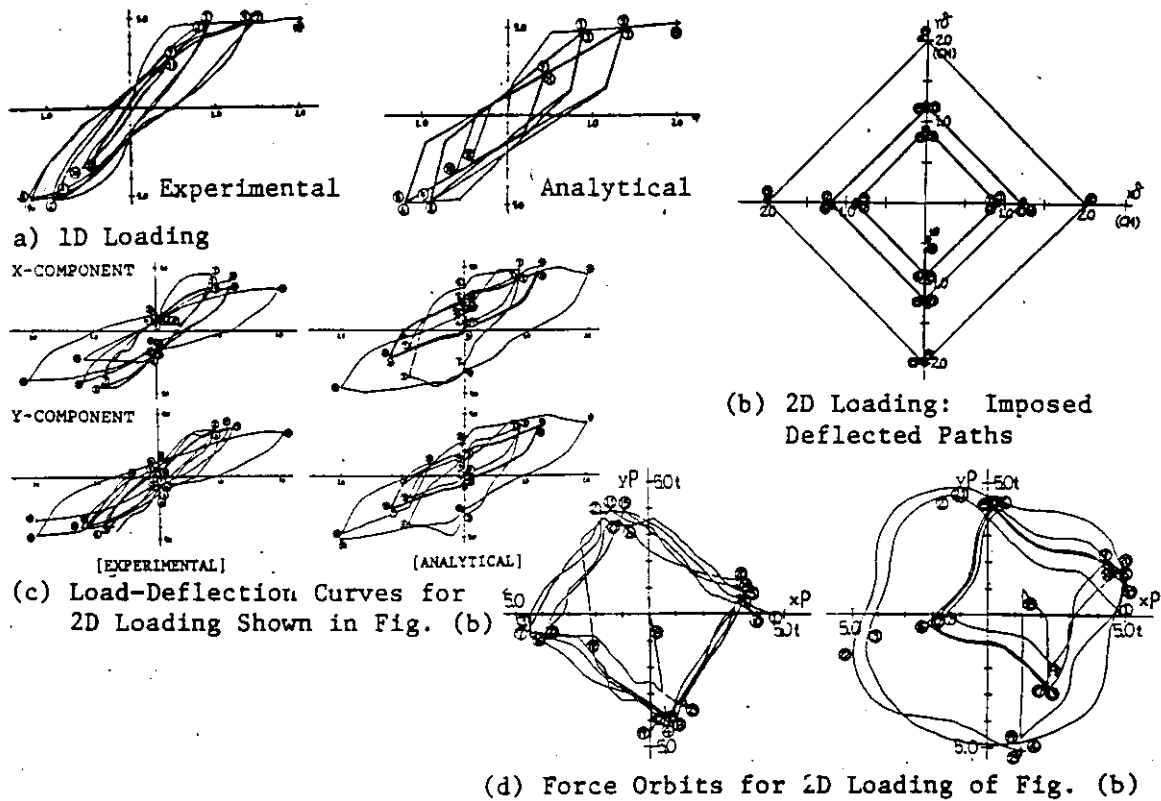


FIG. 17 COMPARISON OF EXPERIMENTAL AND ANALYTICAL LOAD-DEFORMATION CURVES FOR R/C COLUMNS [98]

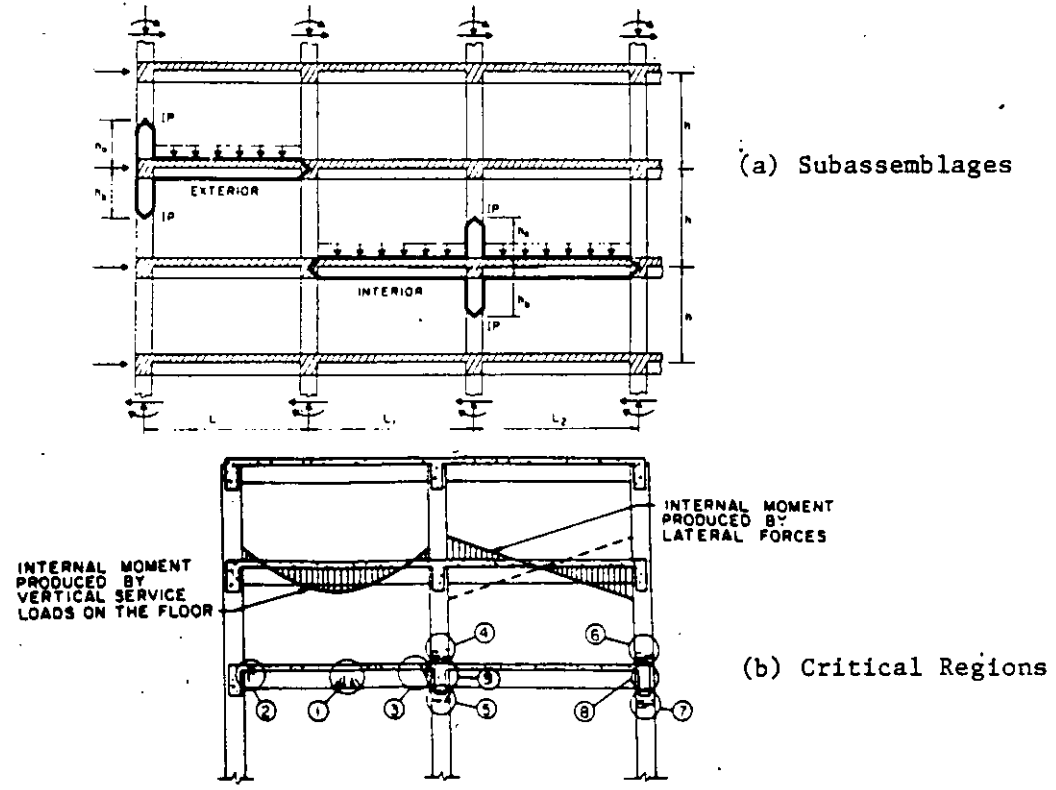
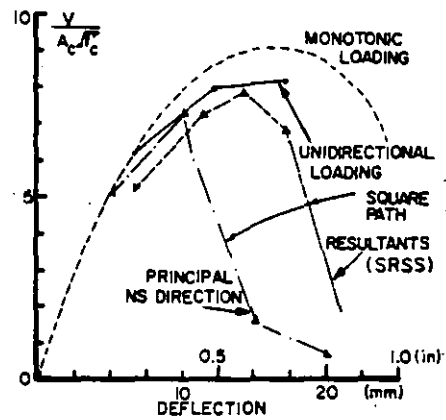
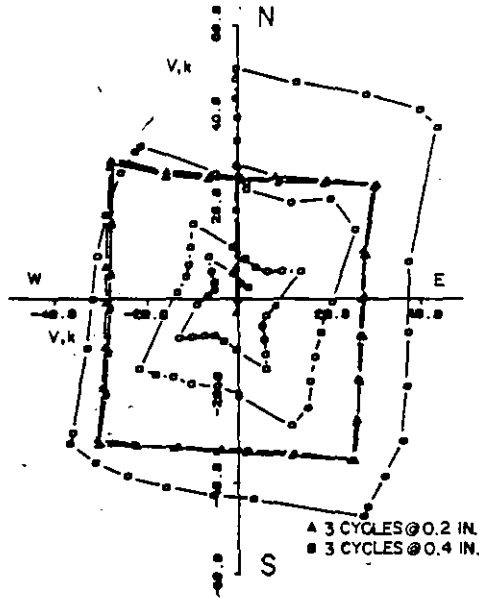
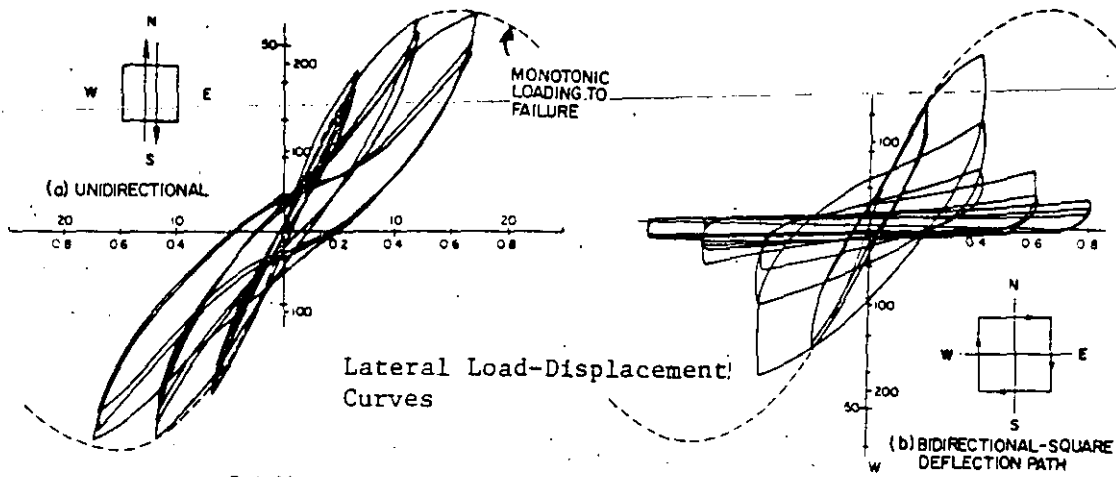


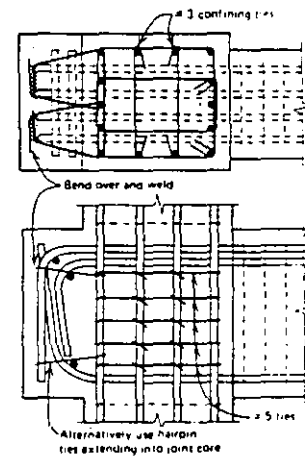
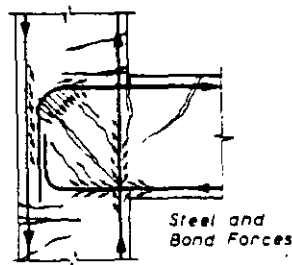
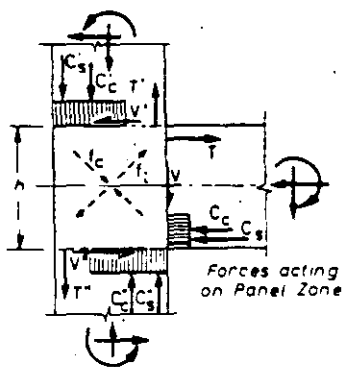
FIG. 19 BASIC SUBASSEMBLAGES OF MOMENT-RESISTING FRAMES AND TYPICAL CRITICAL REGIONS OF THEIR COMPONENTS



(c) Force Orbit of Square Path Shown in Fig. 18(b)

(d) Envelopes of Shear-Deflection Curves

FIG. 18 EXPERIMENTAL RESULTS ON BEHAVIOR OF R/C COLUMNS UNDER 2D LOADING [97]



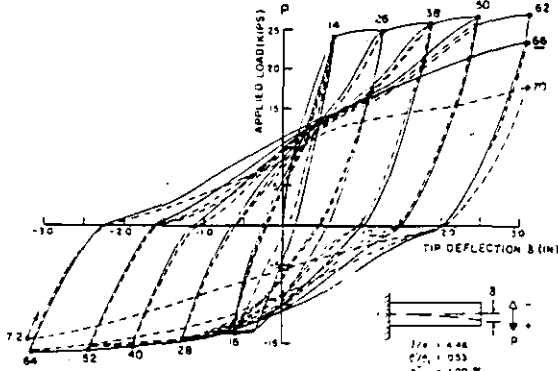
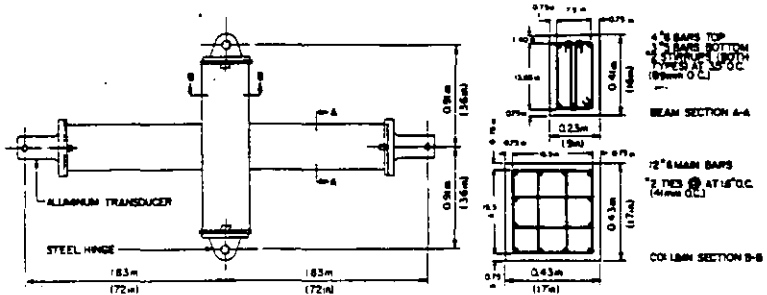
(a) Stress Resultants

(b) Crack Pattern

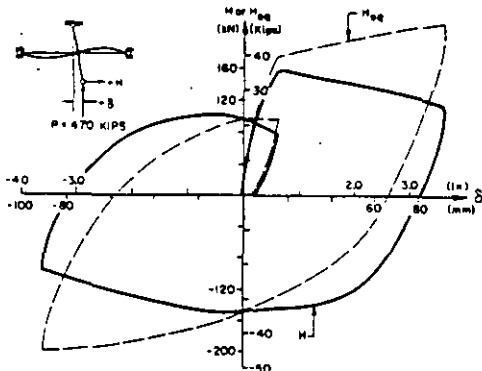
(c) Suggested Arrangement of Joint Reinforcement at an Exterior Joint with a Stub

FIG. 20 EXTERIOR BEAM-COLUMN JOINTS [25, 47]

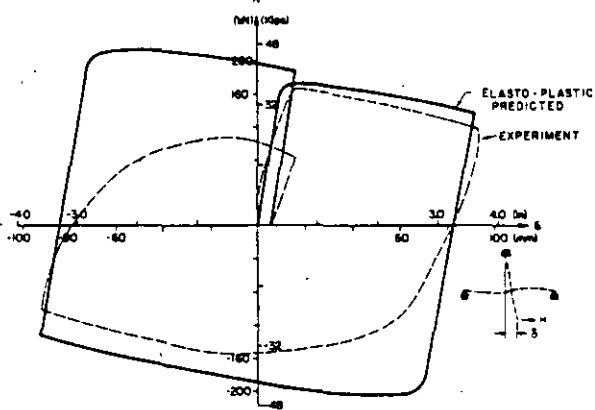
(a) Interior Beam-Column Subassembly Specimen



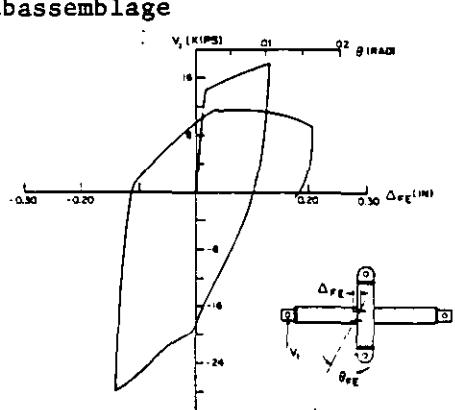
(b) Hysteretic Behavior of Beam



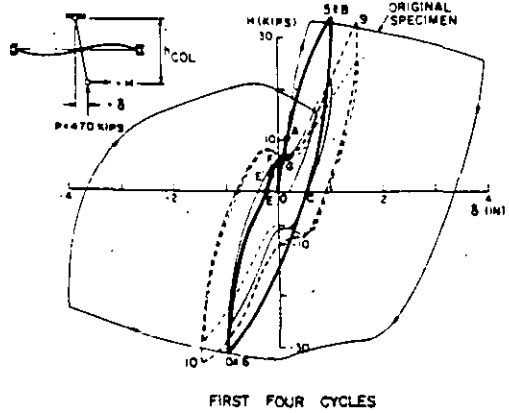
(c) Lateral-Load Deformation of Subassembly



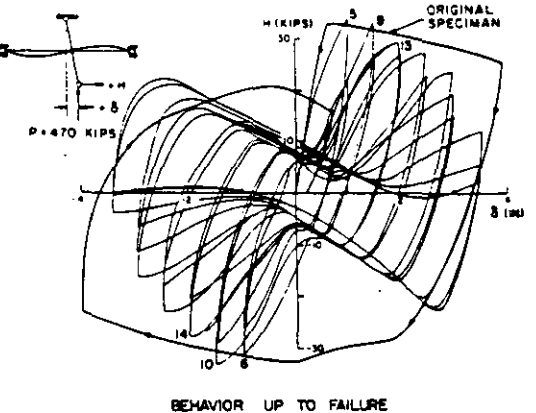
(d) Subassembly Experimental and Analytical Curves



(e) Shear vs. Slippage in Girder's Main Bars of Subassembly



FIRST FOUR CYCLES



BEHAVIOR UP TO FAILURE

(f) Hysteretic Behavior of Subassembly

FIG. 21 RESULTS FROM EXPERIMENTS CONDUCTED ON A BEAM AND INTERIOR BEAM-COLUMN SUBASSEMBLY [39, 40]

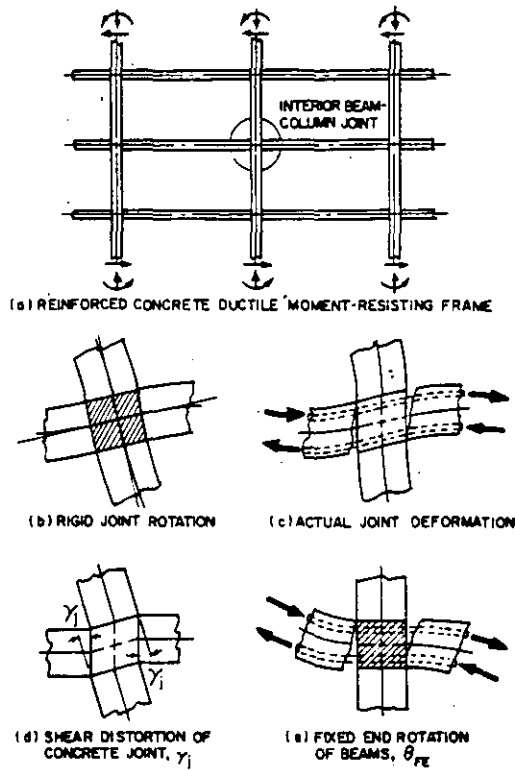


FIG. 24. SOURCES OF DEFORMATION IN AN INTERIOR BEAM-COLUMN JOINT OF A DUCTILE MOMENT-RESISTING FRAME

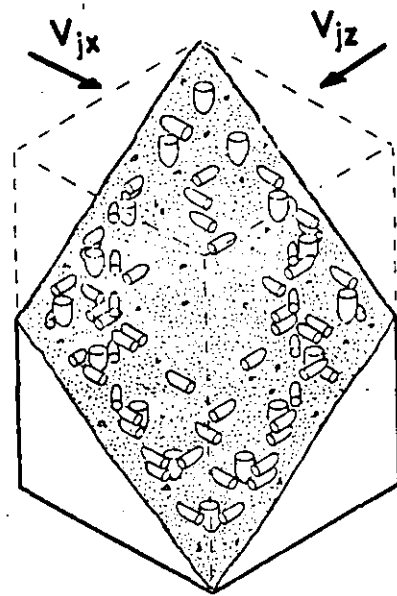


FIG. 25 ISOMETRIC VIEW OF CORNER TO CORNER CRACK ACROSS JOINT CORE IN CASE OF DIAGONAL SHEAR [25]

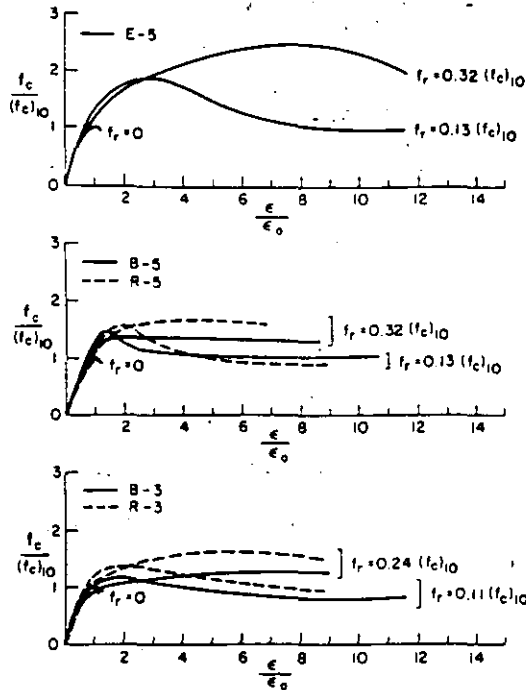


FIG. 26 EFFECT OF CONFINEMENT PRESSURE ON COMPRESSIVE STRENGTH AND DUCTILITY OF CONFINED CONCRETE [23]

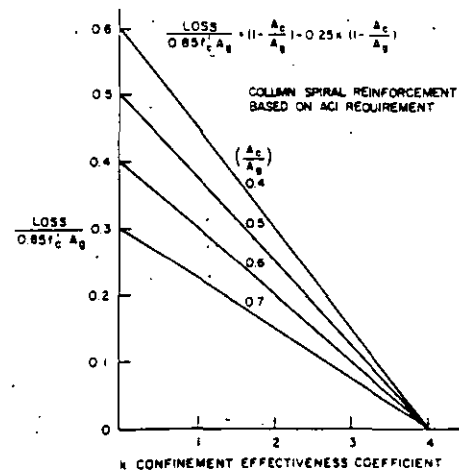


FIG. 27 LOSS OF COMPRESSIVE STRENGTH DUE TO SPALLING OF CONCRETE COVER VS. CONFINEMENT EFFECTIVENESS COEFFICIENT [23]

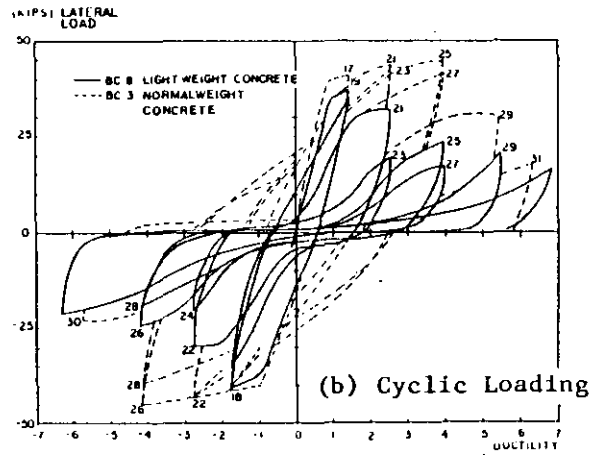
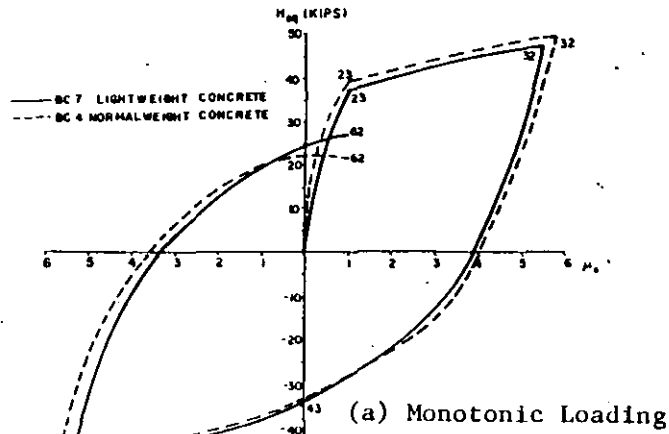


FIG.28 COMPARISON OF BEHAVIOR OF LIGHT AND NORMAL WEIGHT CONCRETE SUBASSEMBLAGES [29]

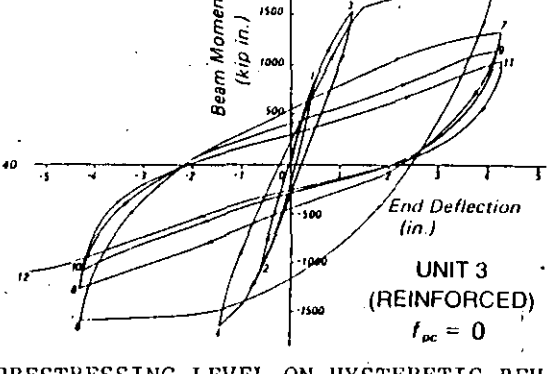
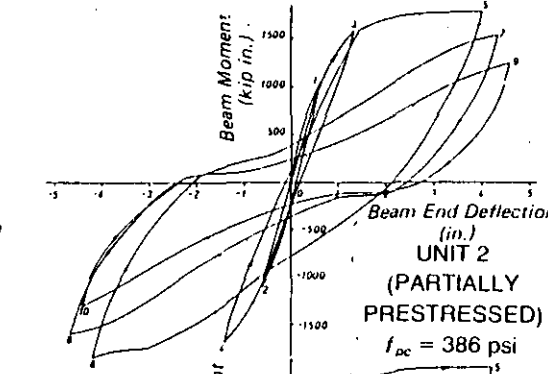
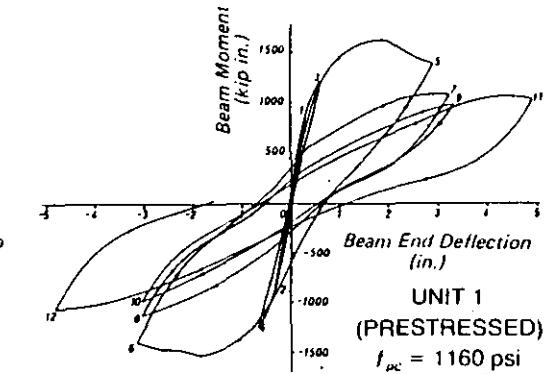
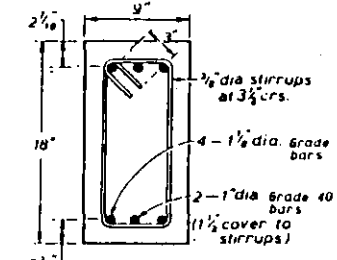
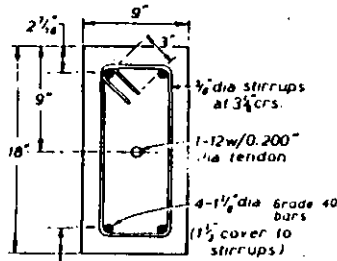
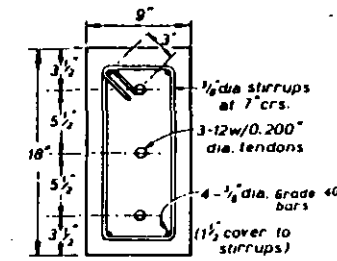


FIG.29 EFFECT OF BEAM PRESTRESSING LEVEL ON HYSTERETIC BEHAVIOR OF BEAM-COLUMN SUBASSEMBLAGES [147, 148]

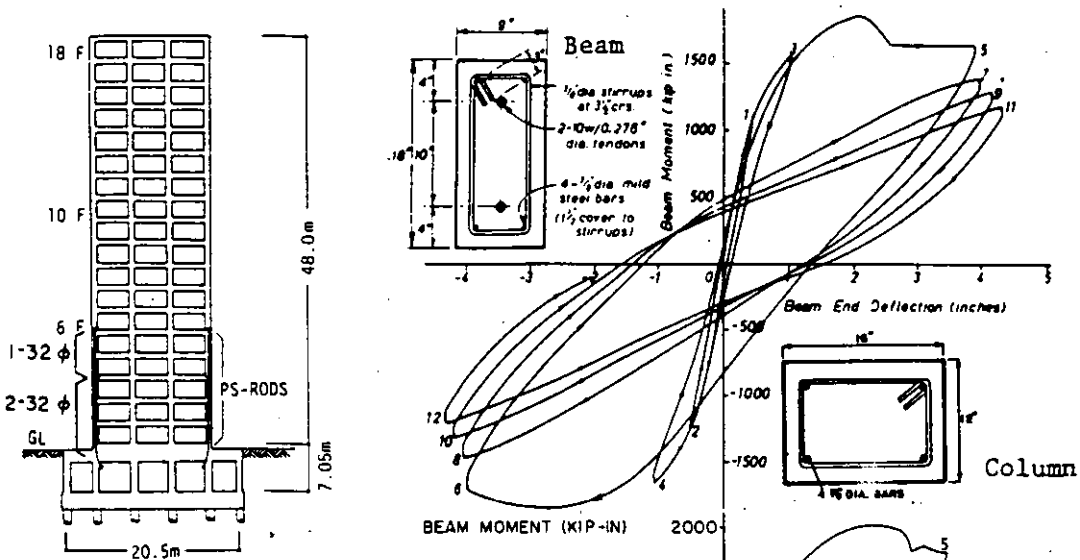


FIG. 30 APPLICATION OF COLUMN PRESTRESSING

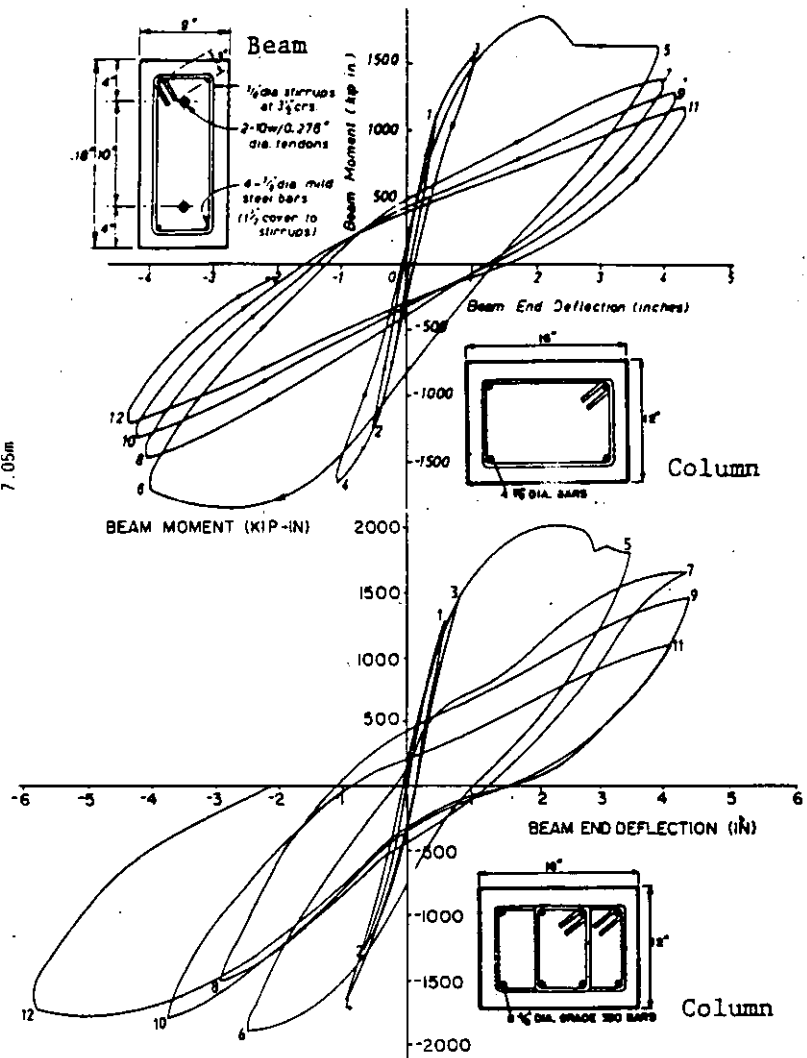


FIG. 31 EFFECT OF INTERMEDIATE COLUMN BARS AT THE JOINT CORE ON HYSTERETIC BEHAVIOR OF PRESTRESSED BEAM-COLUMN SUBASSEMBLAGES [148, 152]

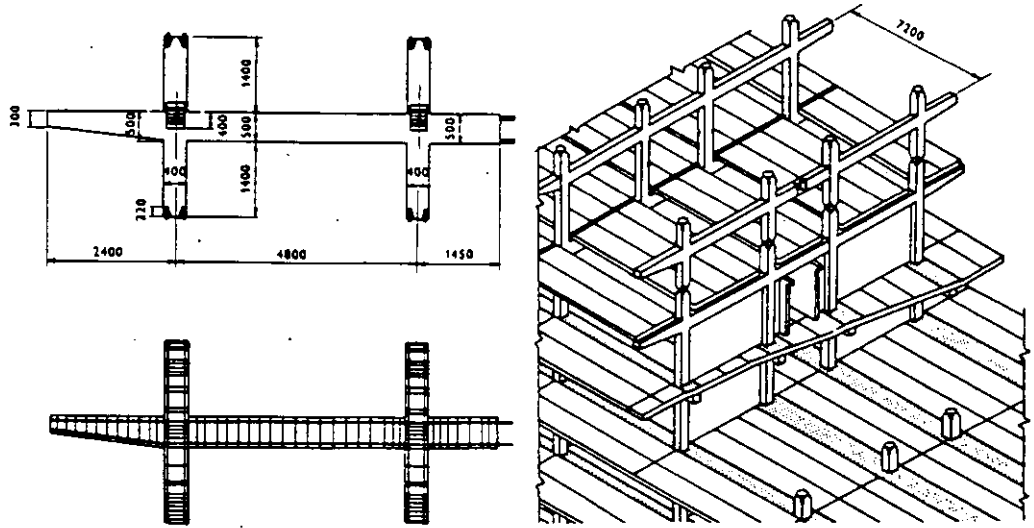


FIG. 32 CONVENIENT LOCATIONS OF JOINTS FOR PRECAST ELEMENTS [150]

**AVANCES EN EL DISEÑO SISMICO DE ESTRUCTURAS DE
CONCRETO REFORZADO**
**Procedimiento de Diseño por Resistencia Ultima en Estructuras de
Concreto Reforzado**
(Instituto de Arquitectos de Japón)

Oscar López Bátiz*

INTRODUCCION.

Como principio básico del diseño antisísmico de estructuras arquitectónicas en Japón, se plantea la formación de un mecanismo de falla o mecanismo de fluencia, como el formado por aparición de articulaciones plásticas en vigas, o el mecanismo de columna fuerte - viga débil. La aparición de articulaciones plásticas en columnas se contempla únicamente en la parte inferior de las columnas del primer nivel y en la parte superior de las del último nivel. El mecanismo de articulaciones plásticas en vigas se plantea con el objeto de incrementar la capacidad de disipación de energía en la estructura, así como lograr una distribución uniforme de dicha disipación.

El criterio básico de diseño antisísmico se resume en la Tabla-1. Este consta de dos fases, que esencialmente corresponden a los dos niveles mostrados en la tabla. La primera fase de diseño tiene por objeto proteger las "partes débiles" de la estructura, esto es, procura eliminar la formación de articulaciones plásticas (propias del mecanismo propuesto) ante un sismo correspondiente al nivel 1. La segunda parte del procedimiento de diseño, tiene por objeto asegurar la formación del mecanismo de fluencia planteado ante un sismo correspondiente al nivel 2. La carga de falla o fluencia, asociada con la formación del mecanismo, se calcula en forma similar a la definición de capacidad por carga última estructural definida en el reglamento de construcciones arquitectónicas Japonés. A continuación se presenta un resumen a grandes rasgos del criterio de diseño correspondiente al nivel 2 de la Tabla-1.

Tabla-1 Criterios de diseño antisísmico [1]

Nivel de riesgo sísmico	Nivel 1	Nivel 2
Probabilidad de ocurrencia	uno en la vida útil	máximo posible
Máximas velocidades de terreno	25 cm/s	50 cm/s
Fuerzas en los elementos	Agrietamiento en el concreto sin fluencia en el acero	Fluencia en el acero sin falla total de la estructura
Ductilidad por piso	menor que 1	menor que 2
Ductilidad en elementos	menor que 1	menor que 2
Angulo de deformación de piso	menor que 1/200	menor que 1/100

1. ESTRUCTURACION.

1.1 Conceptos base para la estructuración.

Definición del mecanismo de fluencia, con el propósito de que se genere el mismo al alcanzar la estructura su resistencia de diseño (la carga de falla o fluencia). Definición de las características de los elementos estructurales, con objeto de verificar que los elementos en los que se proyecta la aparición de articulaciones plásticas tengan la resistencia y capacidad de deformación adecuadas. Asimismo, que

* Investigador. Coordinación de Investigación, Centro Nacional de Prevención de Desastres México.

aquellos elementos en los que no se proyecta la aparición de articulaciones plásticas, tengan la resistencia adecuada. Definición de las características en plano y elevación de la estructura. Para evitar posibles comportamientos no deseados en la estructura, se verifica la uniformidad en la distribución de rigideces, resistencias y ductilidades entre otros aspectos.

1.2 Estructuras a base de marcos momento-resistentes.

El mecanismo de fluencia y la ubicación de las articulaciones plásticas se proyecta para que las articulaciones plásticas se formen en los extremos de las vigas de todos los niveles y en la parte inferior de las columnas del primer nivel, formando un "mecanismo de fluencia por vigas" (Fig.1).

Excepción en los mecanismos de fluencia y en la ubicación de las articulaciones plásticas. Respecto al mecanismo planteado, se permiten la aparición de articulaciones plásticas como se indica:

- a) La parte superior de las columnas del último nivel.
- b) Columnas exteriores cuya carga axial decremente ante la incidencia de fuerzas sísmicas.
- c) Columnas interiores que no intervengan en la transferencia de fuerza sísmica incidente.

1.3 Estructuras con muros estructurales.

Básicamente en una estructura con muros estructurales se busca la simetría en su posición, la regularidad y uniformidad en el plano del mismo, y la continuidad del muro desde la cimentación en toda la altura de la estructura.

En caso de emplear muros estructurales con aperturas en el plano, el efecto de estas en la rigidez y resistencia del mismo deberá ser considerado.

Respecto a la ubicación de articulaciones plásticas por flexión en muros estructurales, se proyecta su formación en la parte inferior del muro en el primer nivel (Fig.2). Sin embargo, también se permite el giro del muro y la aparición de articulación plástica en la trabe de cimentación (Fig.3).

La parte de la estructura a base de marcos momento-resistentes, sigue el mismo criterio presentado en la sección 1.2. Sin embargo, si se garantiza que el muro estructural cuenta con una resistencia adecuada, se permitirá la formación de articulaciones plásticas en las columnas.

1.4 Estructura de cimentación.

Como regla general en la trabe de cimentación no se proyectará la formación de articulación plástica. Sin embargo, cuando se define un mecanismo de fluencia que presente giro en la base de un muro estructural (Fig.3), la trabe de cimentación requerirá ser diseñada para presentar articulación plástica en la vecindad al muro.

Respecto a la losa de cimentación y a los pilotes o pilas, no se permitirá la formación de articulaciones plásticas en los mismos. Las estructuras de sótanos deberán revisarse a ser suficientemente rígidas, y no se permitirá la formación de articulaciones plásticas en ningún elemento estructural de los mismos.

1.5 Elementos no estructurales.

Las juntas entre la estructura y los elementos no estructurales deberá hacerse de tal manera que el comportamiento de estos no afecte a la formación del mecanismo de fluencia definido. Deberán diseñarse para evitar falla o caída de los mismos ante sismos de mediana intensidad.

2. METODO DE DISEÑO.

2.1 Procedimiento de diseño.

El diseño estructural tendrá por objeto asegurar que ante carga vertical y sismos de mediana intensidad la estructura tenga y mantenga la resistencia y funcionalidad adecuada, y ante sismos de gran intensidad asegurar que la estructura tenga la ductilidad o capacidad de deformación necesaria para desarrollar el mecanismo de fluencia ante la fuerza lateral incidente sin presentar la falla total.

El diseño ante carga vertical contempla la revisión de resistencia, deformación, desplomes, agrietamientos y posibilidad de problemas de vibración no deseada. El diseño ante carga lateral se lleva a cabo en dos partes, primero el diseño del mecanismo de fluencia, y segundo el diseño para el

aseguramiento de la formación del mecanismo de fluencia. Estos se resumen como sigue:

- a) En el diseño del mecanismo de fluencia, se verificará que la estructura tenga la resistencia ante carga lateral adecuada, y que los elementos presenten ductilidades dentro de los límites requeridos. Para lo cual se hacen análisis elasto-plástico de la estructura considerando la resistencia esperada de los elementos estructurales.
- b) Para asegurar la formación del mecanismo de fluencia ante un sismo de gran intensidad, se realiza un análisis elasto-plástico que muestre que, en elementos en los que no se proyectó la formación de articulaciones plásticas, no se presente falla o formación de articulaciones plásticas. Para llevar a cabo este tipo de análisis, se considera la resistencia esperada para los elementos en los que no se proyectó la formación de articulaciones plásticas, y se considera el límite superior de resistencia en aquellos elementos en los que se proyectó la formación de articulaciones plásticas para la conformación del mecanismo de fluencia. El significado de cada término se ve en la Fig.4.

2.2 Combinación de estados de carga.

Las cargas a considerar en diseño son cargas muertas, vivas, por acumulación de nieve, por viento y las debidas a sismo. Las condiciones de carga a considerar, así como los factores que afectan a cada una de ellas varían de acuerdo a la región y país. Sin embargo, el mayor número de combinaciones posibles debe considerarse en el diseño.

2.3 Diseño del mecanismo de fluencia.

Fuerzas sísmicas de diseño:

- (a) El coeficiente de fuerza cortante basal de diseño se calcula de la siguiente manera

$$C_1 = Z R_t C_B \quad (1)$$

donde, C_1 : coeficiente de fuerza cortante basal; Z : coeficiente sísmico zonal; R_t : factor por características dinámicas de la estructura; C_B : coeficiente de cortante basal estándar. El coeficiente de cortante basal estándar se considera igual o mayor a 0.25 para estructuras a base de marcos momento-resistentes, y se considera igual o mayor a 0.30 para estructuras a base de muros estructurales.

- (b) Para calcular las fuerzas sísmicas de diseño, se parte de la hipótesis de que el comportamiento de los ejes principales ortogonales de la estructura es independiente. La fuerza sísmica horizontal a aplicarse en cada nivel se puede calcular como se indica (salvo investigación específica)

$$\begin{aligned} F_i &= P_i + P_t && (\text{para } i = n) \\ &= P_i && (\text{para } i \leq n - 1) \end{aligned} \quad (2)$$

donde, P_t : fuerza lateral concentrada en el último nivel, que se calcula con la expresión (3). Para estructuras con menos de 6 niveles $P_t = 0$.

$$P_t = \alpha T Q_1 \quad (3)$$

El valor de P_i se calcula como se indica

$$P_i = (Q_1 - P_t) W_i H_i / (\sum W_i H_i) \quad (4)$$

donde, F_i : Fuerza horizontal concentrada en la losa del nivel $(i + 1)$
 Q_1 : Fuerza cortante de entrepiso para diseño del primer nivel, $Q_1 = C_1 \sum W_i$
 α : Coeficiente de la carga concentrada en el último nivel, igual a 0.10
 T : Período fundamental de la estructura (s), $T = 0.02 H_n$
 H_i : Altura respecto al nivel de suelo de la losa del nivel $(i + 1)$

H_n : Altura de la estructura (m)

W_i : Suma de carga muerta y carga viva (para sismo) en el nivel $(i + 1)$

n : Número de niveles de la estructura (siendo 1 el nivel de suelo)

Análisis lineal.

El estado de esfuerzos a emplear para el diseño del mecanismo de fluencia se calcula considerando la rigidez de los elementos estructurales componentes y haciendo un análisis lineal de la estructura con las siguientes hipótesis:

- (a) Elementos en los que se proyecta la formación de articulaciones plásticas. la rigidez se considerará igual a la rigidez secante al punto de fluencia. Elementos en los que no se proyecta la formación de articulaciones plásticas, al calcular su rigidez se considerarán los efectos de agrietamiento por flexión.
- (b) En el caso de muros estructurales o elementos con relación claro/peralte pequeña, los efectos de deformación por cortante deberán ser considerados.
- (c) Las losas de cada nivel se considerarán como elementos rígidos.

Redistribución de esfuerzos.

Para definir el estado de esfuerzos a emplear en el diseño del mecanismo de fluencia, el estado de esfuerzos obtenido del análisis lineal puede ser redistribuido con las condiciones siguientes:

- (a) Posterior a la redistribución de esfuerzos, deberán satisfacerse las condiciones de equilibrio.
- (b) La variación del valor de los momentos por la redistribución respecto a los valores obtenidos por el análisis lineal, no será mayor que el 20% para estructuras a base de marcos y 25% para estructuras a base de muros.
- (c) La variación por la redistribución de la suma de momentos de entrepiso, no deberá ser mayor a 5% de la suma de momentos de entrepiso producto del análisis lineal en la estructura a base de marcos, y no mayor que 15% en estructuras a base de muros.

Límites de deformación.

La deformación angular de entrepiso de una estructura ante un análisis sísmico lineal deberá limitarse a ser menor que $1/200$ rad.

2.4 Diseño para aseguramiento de la formación del mecanismo de fluencia.

Estado de esfuerzos para diseño.

El estado de esfuerzos para asegurar la formación del mecanismo de fluencia se obtendrá empleando el límite superior de resistencia en los elementos que se proyecta la formación de articulación plástica. Se lleva a cabo un análisis pseudo-estático no-lineal, incrementando la fuerza lateral hasta la formación del mecanismo de fluencia. El estado de esfuerzos obtenido de este análisis se modificará considerando los siguientes efectos:

- (a) Efecto del comportamiento dinámico
- (b) Efecto de incidencia de fuerza sísmica en dos direcciones

Análisis no-lineal.

Tomando en cuenta las características de comportamiento elásto-plástico de los elementos estructurales, se realiza el análisis pseudo-estático no-lineal para determinar el estado de esfuerzos a la formación del mecanismo de fluencia. Adicionalmente, se considerarán las siguientes hipótesis:

- (a) La distribución de la fuerza sísmica lateral será en forma de triángulo invertido. Por medio de métodos paso a paso o de trabajo virtual, se resolverá la ecuación de equilibrio.
- (b) En el cálculo del límite superior de resistencia de los elementos donde se proyecta la formación de articulaciones plásticas, se empleará el acero de refuerzo propuesto en el prediseño.
- (c) Las losas de cada nivel se considerarán como elementos rígidos.
- (d) La rigidez no-lineal del elemento se calculará en base a la rigidez elástica y al refuerzo del mismo. Para materiales comúnmente empleados se puede emplear la ecuación propuesta por

Sugano-Aoyama[2]

$$\begin{aligned} K_y &= \sigma_y K_o \\ \sigma_y &= (0.043 + 1.64 \eta p_t + 0.043 a / D + 0.33 \eta_o) (d / D)^2 \\ \eta_o &= N / b D \sigma_B \end{aligned} \quad (5)$$

donde, K_y : rigidez secante al punto de fluencia por flexión del elemento; K_o : rigidez elástica del elemento; η : E_s/E_c , E_s y E_c son los módulos de Young del acero y concreto respectivamente; p_t : Porcentaje de acero de refuerzo en la sección; d : peralte efectivo del elemento; D : peralte total de la sección; a/D : Relación entre claro de cortante y peralte; N : fuerza axial de compresión en el elemento; σ_B : Resistencia a la compresión del concreto.

Amplificación de esfuerzos por efecto del comportamiento dinámico.

El coeficiente de incremento de momento y fuerza cortante por efecto del comportamiento dinámico en columnas y muros estructurales, a excepción de que se determine por medio de una investigación especial, se calcularán de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} \omega_{ci} &= 1.0 + (\Delta\omega_i / \phi_o) (\beta_{chi} / \beta_{ci}) \\ \omega_{wi} &= 1.0 + (\Delta\omega_i / \phi_o) (\beta_{whi} / \beta_{wi}) \end{aligned} \quad (6)$$

$\Delta\omega_i$ es el parámetro con que se considera el efecto de modos superiores en el nivel i , y se calcula

$$\begin{aligned} \Delta\omega_i &= 0.25 && (\text{para } i = 1) \\ &= 0.20 && (\text{para } 2 \leq i \leq n/2) \\ &= 0.20 + 0.10 (i - n/2) && (\text{para } i > n/2) \end{aligned} \quad (8)$$

donde, ω_{ci} , ω_{wi} : factores de amplificación de esfuerzos en columnas y/o muros del nivel i ; ϕ_o : factor de incremento de resistencia estructural por el límite superior de resistencia de los elementos ($=C_{1o}/0.25$); C_{1o} : Coeficiente de cortante basal al momento de formación del mecanismo de fluencia, al emplear el límite superior de resistencia en los elementos; β_{ci} , β_{wi} : porcentaje de fuerza cortante a resistir por efecto del modo fundamental en columnas y/o muros del nivel i ; β_{chi} , β_{whi} : porcentaje de fuerza cortante a resistir por efecto de modos superiores en columnas y/o muros del nivel i .

Amplificación por efecto de incidencia sísmica biaxial.

En el caso de columnas, el momento y/o el cortante de diseño se afectará por el factor de amplificación por comportamiento dinámico ω_{ci} , y este a su vez se afectará por el factor de seguridad ante efecto sísmico biaxial ψ_2 . El factor de seguridad ante efecto sísmico biaxial ψ_2 se tratará independientemente para cada eje de análisis, y por regla se considera igual a 0.10. La carga axial de diseño en columnas y muros se calculará considerando el 100% de los resultados del análisis plano en una dirección, adicionando el 50% de los resultados del análisis plano en la dirección ortogonal.

Deformación de seguridad estructural.

Los elementos estructurales en los que se proyecta la formación de articulaciones plásticas deberán diseñarse de modo que la capacidad de deformación plástica supere la deformación de seguridad estructural. La deformación de seguridad estructural de los elementos tiene relación directa con la deformación por seguridad estructural de la estructura en su conjunto, por lo tanto se obtendrá del análisis pseudo-estático no-lineal.

3. DISEÑO DE ELEMENTOS A FLEXION Y CARGA AXIAL.

3.1 Determinación de las secciones transversales.

Hipótesis básicas para la determinación de la resistencia última a flexión.

- + Las deformaciones en el concreto y el acero en cualquier punto de la sección transversal serán proporcionales a la distancia de dicho punto al eje neutro.
- + La relación esfuerzo-deformación del acero de refuerzo, tanto a tensión como a compresión, se considerará elástica para valores menores que los ilustrados en la Tabla-2. Para deformaciones mayores que las correspondientes a los esfuerzos ilustrados en la Tabla-2, el esfuerzo en el acero de refuerzo se tomará igual a la resistencia a la fluencia del material.
- + La relación esfuerzo-deformación del concreto se obtendrá empleando modelos adecuados (vrg. el modelo de Kent - Park [3], Fig.5)

3.2 Resistencia esperada a la flexión.

La resistencia esperada a la flexión se calculará en base a las hipótesis que se indican:

- (a) La deformación del concreto en la fibra exterior a compresión de la sección transversal se considerará como 0.003. Para la resistencia del acero de refuerzo se considerarán los valores mostrados en la Tabla.2

Tabla.2 Resistencia del acero de refuerzo

Tipo de acero de refuerzo	Resistencia del material	
	(a) Resistencia esperada	(b) Limite superior de resistencia
corrugado 3000	1.0 σ_y	1.30 σ_y
corrugado 3500	1.0 σ_y	1.25 σ_y
corrugado 4000	1.0 σ_y	1.25 σ_y
corrugado alta	1.0 σ_y	-----

σ_y : límite inferior de fluencia probado del acero de refuerzo

(b) El acero de refuerzo de losa que tenga la longitud de anclaje requerida y se encuentre en el ancho efectivo a considerar de la losa, podrá tomarse como parte del acero a tensión en su caso.

(c) Podrá considerarse el acero de refuerzo colocado en varias capas.

3.3 Límite superior de resistencia a flexión.

El límite superior de la resistencia a flexión se calculará en base a las siguientes hipótesis:

- (a) La deformación del concreto en la fibra exterior a compresión de la sección transversal se tomará como 0.003 (un ejemplo en vigas se ilustra en la Fig.6). El límite superior de resistencia del acero de refuerzo se considerará conforme se indica en la Tabla.2
- (b) Cuando se traten secciones T o I, el ancho efectivo correspondiente a los patines se tomará como dos veces el considerado para el cálculo de la resistencia esperada. Igualmente, el acero de refuerzo de losa o muro se considerará en el cálculo.
- (c) El acero de refuerzo colocado en capas, o bien cualquier refuerzo que contribuya a resistir esfuerzos por flexión, deberán considerarse en el cálculo.

3.4 Límite de la carga axial permisible en elementos con posible formación de articulación plástica.

En elementos en los que por diseño se proyecta la formación de articulación plástica en el mecanismo de fluencia, deberán satisfacerse los siguientes límites requeridos para la carga axial:

- (a) La carga axial en columnas deberá satisfacer la ecuación (9)

$$- k_2 A_g \sigma_y \leq N_c \leq k_1 A_c \sigma_c \quad (9)$$

donde, N_c : carga axial de compresión en la columna, obtenida del diseño para aseguramiento de la formación del mecanismo de fluencia; A_c : Área de la sección transversal de la columna; A_g : área total del acero de refuerzo longitudinal a tensión efectivo en la columna; σ_y : resistencia esperada del acero de refuerzo longitudinal; k_1 : coeficiente por carga axial de compresión (=1/3)

En caso de cumplir los requisitos para confinamiento del acero lateral, k_1 puede considerarse como $2/3$); k_2 : coeficiente por carga axial de tensión ($= 3/4$).

(b) La carga axial en muros, por lo general deberá satisfacer la ecuación (10)

$$N_w \leq k_3 A_{core} \sigma_B - A_{ws} \sigma_{wyu} \quad (10)$$

donde. N_w : carga axial de compresión en el muro obtenida del diseño para aseguramiento de la formación del mecanismo de fluencia; A_{core} : área de la sección transversal de la columna ubicada en el extremo a compresión del muro; A_{ws}, σ_{wyu} : área y límite superior de resistencia del acero vertical colocado en la parte del muro; $k_3 = 2/3$ (en caso de cumplir los requisitos de confinamiento para el acero lateral, el valor de k_3 se puede considerar igual a la unidad).

3.5 Regulación sobre la estructuración.

Vigas.

El ancho de la viga será mayor a 25 cm. Para vigas en las que se proyectó la formación de articulaciones plásticas, el ancho de las mismas será mayor a 1/4 veces su peralte.

El acero de refuerzo longitudinal será acero corrugado con diámetro mayor a 19 mm.

En vigas con articulaciones plásticas, el porcentaje de acero de tensión ρ_t , incluyendo la contribución del acero de la losa, será menor a 0.025. El área total del acero de refuerzo a compresión será mayor a 0.5 veces el área total del acero de refuerzo a tensión. ($\rho_t = A_t / b d$, A_t : área total del acero de refuerzo a tensión, b : ancho de la viga, d : peralte efectivo de la viga).

La colocación del acero de refuerzo podrá hacerse en dos capas máximo.

Columnas.

Cualquier de los lados o diámetro de columna deberá ser mayor a 40 cm. Para columna con formación de articulación plástica proyectada, el lado corto de columna será mayor a 1/3 veces el lado largo de la misma.

El acero de refuerzo longitudinal será acero corrugado con diámetro mayor a 19 mm.

Muros.

La geometría transversal del muro estructural será en forma de I con columnas en los extremos. El ancho del muro será el valor mayor entre 15 cm y $1/20$ de la altura de entrepiso.

El acero de refuerzo a emplear en el muro será corrugado con diámetro mayor a 10 mm, se requiere que las cantidades de acero horizontal y vertical sean iguales. En zona de articulación plástica el acero de refuerzo deberá colocarse doble (en dos capas).

En el caso de proyectar una abertura en zona de articulación plástica, la abertura deberá hacerse al centro del muro lo más posible. La dimensión del hueco será tal que no provoque pérdida de monoliticidad en el muro.

4. DISEÑO ANTE FUERZA CORTANTE.

4.1 Método de diseño.

4.1.1 Fundamentos básicos del procedimiento de diseño.

El procedimiento de diseño ante fuerza cortante tiene por finalidad que la resistencia esperada de los elementos ante cortante, sea mayor que la fuerza cortante considerada en el diseño para aseguramiento de la formación del mecanismo de fluencia. También, para que los elementos donde se proyecta la formación de articulaciones plásticas tengan una capacidad de deformación plástica que supere al límite de deformación estructural para el mecanismo de fluencia. En el caso de columnas y vigas, se corrobora que la resistencia por adherencia del acero de refuerzo longitudinal sea mayor que el estado de esfuerzos de adherencia en el mismo, obtenido en el diseño para aseguramiento de la formación del mecanismo de fluencia.

4.1.2 Resistencia del acero de refuerzo por cortante.

En el cálculo de la resistencia por cortante, la resistencia del acero de refuerzo lateral deberá considerarse igual a la resistencia esperada del mismo.

4.2 Resistencia ante cortante de columnas y vigas.

La expresión para calcular la resistencia esperada ante cortante en columnas y vigas es como sigue

$$V_u = b j_t p_w \sigma_{wy} \cot \phi + \tan \theta (1 - \beta) b D u \sigma_B / 2 \quad (11)$$

donde, $p_w \sigma_{wy} \leq u \sigma_B / 2$

$$\tan \theta = [(L / D)^2 + 1]^{1/2} - L / D$$

$$\beta = (1 + \cot^2 \phi) p_w \sigma_{wy} / (u \sigma_B)$$

$$\sigma_{wy} \leq 25 \sigma_B$$

σ_{wy} : resistencia del acero de refuerzo por cortante; b , j_t , D , L : son el ancho del elemento, distancia entre el centroide de los aceros de refuerzo a tensión y compresión, peralte total, y claro libre del elemento, respectivamente; p_w : porcentaje del acero de refuerzo por cortante. u es el coeficiente de resistencia a la compresión efectiva del concreto. ϕ representa el ángulo de inclinación de la zona de concreto a compresión componente del mecanismo de armadura (Fig.4.a). θ representa la inclinación del mecanismo de arco (Fig.4.b). Los valores de u y ϕ se determina como se indica:

(a) Elementos estructurales en los que no se proyecta la formación de articulación plástica

$$u = 0.7 - \sigma_B / 2000 \quad (12)$$

$$\cot \phi = \min \{ 2.0, j_t / (D \tan \theta), [u \sigma_B / (p_w \sigma_{wy}) - 1]^{1/2} \} \quad (13)$$

(b) Para elementos en los que se proyecta la formación de articulación plástica al formarse el mecanismo de fluencia, el coeficiente de resistencia a la compresión efectiva del concreto u , se calculará conforme a la ecuación (14). El valor de $\cot \phi$ se obtendrá como el menor valor de los calculados empleando las ecuaciones (13) y (15). Sin embargo, en estas expresiones el valor de β será calculado empleando el valor de $\cot \phi$ correspondiente a la zona exterior a la articulación plástica, y el valor de $p_w \sigma_{wy}$ correspondiente a la zona de articulación plástica.

$$u = (1.0 - 15 R_p) (0.7 - \sigma_B / 2000) \quad 0 < R_p \leq 0.05 \\ = 0.25 (0.7 - \sigma_B / 2000) \quad 0.05 < R_p \quad (14)$$

$$\cot \phi = 2.0 - 50 R_p \quad 0 < R_p \leq 0.02 \\ = 1.0 \quad 0.02 < R_p \quad (15)$$

donde, R_p : deformación angular de la articulación plástica del elemento correspondiente a la deformación por seguridad estructural del elemento en todo su conjunto.

En la zona que tendrá comportamiento en el rango elástico, para elementos donde se proyecta la formación de articulación plástica, el cálculo de la resistencia al cortante se hará empleando el coeficiente de resistencia a la compresión efectivo del concreto calculado conforme la expresión (14). El valor de $\cot \phi$ se tomará como el menor de los calculados conforma las ecuaciones (13). Sin embargo, el valor de β se tomará igual al empleado para la zona de articulación plástica.

La confiabilidad del procedimiento de diseño presentado, se aprecia en la Fig.8, donde se comparan resistencias calculadas con resultados experimentales.

4.3 Resistencia ante cortante en muros estructurales.

La resistencia esperada a cortante de un muro estructural se puede calcular con la expresión (16)

$$V_u = t_w l_w b p_s \sigma_{sy} \cot \phi + \tan \theta (1 - \beta) t_w l_w a u \sigma_B / 2 \quad (16)$$

donde,

$$p_s \sigma_{sy} \leq u \sigma_B / 2$$

$$\tan \theta = \{ [(h_w / l_w a)^2 + 1]^{1/2} - h_w / l_w a \}$$

$$\beta = (1 + \cot^2 \phi) p_s \sigma_{sy} / (u \sigma_B)$$

σ_{sy} : resistencia del acero de refuerzo por cortante del muro ($\sigma_{sy} \leq 4000 \text{ kgf/cm}^2$); t_w : ancho del muro; p_s : porcentaje de refuerzo por cortante del muro; h_w : altura de diseño del muro (puede considerarse igual a la altura de entrepiso); ϕ : ángulo de inclinación de la zona de concreto a compresión en el mecanismo de armadura del muro ($\cot \phi = 1.0$); $l_w b$, $l_w a$: longitudes equivalentes del muro a considerar en los mecanismos de armadura y arco respectivamente.

En el cálculo de las longitudes equivalentes de muro para ambos mecanismos, la contribución de las columnas laterales puede considerarse, y se calculan como se indica:

$$l_w a = l_w' + D_c + \Delta l_w a \quad (17)$$

$$l_w b = l_w' + D_c + \Delta l_w b \quad (18)$$

donde, l_w' : longitud del muro comprendido entre las columnas laterales; D_c : Peralte de las columnas laterales; $\Delta l_w a$, $\Delta l_w b$: incremento de la longitud efectiva de muro que se valúa conforme las expresiones (19) y (20)

$$\Delta l_w a = A_{ce} / t_w \quad \begin{matrix} A_{ce} \leq t_w D_c \\ A_{ce} > t_w D_c \end{matrix} \quad (19)$$

$$= [D_c + (A_{ce} D_c / t_w)^{1/2}] / 2$$

$$\Delta l_w b = A_{ce} / t_w \quad \begin{matrix} A_{ce} \leq t_w D_c \\ A_{ce} > t_w D_c \end{matrix} \quad (20)$$

$$= D_c$$

A_{ce} : Area de la sección transversal de la columna lateral, a calcular según la expresión (21).

$$A_{ce} = A_c - N_{cc} / \sigma_B \quad A_{ce} \leq 3 t_w D_c \quad (21)$$

A_c : area de la sección transversal de la columna lateral sujeta a compresión; N_{cc} : carga axial en la columna lateral del nivel superior a diseñar, obtenida del análisis de esfuerzos para el diseño por aseguramiento de formación del mecanismo de fluencia.

Para cuantificar el coeficiente de resistencia a la compresión efectiva del concreto para diseño ante fuerza cortante en muros estructurales, se plantea el siguiente procedimiento:

En la zona donde no se prevé comportamiento plástico del concreto en el muro, u se valuará conforme la expresión (12). Para la región o el elemento donde se proyecta la formación de articulación plástica, el valor de u para el cálculo de resistencia al cortante se tomará como sigue:

$$u = 0.7 - \sigma_B / 2000 \quad \begin{matrix} R_u < 0.005 \\ 0.005 \leq R_u < 0.02 \\ 0.02 \leq R_u \end{matrix} \quad (22)$$

$$= (1.2 - 40 R_u) (0.7 - \sigma_B / 2000)$$

$$= 0.4 (0.7 - \sigma_B / 2000)$$

donde, R_u : deformación de seguridad estructural del muro.

En muros estructurales, el porcentaje mínimo de refuerzo ante fuerza cortante no será menor a 0.0025. Para las columnas laterales, en elementos donde se proyecta la formación de articulación plástica, el porcentaje de acero de refuerzo ante cortante no será menor a 0.003.

5. DISEÑO POR ADHERENCIA ENTRE ACERO DE REFUERZO Y CONCRETO.

5.1 Esfuerzos de adherencia empleados para diseño.

Los esfuerzos de diseño por adherencia entre el acero de refuerzo y el concreto circundante, se calculan

empleando la expresión (23). Sin embargo, para elementos donde se proyecta la formación de articulación plástica en un solo extremo, o no se proyecta la formación de ninguna, los esfuerzos por adherencia serán el valor menor proporcionado por las expresiones (23) y (24).

$$\pi = db \Delta\sigma / [4 (L - d)] \quad (23)$$

$$\pi = b \text{ pwt } \sigma_{wy} \cot\phi / \Sigma\psi \quad (24)$$

donde, $\Delta\sigma$: es la diferencia del estado de esfuerzos en ambos extremos del acero de refuerzo longitudinal obtenido durante el diseño para aseguramiento de formación del mecanismo de fluencia. Cuando en ambos extremos se presente articulación plástica $\Delta\sigma = 2 \sigma_{yu}$, cuando solo en un extremo se presente articulación plástica $\Delta\sigma = \sigma_{yu} + \sigma_y$, finalmente, en el caso de no presentarse articulación plástica $\Delta\sigma = 2 \sigma_y$. Aquí, σ_{yu} y σ_y son el límite superior de resistencia y la resistencia esperada, respectivamente, del acero de refuerzo longitudinal. También, db : diámetro del acero de refuerzo; $\Sigma\psi$: sumatoria del perímetro de todo el acero de refuerzo. L , b , d : longitud o claro libre del elemento, ancho y peralte efectivo del elemento, respectivamente; pwt , σ_{wy} , ϕ : porcentaje de acero de refuerzo empleado para el diseño ante cortante en el centro del claro del elemento, resistencia del acero de refuerzo de cortante, ángulo de inclinación del concreto a compresión componente del mecanismo de armadura en el elemento, respectivamente.

5.2 Resistencia de adherencia.

La resistencia ante problemas de adherencia en columnas y/o vigas estructurales se puede cuantificar empleando la expresión (30). Sin embargo, para el refuerzo longitudinal colocado en la parte superior de vigas, el valor calculado con la expresión (30) será penalizado 0.80 veces.

$$\pi_{bu} = (1.2 + 5 \text{ pw}' b / db) (\sigma_B)^{1/2} \quad (30)$$

donde, pw' : porcentaje de acero de refuerzo lateral colocado en la perímetro exterior de la sección transversal.

6. UNION VIGA - COLUMNA.

6.1 Objetivo del procedimiento de diseño.

La unión viga - columna se diseñará con el propósito de no presentar falla durante la formación del mecanismo de fluencia hasta alcanzar la deformación de seguridad estructural. Igualmente, ante la incidencia de carga cíclica no se deberá presentar degradación notable de la rigidez o adelgazamiento de la curva histerética de respuesta (pinching).

6.2 Procedimiento de diseño ante fuerza cortante.

Por normatividad de diseño, la resistencia esperada ante cortante de la unión V_{ju} , deberá ser mayor que la fuerza cortante obtenida del estado de esfuerzos empleado en el diseño para aseguramiento de la formación del mecanismo de fluencia V_j .

La resistencia a cortante de la unión se obtiene con la expresión (31)

$$V_{ju} = \kappa \sigma_B b_j D_j \quad (31)$$

donde, κ : coeficiente que depende de la configuración de la unión según la dirección de la carga incidente considerada, para unión interna con forma de + se toma 0.30, para unión exterior con forma de T o L se toma 0.18; D_j : peralte de la columna, o bien la distancia entre el paño de columna y el punto de doblez del acero de refuerzo longitudinal de la viga; b_j : ancho efectivo de la unión a calcular con la expresión (32)

$$b_j = b_b + b_{a1} + b_{a2} \quad (32)$$

donde, b_b : ancho de la viga; b_{a1} : el menor valor de $b/2$ y $D/4$; b_{a2} : distancia entre las caras laterales de

viga y las caras laterales de la columna; D: peralte de la columna (para mayor claridad de la simbología consultar la Fig.9).

El refuerzo lateral p_{jh} en la unión deberá cumplir con los siguientes aspectos: el porcentaje de acero de refuerzo lateral deberá ser mayor a 0.002, exceptuando que se cumpla con la expresión (33)

$$p_{jh} \geq 0.003 V_j / V_{ju} \quad (33)$$

6.3 Anclaje del acero de refuerzo de columna y/o viga.

En extremos de vigas donde se proyecta la formación de articulaciones plásticas, se propone que el acero de refuerzo longitudinal de las mismas pase a través del núcleo de la columna, o en su defecto se ancle en el núcleo mismo. Para valuar la longitud de anclaje de los aceros de refuerzo tanto de vigas, como de columnas, en la unión, se considerará que dicha longitud inicia en las caras de cada elemento. El anclaje del refuerzo de viga en el núcleo de la columna se hará con un dobléz de 90 grados, ubicando este dobléz posterior al eje de columna.

7. COMENTARIO FINAL.

El trabajo presentado aquí consiste en una traducción resumida de la "Guía para Diseño Antisísmico de Estructuras de Concreto Reforzado Empleando el Concepto de Resistencia Última"(4), que como su nombre lo indica no son normativas, ni reglamentarias, pero que contribuyen a disipar dudas y mostrar caminos para lograr diseños lógicos, razonados y económicos.

Es claro que aún permanecen muchos aspectos inconclusos, como son entre otros la determinación del sismo de diseño, la relación entre la cantidad de deformación plástica y las características del sismo de diseño, la cuantificación del factor de seguridad ante la incidencia de un sismo dado, la posibilidad de extender una guía o criterios de diseño como lo aquí presentado a estructuras irregulares o especiales. Sin embargo, es loable y de mucha utilidad la publicación de documentación como la mostrada en la referencia [4], ya que es producto de años de intensa investigación en el área de concreto reforzado.

Referencias.

- [1] Aoyama H., "Recent Development in Seismic Design of Reinforced Concrete Buildings in Japan", Proceeding of the Pacific Conference on Earthquake Engineering, Nov.20-23, 1991. Auckland, New Zealand.
- [2] Sugano S., "Estudio sobre las características fuerza-deformación de elementos de concreto reforzado", Concrete Journal, Vol.11, No.2, 1973, pp.1-9 (en Japonés).
- [3] Park, R., Priestley, N. and Gill W., "Ductility of square-confined concrete columns", Proc. ASCE, Vol.108, No.ST4, April, 1982.
- [4] Instituto de Arquitectos de Japón, "Guía Para el Diseño Antisísmico por Resistencia Última de Estructuras de Concreto Reforzado", 1990/Nov. (en Japonés)

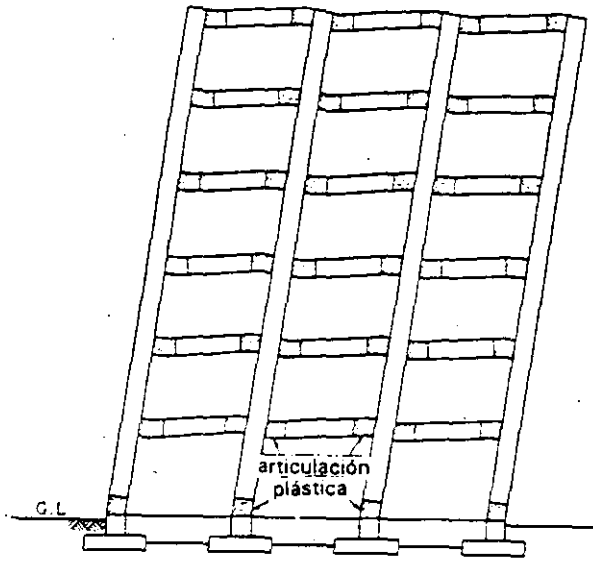


Fig.1 Mecanismo de fluencia de la estructura en base a plastificación en vigas

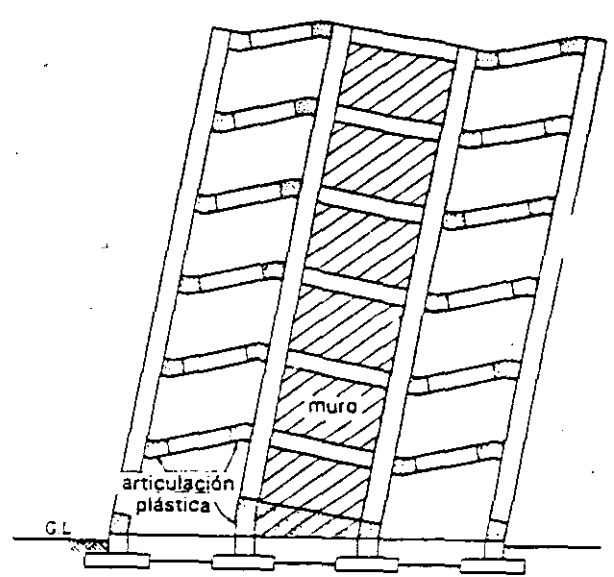


Fig.2 Mecanismo de fluencia de la estructura en base a plastificación de la base del muro

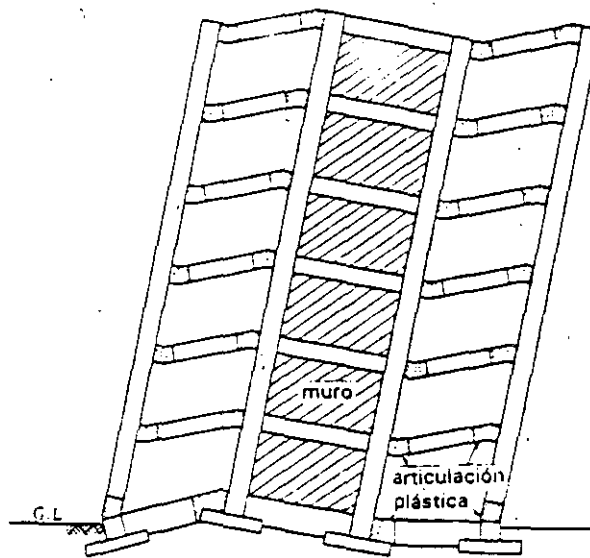


Fig.3 Mecanismo de fluencia de la estructura en base a plastificación de la contrarabe de cimentación

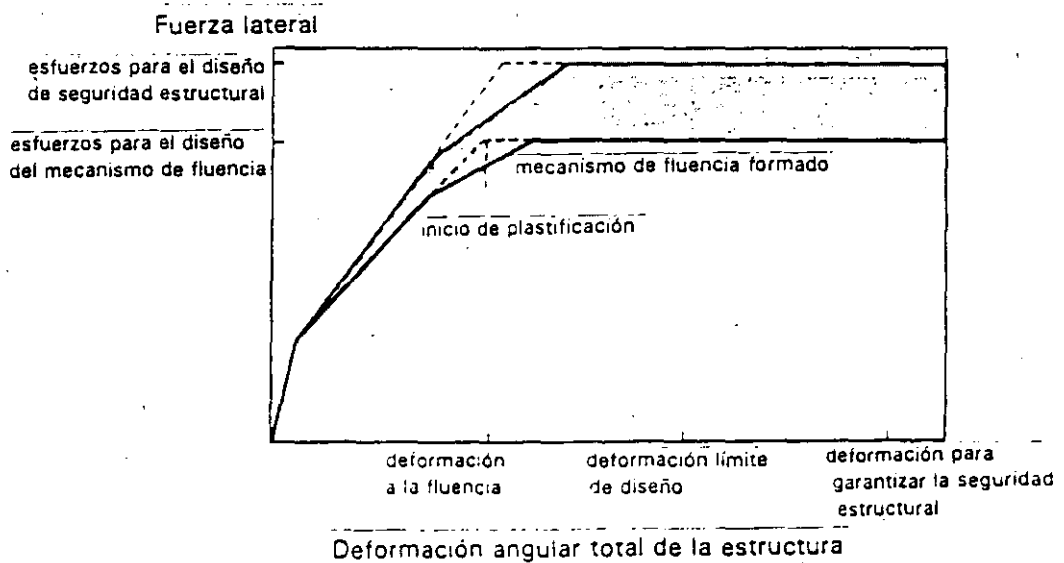


Fig.4.a Representación de los esfuerzos y deformaciones de diseño

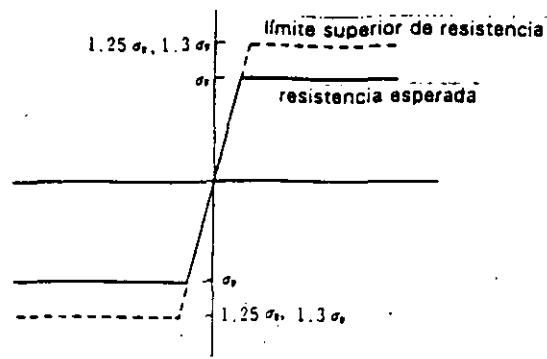


Fig.4.b Hipótesis en la relación esfuerzo-deformación del acero

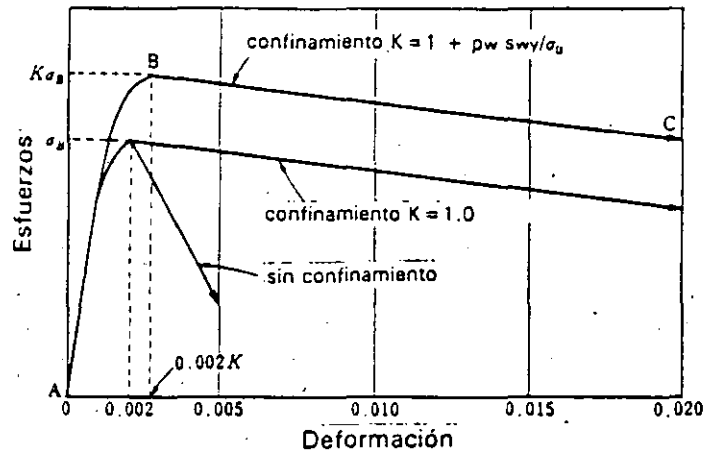


Fig.5 Relación esfuerzo-deformación del concreto confinado (3)

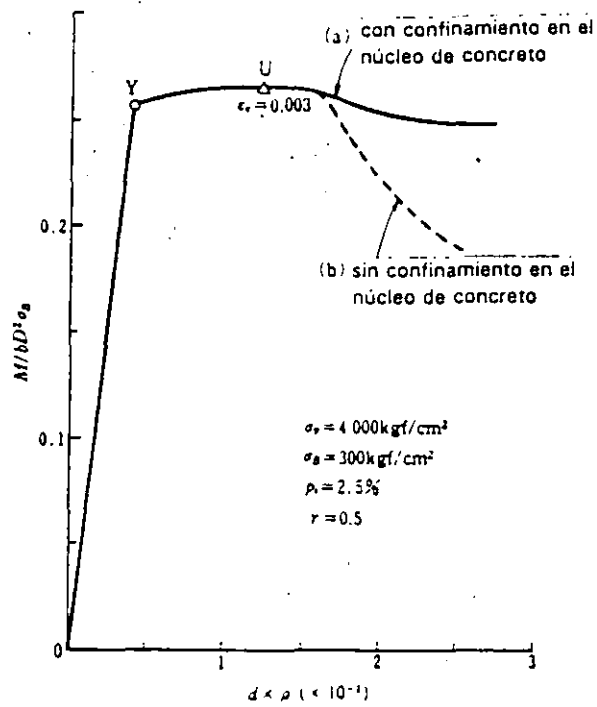


Fig.6 Relación momento - curvatura (calculado)

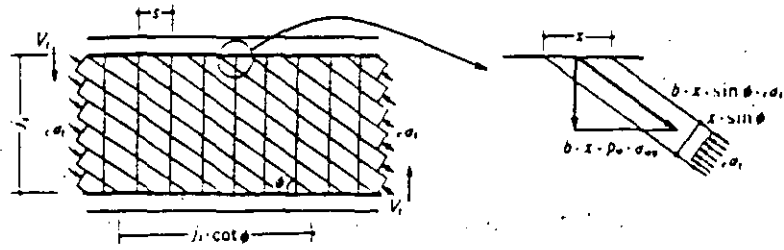


Fig.7.a Equilibrio de fuerzas para el mecanismo de armadura

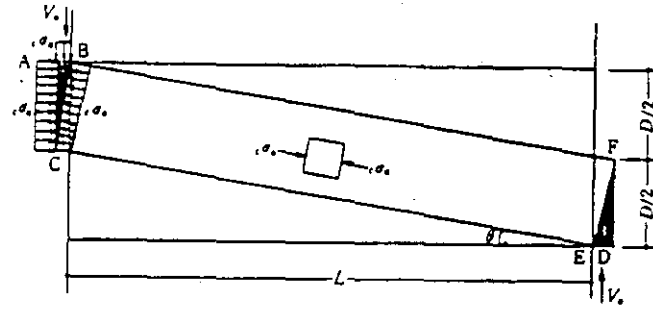


Fig.7.b Equilibrio de fuerzas para el mecanismo de arco

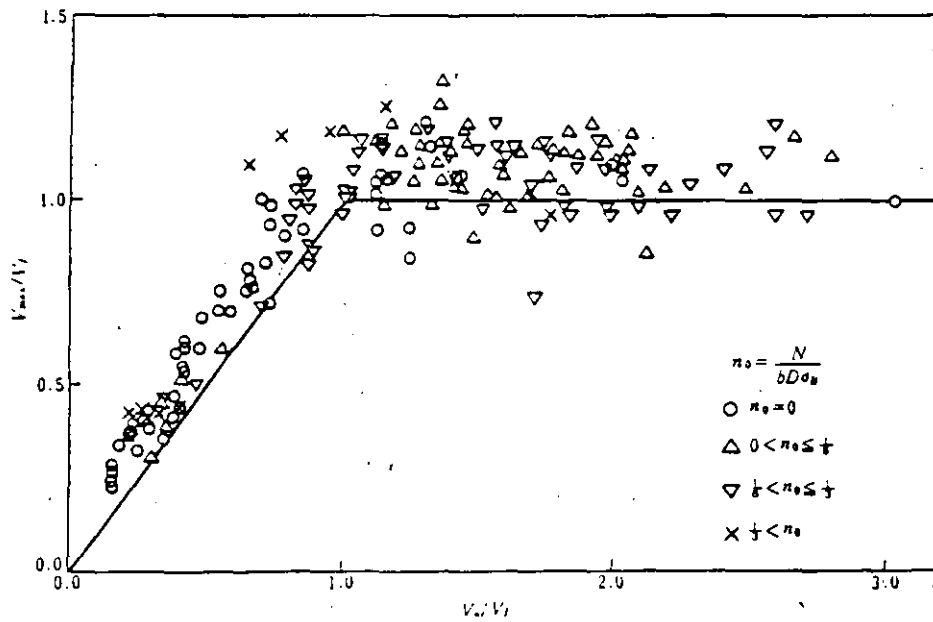


Fig.8 Comparación de valores de resistencia al cortante calculados con las expresiones expuestas, y resultados experimentales

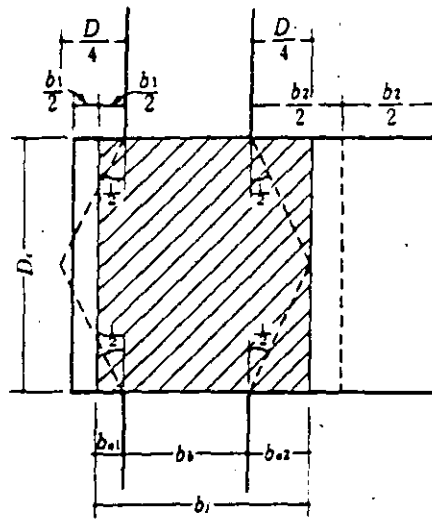


Fig.9 Ancho efectivo de la unión viga-columna



**FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA
CURSOS ABIERTOS
XXI CURSO INTERNACIONAL DE INGENIERIA SISMICA
MODULO III: DISEÑO SISMICO DE EDIFICIOS**

NUEVAS TECNOLOGIAS EN DISEÑO SISMORESISTENTE

**AUTOR: M.I. JOSE M. JARA
EXPOSITOR: DR. EDUARDO MIRANDA MIJARES**

ESTADO DEL ARTE SOBRE DISPOSITIVOS PARA REDUCIR DAÑOS PROVOCADOS POR TEMBLORES

José M. Jara

**Escuela de Ingeniería Civil, Universidad
Michoacana de San Nicolás de Hidalgo**

RESUMEN

Se presenta una descripción de los principales dispositivos usados en la actualidad que buscan reducir los daños provocados por eventos sísmicos. Se comenta el uso de sistemas de controles pasivo y activo así como el de cables de presfuerzo para la rigidización de una estructura y su aplicabilidad en la República Mexicana.

ABSTRACT

A description of the main devices used recently in order to search how to reduce damage produced by seismic events are presented. The use of passive and active control systems and prestressed cables in a stiff structure and its application in México is commented.

INTRODUCCIÓN

El intento por reducir los daños provocados por temblores ha llevado al desarrollo de elementos que se incorporan en las estructuras para modificar sus propiedades dinámicas y, en algunos casos, incrementar su capacidad de disipación de energía.

A partir de la última década ha crecido considerablemente el número de dispositivos fabricados en el mundo. Paralelamente, las instituciones de investigación han dedicado cada vez mayor tiempo al estudio analítico y experimental de estructuras con estos sistemas. Los dispositivos se han agrupado como función de su forma de trabajo en dispositivos de control pasivo y dispositivos de control activo.

1. DISPOSITIVOS DE CONTROL PASIVO

Existen cuatro sistemas principales desarrollados en la actualidad:

- Disipadores de energía
- Aisladores de base
- Osciladores resonantes
- Cables de presfuerzo

Los disipadores de energía modifican la rigidez de la estructura y buscan concentrar en ellos la mayor parte de la disipación de energía. Para su funcionamiento dependen fundamentalmente de los desplazamientos relativos de entrepiso. Los aisladores de base son elementos que se colocan comúnmente entre la cimentación y el edificio para intentar aislar el movimiento del terreno del de la superestructura. Un oscilador resonante es una o varias masas adicionales, generalmente sobre el último nivel de la estructura, con ciertas propiedades dinámicas que reducen la respuesta de la estructura; y los cables de presfuerzo rigidizan a la estructura e incrementan la carga axial en las columnas reduciendo, en algunos casos, los giros en sus extremos.

1.1 Disipadores de energía

Estos dispositivos se ubican generalmente en contravientos, y tienen como finalidad disminuir o eliminar la disipación de energía histerética

en las conexiones viga-columna de la estructura. También se han usado en combinación con aisladores de base. Se pueden agrupar, de acuerdo con la manera en que disipan energía, en los siguientes:

- Dispositivos de materiales con comportamiento elastoplástico
- Por extrusión
- Por fricción
- Dispositivos de materiales con comportamiento viscoelástico

a) Comportamiento elastoplástico

Su comportamiento idealizado es semejante al mostrado en la fig 1. La pendiente de la zona inelástica depende de las características de cada dispositivo y la disipación de energía es más grande conforme se incrementa el área bajo la curva.

El dispositivo mostrado en la fig 2 fue estudiado por Skinner y col (1975-b). Consiste en dos placas en forma de U que disipan energía al desplazarse una cara con respecto a la otra. La parte central del dispositivo se une a un nivel de la estructura y las partes extremas al nivel inmediato superior mediante barras. Los desplazamientos relativos entre los niveles ocasionan el movimiento conocido como rolado por flexión mediante el cual se disipa energía.

Aguirre y Sánchez (1989 y 1990) probaron experimentalmente soleras también en forma de U (fig 3). Su comportamiento histerético es muy estable (fig 4) y por la manera en que se deforman alcanzan la fluencia en casi toda la sección transversal al mismo tiempo. El número de ciclos de carga y descarga que soportan depende de la amplitud de deformación (fig 5). El Instituto de Ingeniería de la UNAM (Chávez y González, 1989) realizó pruebas experimentales en mesa vibradora con un marco de una cruz y dos niveles uniendo dos de estos dispositivos (para dar la forma de una oruga de tractor). Jara y col (1992) estudiaron la respuesta analítica de una estructura de acero de diez niveles y una estructura de concreto de nueve con este dispositivo, sometidas a temblores con las características de los que ocurren con mayor frecuencia en la ciudad de México. Al someter a las estructuras al temblor de Michoacán de

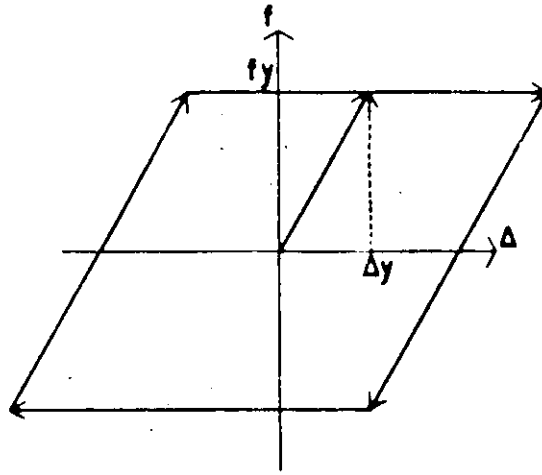
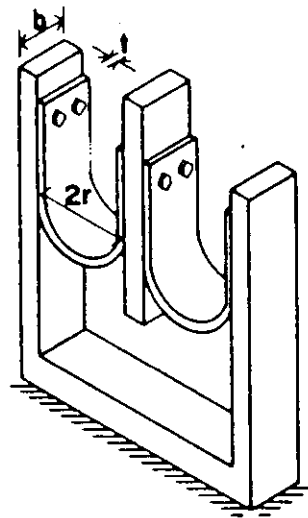
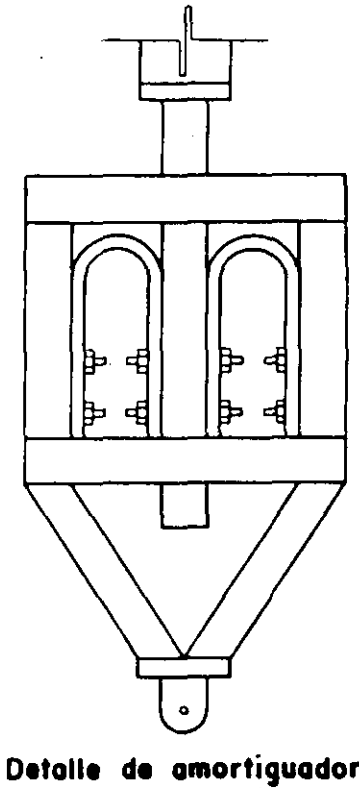
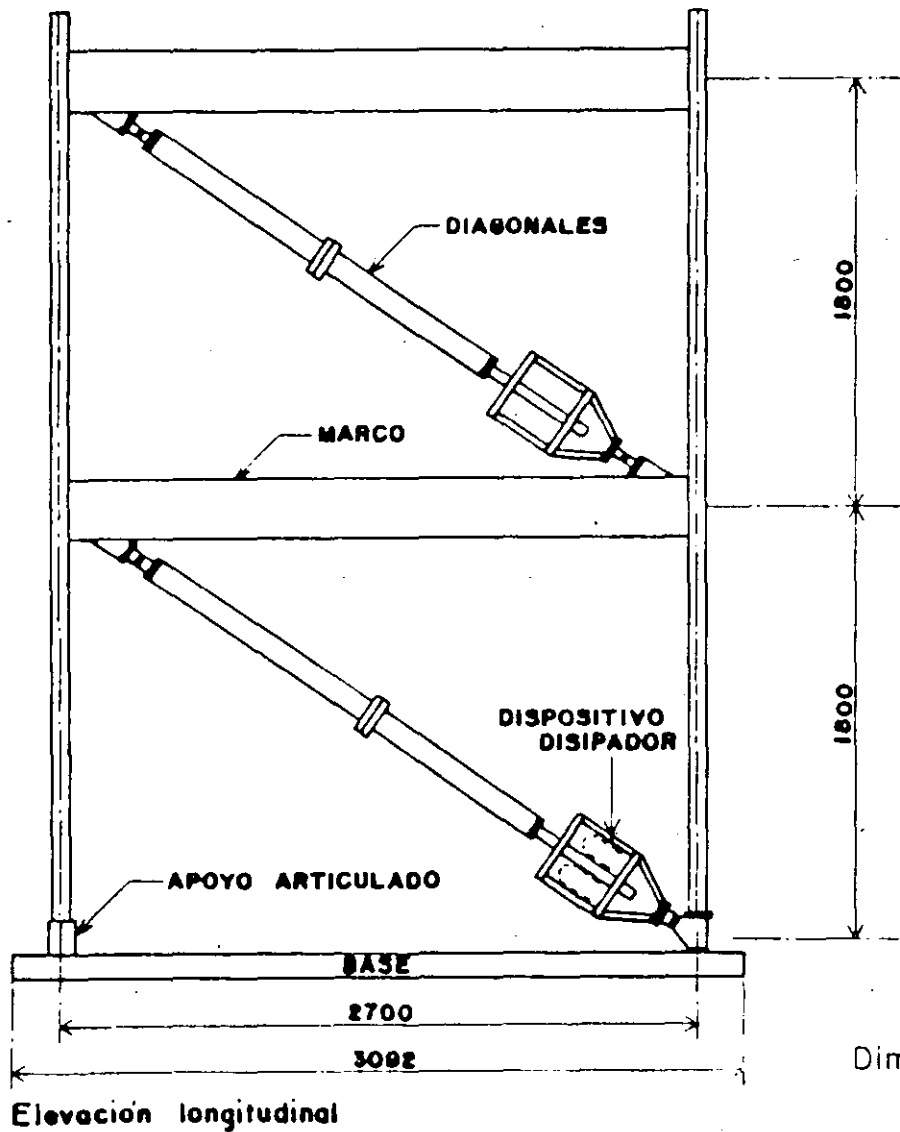


Fig. 1 Comportamiento elastoplástico



F. 2 Dispositivos en forma de U



Dimensiones, en mm

Fig. 3 Dispositivo en forma de U

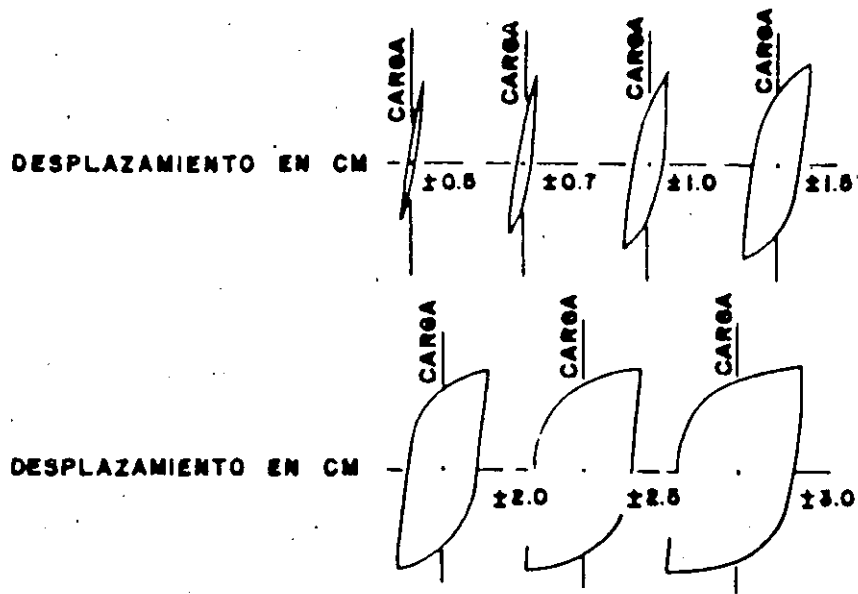


Fig. 4 Comportamiento histerético de los dispositivos en forma de U

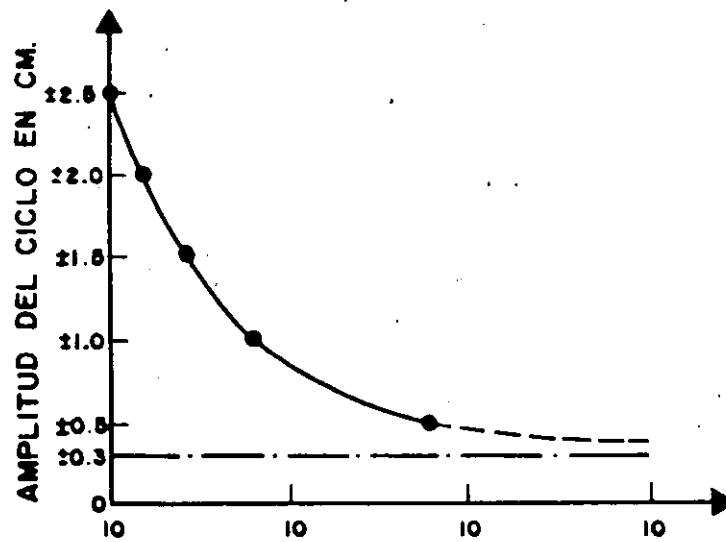


Fig. 5 Curva de fatiga de dispositivos U

1985 registrado en SCT, se obtuvieron resultados alentadores para la reducción de la respuesta en la zona blanda del Distrito Federal, sobre todo para la estructura de acero. Estudios posteriores del análisis paramétrico de un sistema de un grado de libertad con disipadores de energía y demandas de ductilidad de dos y cuatro, mostraron que el intervalo de aplicación de este sistema en la zona blanda de la ciudad, se limita a periodos de las estructuras inferiores a 1.6 seg (Gómez y col, 1993).

Urrego y col (1993) estudiaron la variación de la respuesta sísmica de marcos de concreto reforzado con tres crujías y diez niveles para diferentes ubicaciones de disipadores con respecto a la altura del edificio. Los resultados muestran la inconveniencia de colocar distribuciones de disipadores no simétricos.

Skinner y col (1975-a y b) y Skinner y McVerry (1975) estudiaron experimentalmente elementos sometidos a flexión en cantiliver, que se colocan en la cimentación como se muestra en la fig 6. Al ocurrir un desplazamiento relativo entre la superestructura y la cimentación se disipa energía debido al comportamiento histerético del cantiliver. Los ciclos son estables y sus parámetros fueron determinados experimentalmente por Skinner y col (1975-b). Por el lugar en que se colocan se pretende que se incorporen combinados con aisladores de base.

Kelly (1988) usó un dispositivo semejante al anterior en un edificio de la corporación Kajima en Japón, de tres niveles, construido sobre aisladores de base (fig 7). Los resultados analíticos mostraron que la respuesta es del orden de la tercera parte de la respuesta obtenida para la estructura original sometida a temblores con contenidos altos de frecuencias altas.

A este mismo tipo pertenece el dispositivo formado por una placa de sección trapecial (fig 8) usado en la base de una chimenea construida en Nueva Zelanda (Skinner y col, 1980). Los parámetros que determinan su geometría son proporcionados en gráficos que relacionan la altura de las placas con su espesor que se obtuvieron con base en pruebas

experimentales. Al sistema se adicionaron barras de acero dobladas (para permitir desplazamientos horizontales) que combinados con aisladores de base incrementan el amortiguamiento (fig 9). El comportamiento de la chimenea bajo las cargas reales a que se ha visto sometida no se ha publicado en la literatura.

El elemento que se muestra en la fig 10, usado en la construcción de un puente (Skinner y col, 1980), está formado por una barra circular de acero que se deforma, por la acción de dos brazos, hacia arriba y hacia abajo disipando energía por flexión; en la figura se muestran también los ciclos histeréticos del disipador que resultan casi rectangulares, lo que lo hace muy eficiente en la disipación de energía. Los dispositivos se colocaron entre la superestructura y el estribo de apoyo fijo.

Alonso (1989), Whittaker y col (1989), Schell (1990), Su y Hanson (1990-a y 1990-b) y Bergman y Hanson (1990) estudiaron un dispositivo compuesto por placas de acero, con sección transversal en forma de X (figs 11 y 12), llamadas ADAS (Added Damping and Stiffness). La variación de la sección transversal obedece a que al desplazarse un nivel respecto al otro, las placas se deforman en doble curvatura, así que, si se empotran las placas, se genera un diagrama de esfuerzos casi uniforme en todo el peralte que cambia de signo en el eje neutro. Esto ocasiona que el esfuerzo de fluencia se alcance prácticamente en todo el volumen al mismo tiempo. Se han probado también placas de sección transversal rectangular. Dado que la distribución de esfuerzos por flexión sigue siendo triangular, en este caso los esfuerzos de fluencia se alcanzan sólo en pequeñas zonas extremas lo que reduce radicalmente la disipación de energía con respecto a la sección transversal en forma de X.

Las placas ADAS se pueden colocar como se señala en las figs 13 y 14 en marcos y muros de rigidez con trabes de acoplamiento, respectivamente. El comportamiento histerético de las placas se muestra en la fig 15. Los dispositivos se sometieron a más de cien ciclos de carga y descarga, mostrando un comportamiento muy estable, sin degradación. De estos resultados se desprende la recomendación que en su diseño se consideren valores de ductilidad máxima de seis

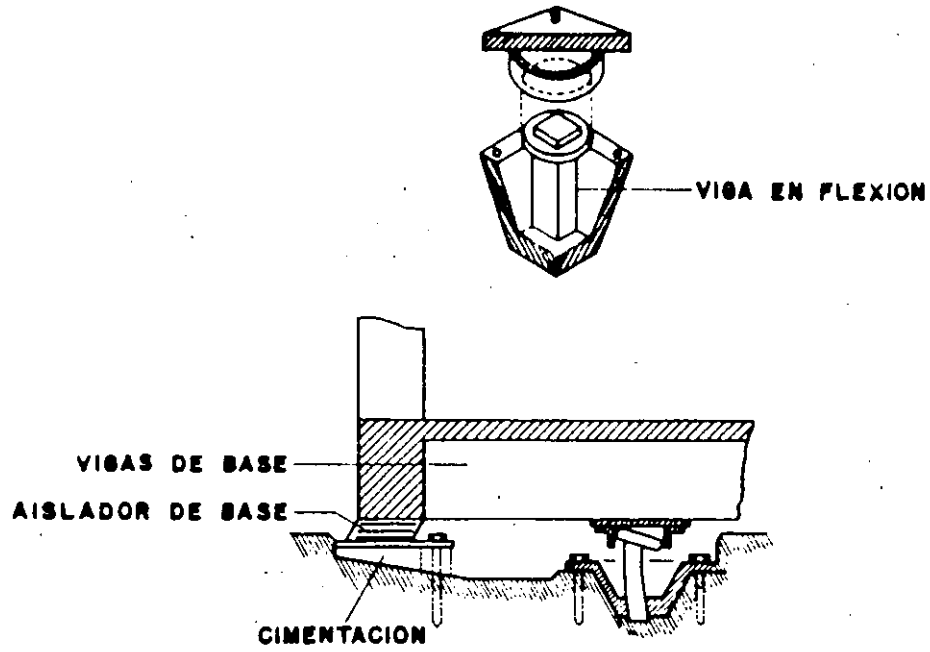


Fig. 6 Dispositivo a flexión

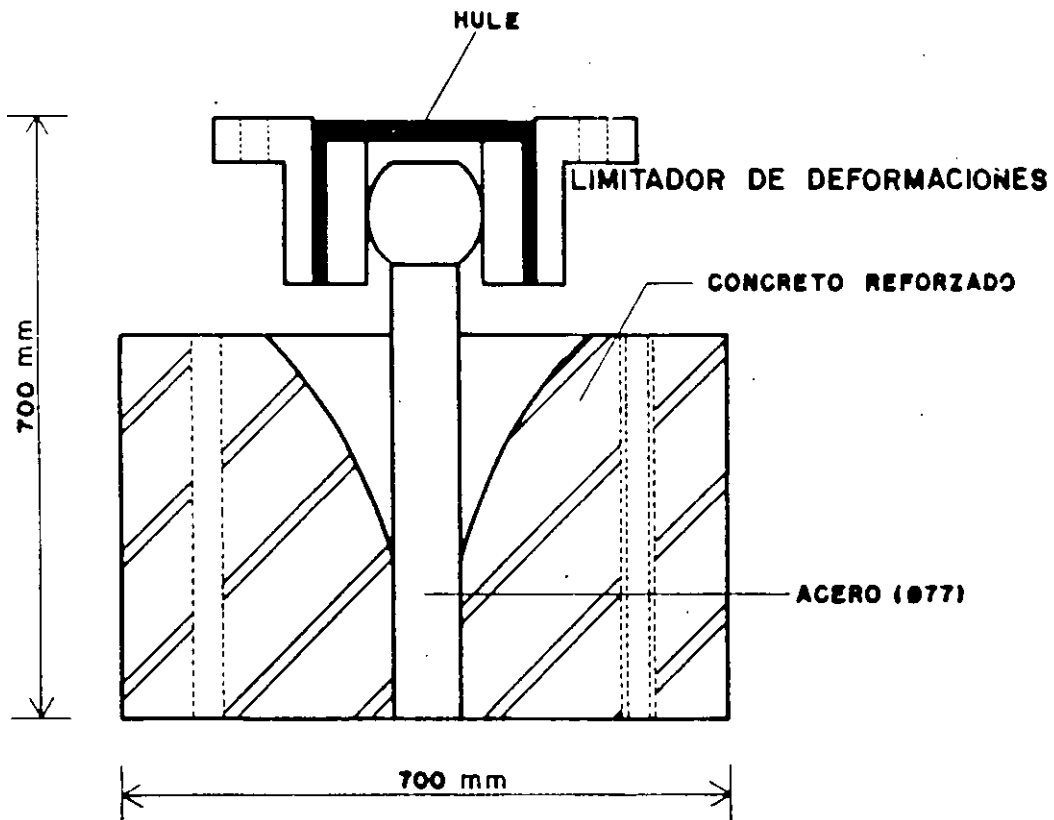


Fig. 7 Amortiguador hysterético de acero

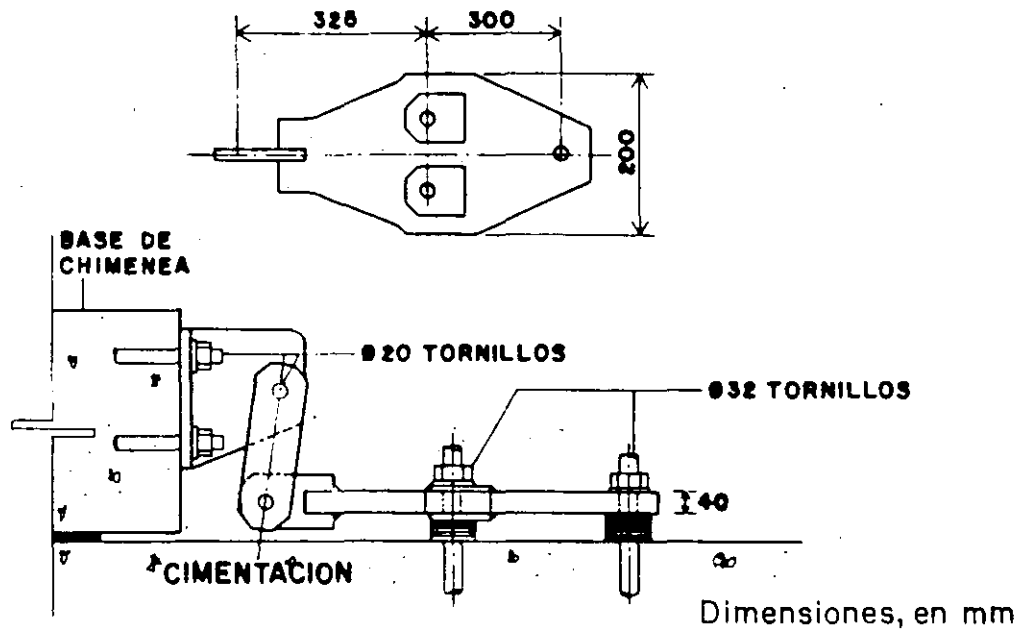


Fig. 8 Amortiguador en la base de una chimenea

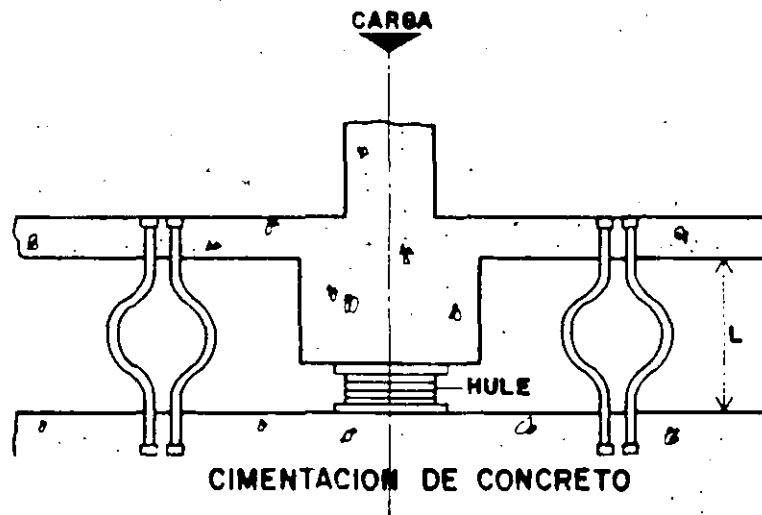


Fig. 9 Aislador de base y amortiguadores de barras dobladas

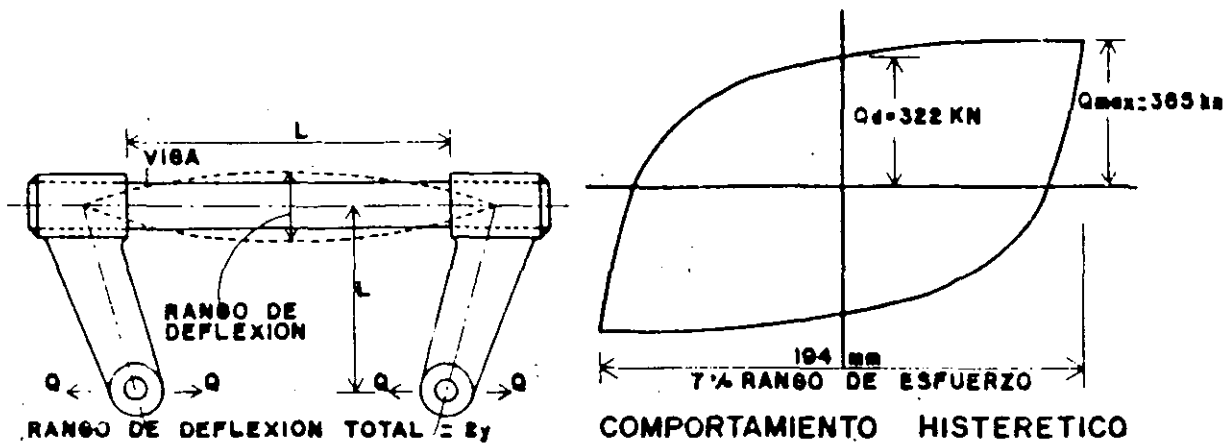


Fig. 10 Amortiguador de viga flexionante

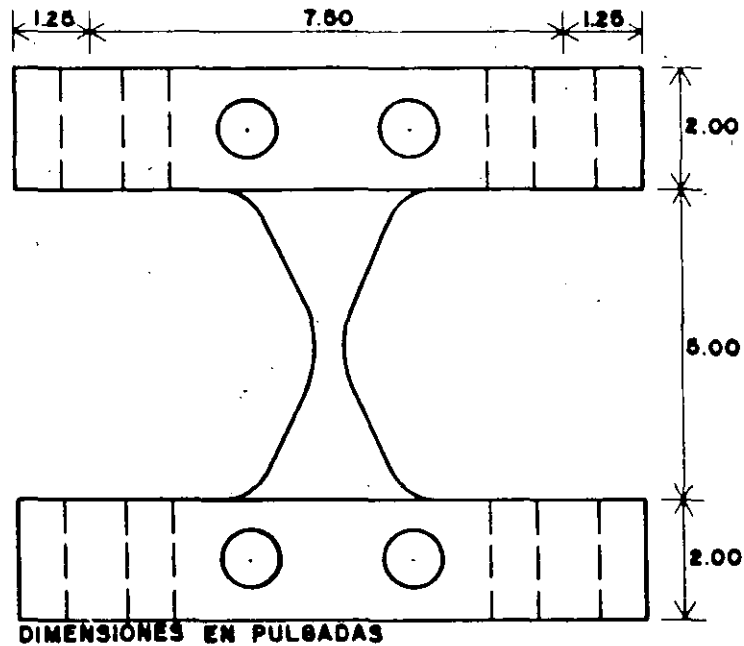


Fig. 11 Dispositivo adas

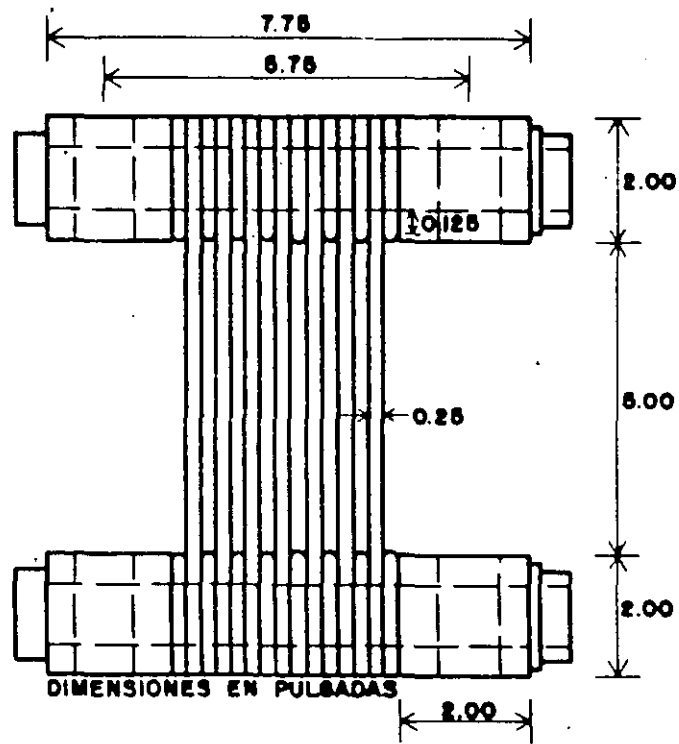


Fig. 12 Dispositivo adas del marco experimental en el primer nivel

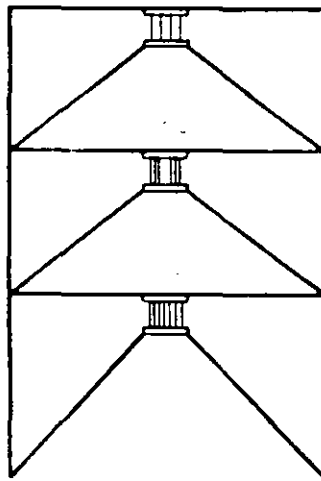


Fig. 13 Marco experimental con los dispositivos adas

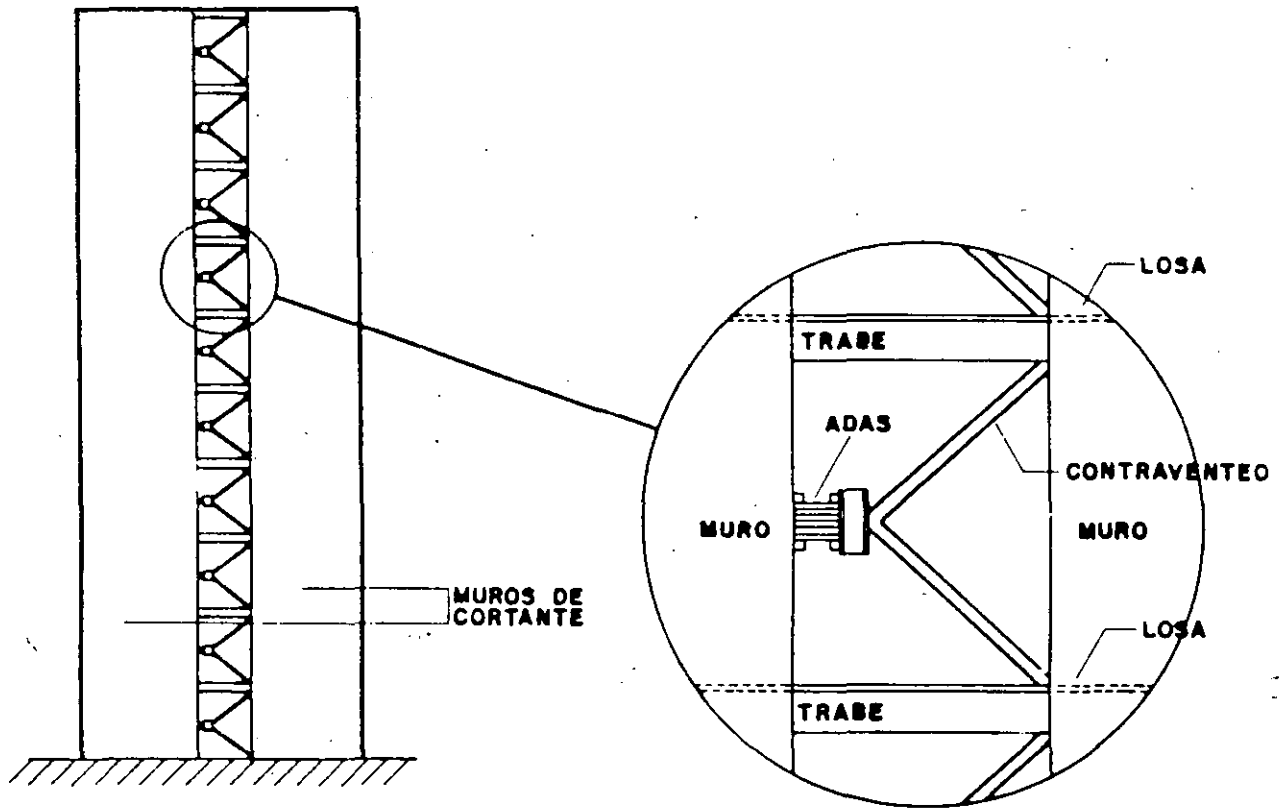


Fig. 14 Dispositivos adas en edificios con muros de cortante

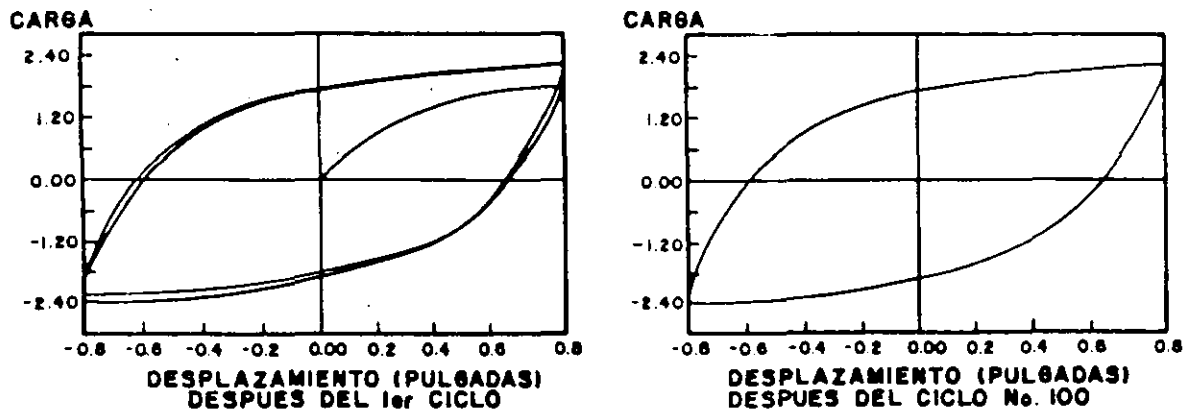


Fig. 15 Curvas de histéresis obtenidas experimentalmente

Estos dispositivos se usaron como solución estructural en la reparación de dos edificios de la ciudad de México dañados por los temblores de septiembre de 1985 (Martínez, 1990).

Tsai y col (1993) estudiaron una placa triangular (similar a la mitad de una placa de ADAS) llamada TADAS. Las placas se empotran en uno de sus lados a otra placa de acero que se conecta al nivel superior del entrepiso. En el vértice del triángulo se colocan pernos que se conectan a contravientos que parten del nivel inferior del entrepiso (fig 16). Este tipo de conexión ocasiona que las placas se deformen en curvatura simple. Al incorporar este sistema en un marco de acero a escala natural se pudo comprobar que las reducciones en la respuesta son similares a las obtenidas con ADAS. Sin embargo, de acuerdo con los autores, los resultados del modelo analítico del marco se acercan más al modelo experimental con este dispositivo debido a que la rigidez lateral de las placas, por la forma de conectarlas, se pre-

dice con menor incertidumbre que con las placas ADAS, en las que la rigidez es fuertemente dependiente de la conexión con las placas de apoyo. Esta dependencia se señala también en el estudio de Whittaker y col (1989).

Kobori y col (1992) estudiaron la respuesta experimental de placas de acero similares en sección transversal a los ADAS pero colocadas en su dirección perpendicular y unidas entre sí. Por el espacio que queda entre las placas, se le nombró de tipo panal (fig 17). Los ciclos histeréticos obtenidos son muy estables, con forma casi rectangular. Se realizó un estudio analítico de este sistema colocado entre un nivel y otro, a través de muros, en una estructura de 29 niveles. Las reducciones en la respuesta fueron de hasta un 40%. Adicionalmente, analizaron otro dispositivo de acero de sección circular variable empotrado en dos placas de acero (fig 18). Este dispositivo se analizó en el estudio analítico de una rampa de 98 m de altura máxima; la respuesta resultó 40% menor que aquella que se obtuvo sin incorporar la barra de acero.

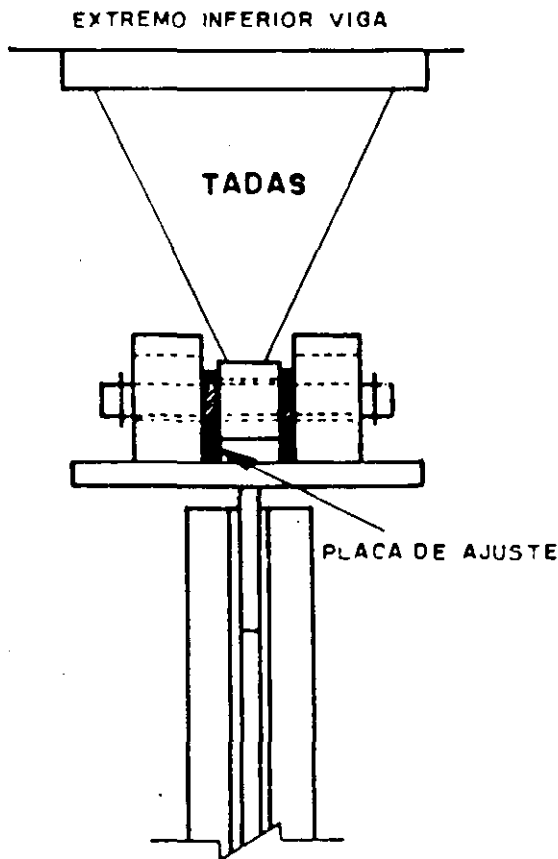


Fig. 16 Dispositivo Tadas

El comportamiento elastoplástico se logra también al someter una barra de acero a torsión (fig 19) (Skinner y col 1975-a y b, y Skinner y McVerry, 1975), que como sucede con los disipadores ADAS y en forma de U, alcanza el esfuerzo de fluencia al mismo tiempo en casi todo su volumen. La torsión se genera sobre la placa 5 al conectar los elementos 1 y 2 a la base y los brazos 3 y 4 a la cimentación. Este sistema fue usado en la construcción de un puente en Nueva Zelanda (Beck y Skinner, 1974).

Estudios posteriores (Kelly y col, 1977) muestran que una zona crítica en el diseño de estos elementos es la unión entre los brazos del dispositivo y la placa que trabaja a torsión. El estudio experimental consistió en probar un edificio de tres niveles provisto de aisladores de base (fig 20). Las vigas a torsión se comportan elásticamente, y se plastifican cuando la excitación sobrepasa cierto umbral, lo que modifica la rigidez del edificio en condiciones de servicio. Al disipar energía se incrementa también el amortiguamiento crítico equivalente, estimándose este en 30% para el modelo de tres niveles, lo que causa una fuerte reducción de la respuesta.

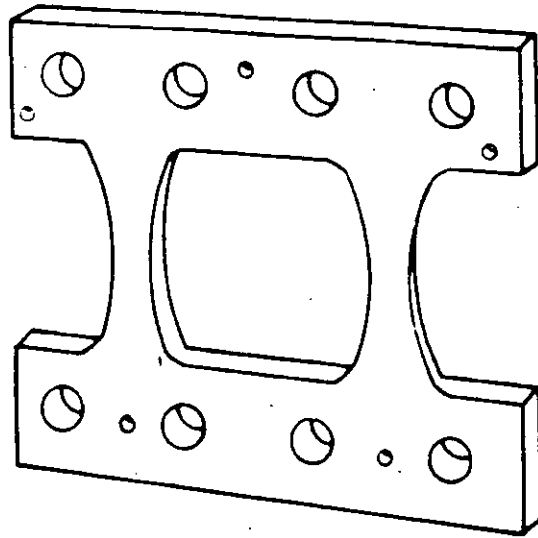


Fig. 17 Dispositivo tipo panel

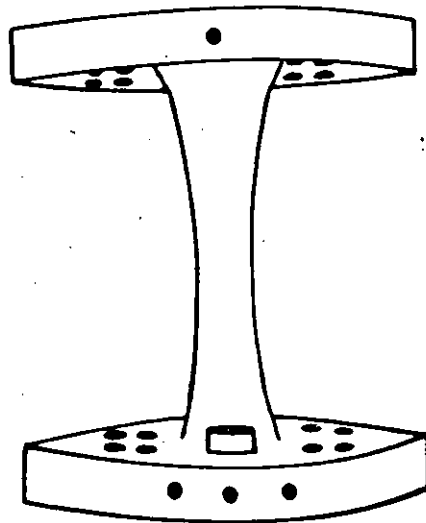


Fig. 18 Dispositivo de sección variable

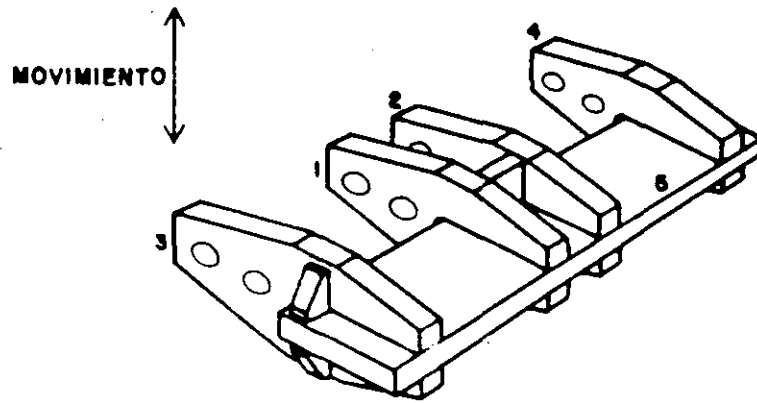


Fig. 19 Dispositivo a torsión

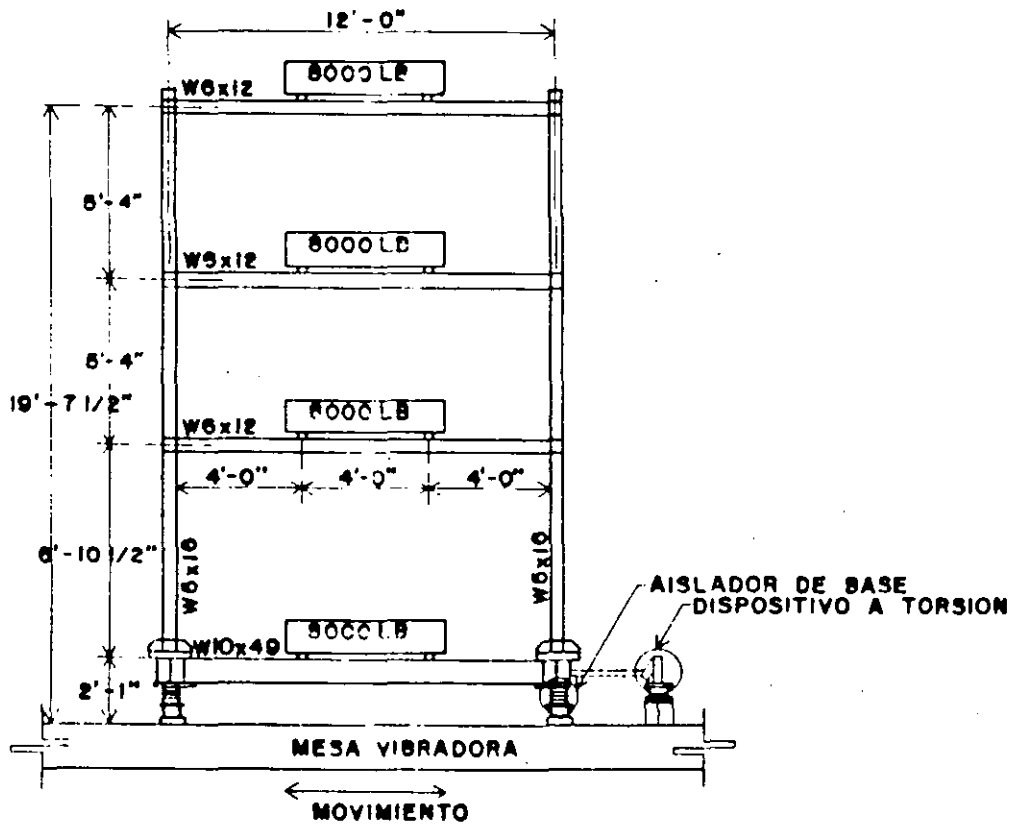


Fig. 20 Dimensiones del marco experimental

Medeot y Albajar (1992) hacen una descripción de los dispositivos incorporados en puentes y estudios llevados a cabo en Italia sobre estos sistemas. La mayor parte tienen forma y comportamiento similar a varios de los anteriores. Se hace mención también del buen comportamiento encontrado en sistemas híbridos.

Para que estos sistemas se usen en la práctica profesional, es necesario que se obtengan recomendaciones de diseño sencillas y de fácil aplicación. Con este propósito, School (1993) y Whittaker y col (1993) sugieren criterios generales que deben considerarse para el análisis de estructuras con disipadores de energía. La incorporación de estos dispositivos en los reglamentos actuales requiere que se continúe con estudios experimentales y analíticos que permitan contar con un mayor número de resultados en qué fundamentar las propuestas.

Otra forma promisoría de reducción de la respuesta con comportamiento elastoplástico, pero ahora en la estructura misma, sin necesidad de dispositivos especiales, consiste en colocar una barra diagonal desde el nudo del nivel inferior hasta a un punto distante del nudo del nivel superior, o dos barras desde los nudos del nivel inferior al centro de la viga superior sin que se conecten al mismo punto, como se muestra en la fig 21. Esto ocasiona que la parte de la viga ubicada entre la barra y el nudo o entre las dos barras fluya por cortante y disipe energía. Por la manera en que se conectan los elementos diagonales, a este sistema se le denomina de contravientos excéntricos (Ricles y Popov, 1987; Popov y col 1989, y Ricles y Bolin, 1990).

b) Disipación por extrusión

En estos sistemas, la disipación se logra al deformar un material en su sección transversal. Esto ocurre cuando se mueve el material disipador dentro de un tubo de sección variable (fig 22). El sistema fue propuesto inicialmente por Robinson y Greenbank (1975 y 1976) y Robinson y Cousins (1987) para su uso en la construcción de dos puentes en Nueva Zelanda.

El dispositivo está formado por un tubo de acero con plomo en su interior. Al deformarse

el plomo se disipa energía, y, al recuperar su sección original, se recristaliza y recupera sus propiedades iniciales. El dispositivo fue sometido a ciento veintitres ciclos de carga y descarga con ciclos histeréticos casi rectangulares y sin degradación apreciable (fig 23).

c) Disipación por fricción

Los disipadores por fricción consisten en colocar dos placas en la intersección de contravientos en forma de cruz, de manera que al desplazarse lateralmente la estructura produzca esfuerzos de fricción por el contacto entre las placas.

El sistema mostrado en la fig 24 fue desarrollado por Pall y Marsh (1982). Se conecta con barras al marco y disipa energía por fricción, al desplazarse una diagonal con respecto a la otra. El diseño busca evitar el deslizamiento bajo cargas de servicio, lo que da rigidez adicional al marco y, al sobrepasar un umbral, se inicia la disipación de energía por fricción. Estudios posteriores de este sistema se encuentran en Pall (1984) y refinamientos en su modelación analítica en Filiatrault y Cherry (1987 y 1990) y Filiatrault y col (1990). El comportamiento de los dispositivos se muestra en la fig 25.

La incorporación de este dispositivo en estructuras de hasta diez niveles en Canadá se menciona en Pall y Pall (1993). La modelación analítica de estas edificaciones muestra que los desplazamientos laterales de los marcos con los disipadores son del orden de la tercera parte de los marcos solos, al ser sometidos a los registros sísmicos utilizados en el estudio.

Scholl (1984) estudió un dispositivo desarrollado por Oiles Industry Co., Ltd of Tokio, Japón, formado con acero y hule (fig 26). Se coloca, al igual que el anterior, en la intersección de contravientos. El estudio experimental de un marco de un nivel con estos elementos, muestra incremento en el amortiguamiento y modificación en la rigidez con respecto al marco sin dispositivos. La principal desventaja es su costo comparativo con otros sistemas.

Nims y col (1993) determinaron la respuesta analítica de un marco de seis niveles escala 1/3

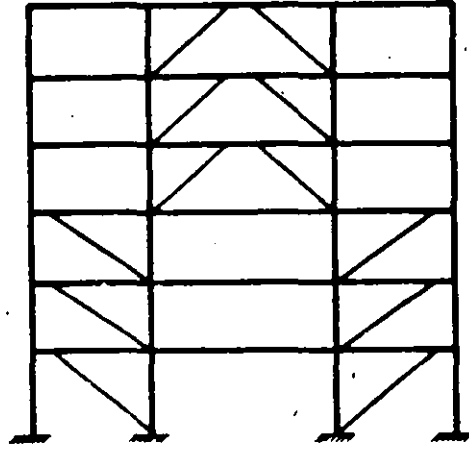


Fig. 21 El marco con contraventeos excéntricos.

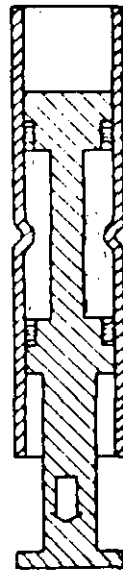


Fig. 22 Disipador por extrusión

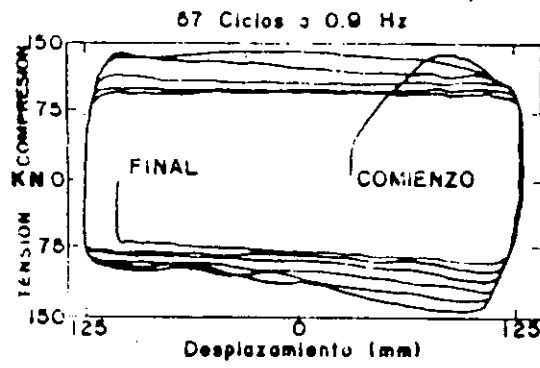


Fig. 23. Comportamiento histerético del disipador por extrusión

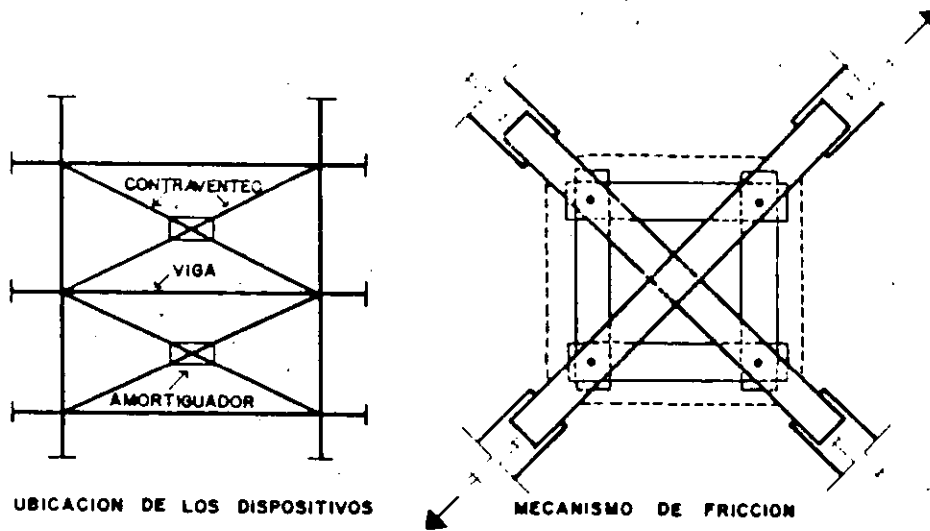


Fig. 24 Disipador de energía por fricción

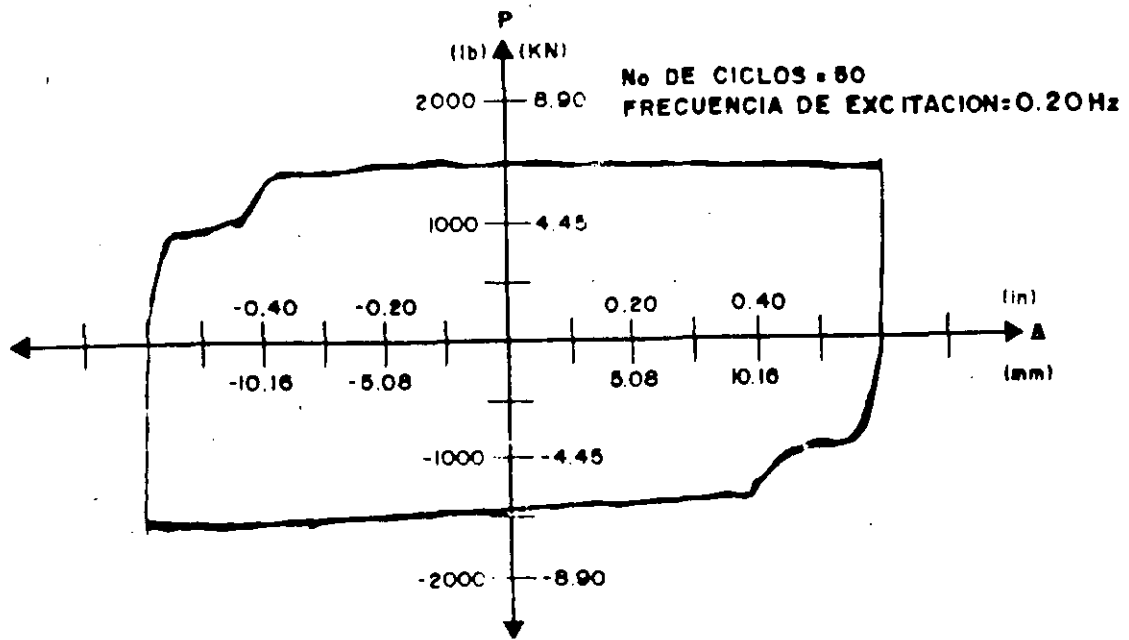


Fig. 25 Comportamiento histerético del dispositivo de fricción

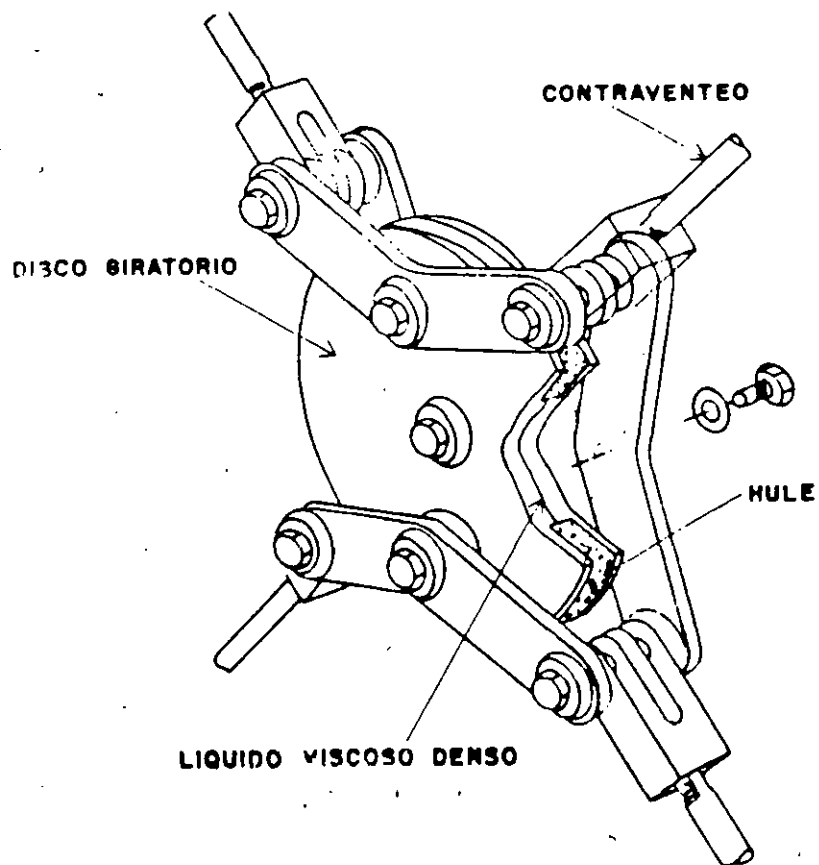


Fig. 26 Disipador de energia

• (Las alturas límite indicadas en la figura corresponden a edificios construidos en zonas donde las fuerzas horizontales de diseño son ^{producidas por} ~~debidas a~~ viento; en zonas sísmicas son, en general, menores; la ductilidad del sistema, de enorme importancia en diseño sísmico, es mucho menos crítica cuando el diseño es por viento/

Marcos rígidos.

Los marcos rígidos tridimensionales, formados por un conjunto de vigas y columnas, constituyen un sistema estructural eficiente para edificios de altura pequeña o media, hasta unos 10 ó 12 pisos. En edificios destinados a habitación no suele justificarse su empleo como únicos elementos resistentes, pues por requisitos de funcionamiento se cuenta con gran número de muros, que separan unas habitaciones de otras, colocados en las mismas posiciones en todos los niveles, que pueden utilizarse con ventaja, solos o en combinación con los marcos. En cambio, los edificios de oficinas carecen casi por completo de divisiones de carácter permanente, por lo que en ellos sí puede convenir utilizar ~~los~~ marcos rígidos como único sistema estructural, pues proporcionan la máxima libertad de planeación y operación.

Los marcos rígidos constituyen una solución adecuada en edificios de poca o mediana altura que se van a construir en zonas sísmicas porque, además de proporcionar la resistencia necesaria ante cargas verticales y horizontales de una manera económica, permiten obtener estructuras de ductilidad elevada, capaces de incursionar en el intervalo inelástico bajo solicitaciones sísmicas intensas, disipando una parte importante de la energía que les transmite el terreno sin sufrir daños, o experimentando desperfectos locales, de pequeña cuantía y fácil reparación.

~~Los marcos rígidos~~ Bien diseñados, detallados y construidos, tienen un comportamiento dúctil estable bajo cargas cíclicas ~~que los hacen trabajar~~ fuera del intervalo elástico, y la mayor parte de los códigos de construcción los consideran sistemas estructurales preferenciales, para los que especifican cargas laterales menores que las correspondientes a otros sistemas.

Es una práctica aceptada generalmente la de que el dimensionamiento de los miembros que componen los marcos rígidos se haga de manera que las articulaciones plásticas se formen en las vigas antes que en las columnas, con lo que se logra que las deformaciones plásticas más importantes se concentren en zonas que pueden

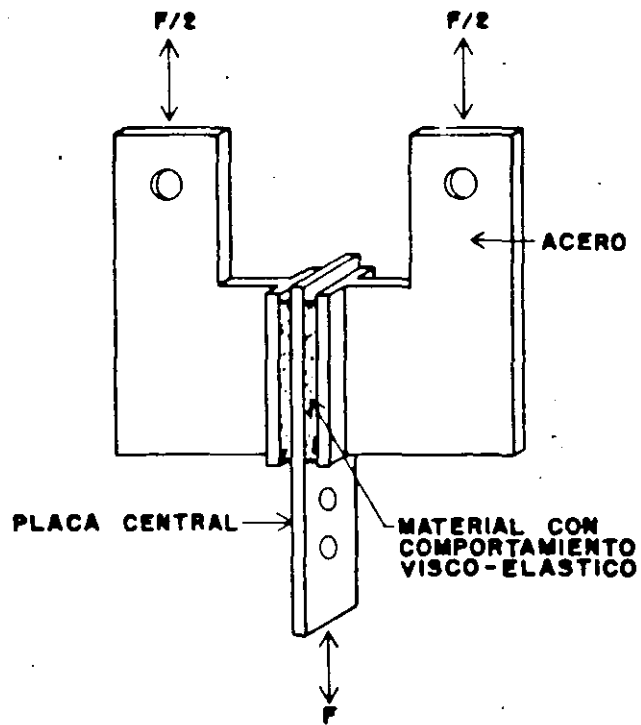


Fig. 27 Disipador con comportamiento viscoelástico

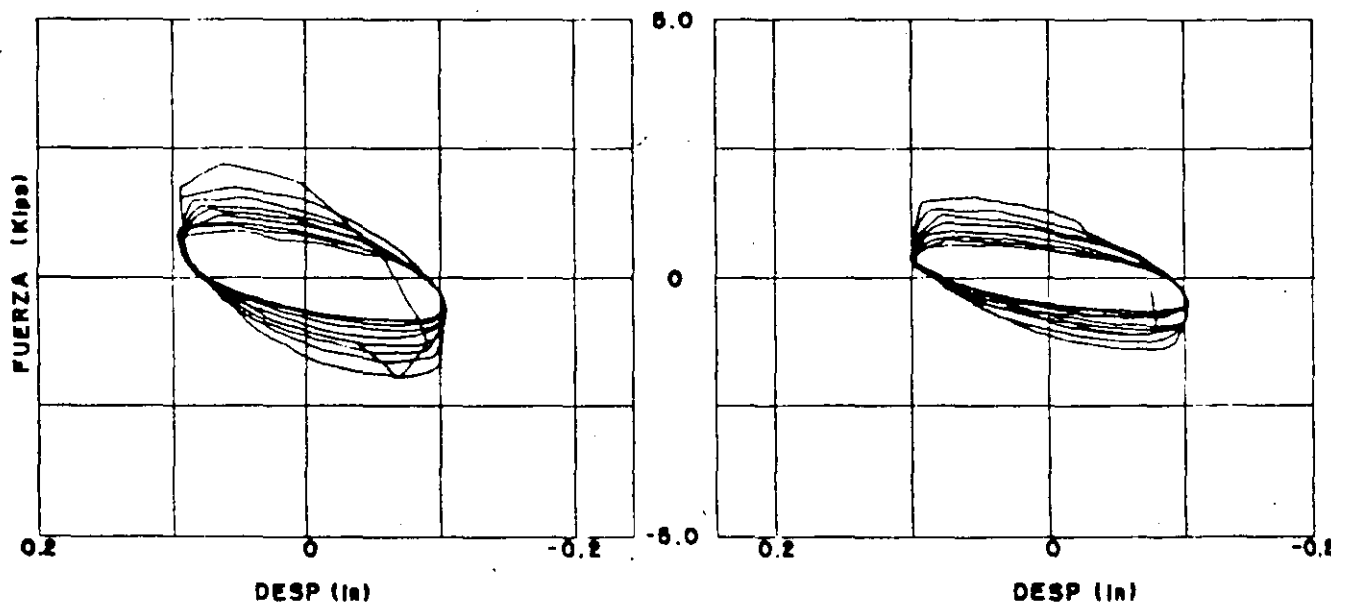


Fig. 28 Comportamiento histerético del disp. vivo viscoelástico

que cuando los claros crecen tienen que utilizarse vigas de peralte considerable para controlar los desplazamientos. El peralte económico aumenta en los pisos inferiores, en los que la fuerza cortante es mayor, y en edificios de cierta altura excede del permitido por requisitos arquitectónicos o funcionales, lo que obliga a utilizar secciones más pesadas; ésta es una de las causas principales de la ineficiencia de los marcos rígidos. Además, si los desplazamientos se controlan aumentando las dimensiones de las vigas éstas se hacen más resistentes que las columnas, lo que está en contra de la hipótesis, generalmente aceptada, de que en zonas sísmicas conviene que tengan una resistencia menor.

La relación altura/ancho total del edificio es también de la mayor importancia en la eficiencia de los marcos rígidos, ya que cuando el ancho es grande aumenta el número de crujías. Los marcos de la periferia del inmueble pueden ser más eficientes que los interiores si el proyecto arquitectónico permite disminuir la separación entre sus columnas y aumentar el peralte de las vigas.

~~Las conexiones~~ ^{uniones rígidas} aumentan el costo, ~~de los marcos rígidos,~~ por este motivo, un sistema estructural popular en Estados Unidos es el formado por marcos rígidos colocados sólo en la periferia del edificio, mientras que el resto de la estructura tiene juntas flexibles; disminuye así sustancialmente el número de conexiones rígidas, pero aumenta el grueso de las paredes de los elementos que han de unirse entre sí, puesto que el sismo es resistido por sólo dos marcos en cada dirección, crecen las dificultades para hacer buenas soldaduras y disminuye la hiperestaticidad del sistema. Las fallas de soldadura de penetración completa entre los patines de vigas y columnas registradas durante el temblor de Northridge, California, del 17 de enero de 1994, se han achacado, al menos en parte, a los problemas creados al soldar placas muy gruesas, originados por el sistema estructural mencionado.

En edificios altos, en los que ^{predominan} las solicitaciones producidas por viento o sismo, ~~se vuelven predominantes~~ el marco rígido convencional deja de ser una solución adecuada, pues para darle la resistencia y rigidez necesarias se requieren vigas y columnas de dimensiones y costo excesivos. En esos casos conviene utilizar elementos estructurales adicionales, muros de rigidez o contraventeos, que resistan las fuerzas horizontales más eficiente y económicamente.

El uso de los elementos mencionados hace que el marco rígido deje de ser indispensable pues la estructura de soporte de un edificio puede construirse con

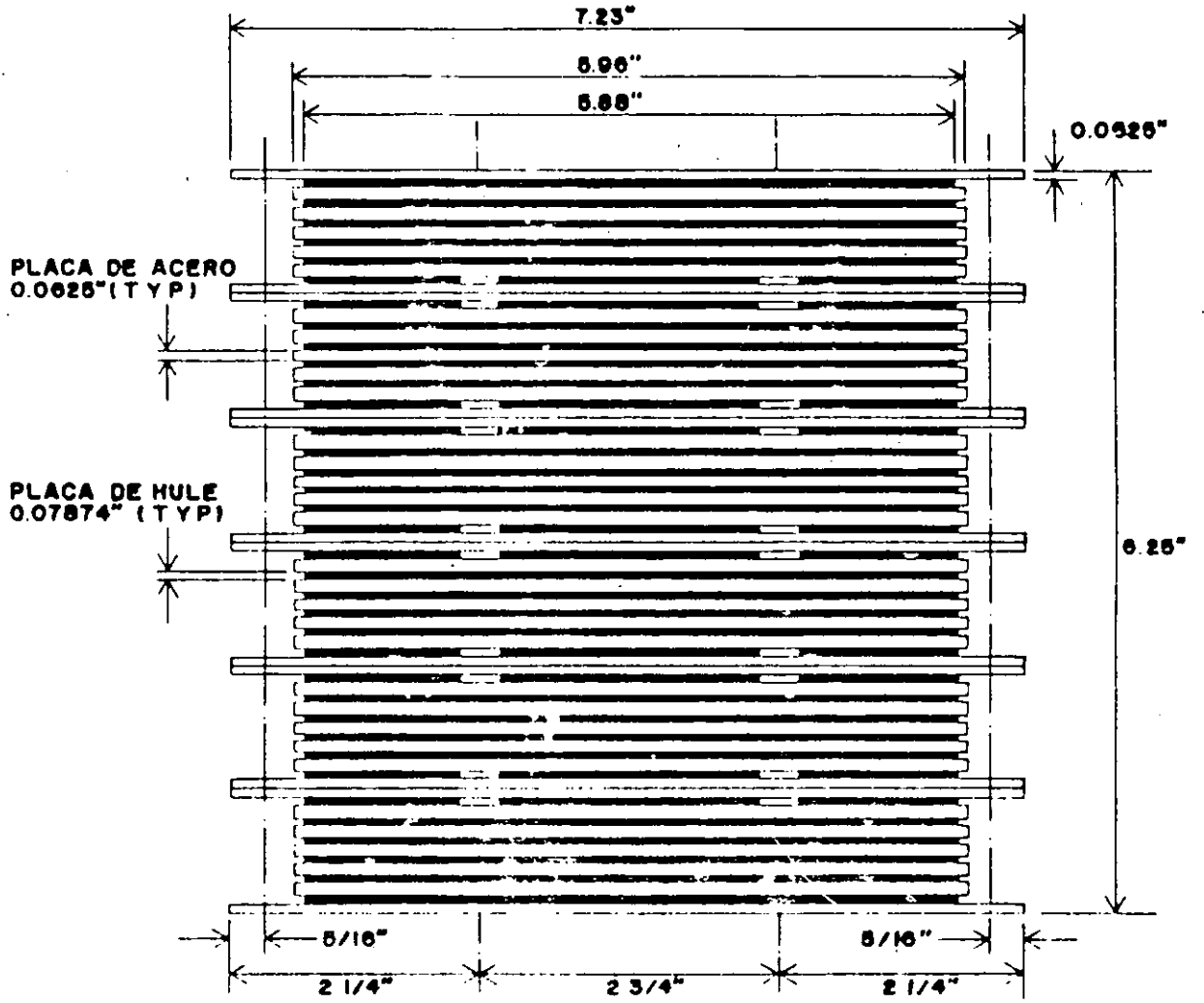


Fig. 29 Aislador de base

eléctrico y de teléfonos) y en los muros de lindero del edificio, y se combinan con marcos rígidos.

— Sigue pág. 42 —

Contraventeos excéntricos.

En la Fig. ^{6.6} se muestran cuatro marcos provistos de otros tantos tipos de contraventeos excéntricos. Las fuerzas axiales que aparecen en las diagonales, como un resultado de las acciones sísmicas, se transmiten a las columnas o a otras diagonales a través de un tramo corto de viga, llamado "eslabón activo", que trabaja en flexión y cortante. Escogiendo adecuadamente su geometría puede lograrse que un marco contraventeado excéntricamente tenga una rigidez elástica muy cercana a la de marcos similares provistos de contraventeos concéntricos y que, por otro lado, los eslabones activos se deformen inelásticamente durante temblores severos, absorbiendo y disipando energía de una manera análoga a la de los marcos rígidos no contraventeados. Se obtiene así un sistema estructural que posee características favorables de los dos sistemas, y que puede satisfacer, en forma eficiente, los dos requisitos de rigidez y ductilidad característicos del diseño sísmico.

La capacidad de los eslabones activos de disipar grandes cantidades de energía durante sobrecargas extremas es de importancia crítica para la ductilidad de conjunto del sistema estructural; se ha encontrado, por medio de estudios de laboratorio, que los eslabones que fluyen principalmente en cortante son más eficientes que los que fluyen en flexión.

La elección de las excentricidades constituye uno de los pasos más importantes en el diseño de marcos contraventeados excéntricamente, pues de sus valores depende tanto la rigidez elástica del marco como la demanda de ductilidad en los eslabones activos.

En resumen, los marcos contraventeados excéntricamente son estructuras dúctiles en las que las deformaciones inelásticas se confinan a regiones en las que no afectan de manera adversa la resistencia y estabilidad de conjunto de la estructura.

Los contraventeos, las columnas y las vigas, estas últimas en las zonas que no forman parte de los eslabones activos, se diseñan para que permanezcan en el intervalo elástico, y no se pandeen; prácticamente toda la actividad inelástica se

aislador son mucho más amplias que las obtenidas con hule normal.

Al usar las propiedades calculadas en Lee y Medland (1978-a), dichos autores (1978-b) estudiaron varias estructuras de seis niveles sometidas a 19 tipos de temblores con y sin aisladores. Los resultados muestran reducciones de la respuesta de hasta 80%, con respecto a la estructura sin aisladores. Los autores dan también algunas recomendaciones de diseño para estructuras aisladas.

Megget (1978) realizó el estudio del primer edificio aislado en Nueva Zelanda. Consta de cuatro niveles con estructuración de marcos de concreto reforzado (fig 32). Para protegerlo, se usaron aisladores con corazón de plomo (Robinson y Tucker, 1977). El diseño se realizó con dispositivos lo suficientemente rígidos, para que el plomo se comportara elásticamente ante las máximas fuerzas esperadas producidas por viento. El costo de los aisladores representó el 3.5% del costo total del edificio y se estimó similar al costo requerido del edificio sin aisladores, para soportar las mismas acciones de diseño.

Kelly y col (1980) estudiaron un marco de acero de cinco niveles con aisladores de base, a escala 1/3, en el laboratorio de la Universidad de California en Berkeley. Se adicionó un sistema de seguridad que entra en funcionamiento al presentarse la falla de los aisladores y consiste en apoyos adicionales que disipan energía por fricción y limitan los desplazamientos, aunque incrementan las aceleraciones transmitidas a la estructura.

Tyler y Robinson (1984) encontraron satisfactorio el comportamiento de aisladores de base con corazón de plomo para deformaciones unitarias por corte mayores del 100%. Estudios posteriores que corroboran el buen comportamiento del aislador, para un gran número de ciclos de carga (Rodwell y col, 1990).

Fujita (1985) hizo una revisión de los sistemas desarrollados en Japón para aislar equipos. Los sistemas se han combinado con amortiguadores de aceite y fricción y/o disipadores.

Constantinou y Tadjbakhsh (1984) muestran las ventajas del uso de aisladores de base en un estudio analítico mediante la teoría de vibraciones aleatorias y modelaron la excitación como un proceso no estacionario. Esta modelación permitió analizar un gran número de casos; se concluye que los desplazamientos y fuerzas cortantes se reducen de manera muy importante al incorporar los aisladores.

Con la finalidad de contar con métodos que permitan probar un mayor número de estructuras con aisladores de base, Tagami y col (1990) desarrollaron un método de prueba pseudo-dinámico, para el análisis de estructuras aisladas al recurrir a técnicas de subestructuración.

El efecto de la aceleración vertical, en un sistema de dos masas, sobre la respuesta de aisladores que disipan energía por fricción, fue estudiado analíticamente, por Lin y Tadjbakhsh (1986). Los resultados bajo carga armónica muestran incrementos en la fricción y los desplazamientos relativos al incorporar la aceleración vertical. Sin embargo, su influencia fue prácticamente nula al someter al sistema al sismo de El Centro, de 1940.

Kelly y col (1986) estudiaron la superestructura de un puente sobre aisladores con y sin corazón de plomo. El aislador con plomo resulto efectivo para disipar energía y limitar los desplazamientos laterales. Encontraron también adecuado el método lineal equivalente, para el análisis de la estructura.

Para el diseño de aisladores, se ha iniciado el desarrollo de criterios que permiten obtener recomendaciones prácticas como las de Priestley y col (1977), Kelly y col (1986), Mehrain y Clayton (1987), Chalhoub y Kelly (1990), Kelly (1990), Mayes y col (1990), Kuntz (1990) y Griffith y col (1990-b).

Tadjbakhsh y Lin (1987) estudiaron el uso de aisladores con fricción proporcional al desplazamiento. La variación en la fricción se logra mediante la colocación de dos cables que producen un incremento de la fuerza axial sobre las placas al desplazarse lateralmente los aisladores. Los resultados muestran que el incremento de fricción reduce la respuesta de manera importante.

concentra, ~~pues~~, en zonas escogidas, diseñadas y detalladas especialmente. El resto de la estructura se dimensiona para que resista, trabajando elásticamente, las sollicitaciones que aparecen en ella mientras los eslabones activos fluyen plásticamente, las que se determinan estudiando el mecanismo de colapso del marco; posteriormente se revisa su comportamiento bajo cargas de trabajo, utilizando métodos elásticos.

Tubos reticulares. Si se incrementa la resistencia de los marcos de las fachadas, colocando columnas muy juntas y aumentando los peraltes de las vigas, y se hacen continuos en las esquinas, se obtiene un cantiliver tubular de paredes perforadas, que es muy eficiente para resistir fuerzas horizontales.

En la Fig. ^{6.3 aparece} ~~(Fig. 16, pág. 655, "Constructional...")~~ se muestra la distribución de fuerzas normales en las columnas. Si las paredes del tubo fueran macizas, serían iguales en todas las columnas de los marcos de "los patines", y tendrían una distribución triangular en las columnas de "las almas"; sin embargo, las deformaciones por cortante de los marcos rígidos reales reducen la eficiencia del cantiliver. Debe buscarse ^{el} ~~un~~ comportamiento ~~lo~~ más cercano posible al del voladizo de paredes macizas; ^e ~~suelo~~ lograrse que la deformación por cortante no exceda del 25% de la total.

Tubos con diagonales. El tubo con diagonales en las fachadas constituye una solución muy apropiada para estructuras de acero. En el sistema tubular ideal todas las columnas exteriores se interconectan por medio de diagonales, de manera que se forma ^{acciones} una estructura tridimensional muy rígida, que resiste las ~~fuerzas~~ laterales con las fuerzas axiales que se generan en los miembros, en vez de utilizar su resistencia a la flexión.

Comparado con el tubo reticular, este sistema tiene la ventaja de que permite separaciones mucho mayores entre las columnas de las fachadas.

Los tubos con diagonales resisten las fuerzas horizontales de manera muy eficiente, pero pueden no ser adecuados para zonas de alta sismicidad, porque su ductilidad es limitada. Sin embargo, pueden combinarse con marcos rígidos dúctiles, o interconectarse por medio de elementos de ductilidad suficiente (Fig. ^{6.9} ~~18~~, ~~pág. 669, "Constructional...")~~).

Anderson y Saunders (1987) estudiaron el uso de aisladores en la reparación y en el reforzamiento de edificios antiguos. Los elementos mecánicos y desplazamientos obtenidos bajo acciones sísmicas, corrobora los resultados de otros investigadores, con relación a los porcentajes de reducción de la respuesta.

Andriano y Carr (1987) colocaron aisladores de base en estructuras de muros de concreto. Comprobaron, con buenos resultados, la aproximación del método lineal equivalente y la distribución de fuerzas propuesta por Priestley y col (1977).

Constantinou y col (1987) determinaron experimentalmente la variación de la fricción en una interfase de teflón con acero. La fricción se incrementó al crecer la aceleración y disminuyó al aumentar la presión sobre las placas. Para frecuencias de la estructura menores a 0.5 Hz. y presiones bajas, el sistema proporciona un aislamiento eficiente para temblores moderados y grandes. Para otras combinaciones se carece de estudios experimentales que muestren el comportamiento.

Mokha y col (1990-a y b) realizaron estudios experimentales de aisladores con superficies de teflón. Determinaron que este material reduce la transferencia de frecuencias altas a la estructura por la dependencia de la fricción con la velocidad de deslizamiento. Con base en estos estudios se dan propuestas para el modelado analítico de este material.

Kelly (1981) e Konolmou (1982) proponen la sustitución de las placas de acero por teflón en los aisladores de base. El sistema cuenta con una varilla de acero que conecta la superestructura con la subestructura diseñada para fallar cuando las fuerzas producidas por el temblor exceden de cierto umbral (fig 33).

Griffith y col (1988) estudiaron un modelo experimental de siete niveles, escala 1/5, estructurado con muros de concreto sobre aisladores de base formados de placas de acero y hule. El modelo fue sometido a varios temblores entre los que se encuentra la componente E-W de la estación SCT del temblor del 19 de septiembre de 1985 de México. Ante la acción de temblores de gran magnitud la

estructura se separó de los apoyos. Para evitar tal separación Griffith y col (1990-a) proponen un aislador con un dispositivo en el centro que le permite trabajar en tensión y reducir los desplazamientos (fig 34). La efectividad del dispositivo se comprobó al estudiar un modelo de nueve niveles sometido a varios temblores.

Nagarajah y col (1989) desarrollaron un programa de computadora para analizar estructuras aisladas tridimensionalmente. Calibraron los resultados con estudios experimentales de otros investigadores. Posteriormente Nagarajah y col (1990) aplicaron este programa y demostraron que el comportamiento biaxial tiene mayor importancia en los aisladores con fricción que en los aisladores con corazón de plomo.

Un aspecto poco estudiado es el relacionado con la fatiga de los aisladores. Roeder y col (1990) realizaron varias pruebas de laboratorio con aisladores de hule y acero para determinar la importancia de los parámetros que intervienen en el fenómeno. De acuerdo con los resultados, la variación de la temperatura y la amplitud de los ciclos de histéresis son las variables que más contribuyen al fenómeno, que puede llegar a ser un aspecto importante en el diseño.

Zayas y col (1990) y Bozzo y col (1990) proponen un sistema de aislamiento de superficie cóncava basado en el movimiento de un péndulo. La fuerza restitutiva es proporcionada por la forma del dispositivo. El material con que se fabrica es acero y en la zona de deslizamiento cromo (fig 35). Por la geometría del aislador, el periodo no depende de la carga vertical aplicada y su rigidez es directamente proporcional a la carga lo que hace que las torsiones provocadas por concentraciones de masa en la estructura disminuyan en el nivel de aislamiento. Su comportamiento histerético se muestra en la fig 36. Su principal desventaja es que el cromo (similarmente al teflón) se adhieren con el tiempo.

En México a mediados de los 60, el Ing Manuel González Flores (1964) desarrolló un sistema de aislamiento de base con placas de acero y balines (fig 37). El aislador fue incorporado en dos edificios de cinco niveles que hasta la fecha han mostrado buen comportamiento. Su principal limitación se

Un parámetro muy importante para determinar los límites de aplicación de un sistema dado ~~es el constituido por~~ ^{son} las tensiones (o fuerzas "hacia arriba") que aparecen en las columnas, sobre todo en ~~su~~ ^{el} tramo inferior. Un edificio puede rigidizarse de manera que sus desplazamientos laterales se conserven dentro de los límites de diseño, pero al hacerlo es posible que una parte del sistema resistente "atraiga" fuerzas horizontales de magnitud tal que aparezca en ella un momento de volteo ~~tan grande~~ que origine fuerzas de tensión en la cimentación, cuya capacidad para soportar fuerzas hacia arriba suele ser reducida; este fenómeno puede limitar la aplicación de un sistema estructural determinado.

En edificios muy esbeltos es frecuentemente necesario transferir cargas verticales de las columnas interiores a las de la periferia, para contrarrestar las fuerzas hacia arriba.

La primera frecuencia de vibración transversal en cada dirección y la frecuencia torsional tienen una influencia considerable en el comportamiento de los edificios altos. Es preferible que los periodos correspondientes estén separados uno de otro cuando menos en 15%, y que el torsional sea el tercero. Se evitan así acoplamientos dinámicos de los modos, que pueden ocasionar una respuesta inconveniente.

Los periodos fundamentales de vibración del edificio deben estar suficientemente separados del periodo del terreno, para evitar posibles fenómenos de amplificación por resonancia.

Una suposición básica en el análisis y diseño sísmico de edificios altos es ~~la de~~ que los sistemas de piso, actuando como diafragmas, transfieren las fuerzas horizontales a los elementos resistentes y las distribuyen entre ellos en proporción a sus rigideces laterales. Los esfuerzos en los diafragmas de edificios normales son pequeños, y pueden ser resistidos, sin problemas, por el sistema de piso. Sin embargo, deben revisarse las zonas en que haya cambios bruscos de rigidez lateral, y cuando las cortantes horizontales se transfieren de un elemento resistente a otro que no se encuentra en el mismo plano vertical. Los esfuerzos en los diafragmas pueden ser también críticos cuando hay en ellos aberturas de dimensiones considerables.

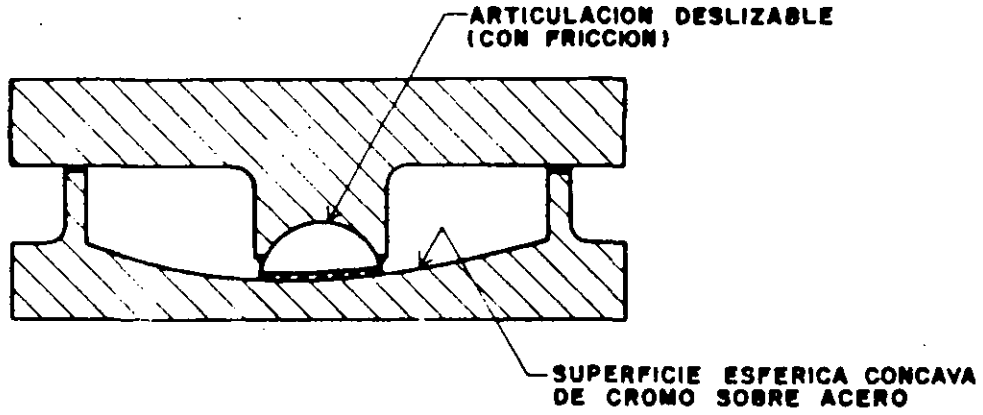


Fig. 35 Péndulo de fricción

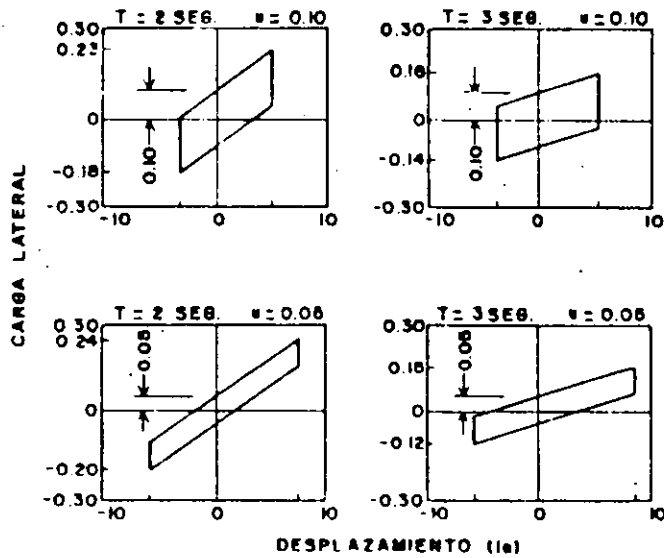


Fig. 36 Comportamiento histerético

desplazamientos lineales o angulares relativos entre los extremos de las barras que concurren en ^{ellas,} ~~cada nudo~~; para que el comportamiento de la estructura real corresponda al supuesto, no basta con analizar y diseñar vigas y columnas con gran exactitud, sino se requiere también que las uniones entre ellas se diseñen y construyan de manera que se satisfaga esa suposición.

Hasta hace pocos años las ~~conexiones~~ ^{uniones} se trataban, en general, como si no tuviesen dimensiones, como si fuesen el punto de intersección de los ejes de las barras que concurren en ellas; si se consideraban las dimensiones, se suponía que eran indeformables. La realidad es otra: las ~~conexiones~~ ^{uniones} son elementos estructurales deformables de dimensiones finitas; sus deformaciones, sobre todo las producidas por las fuerzas cortantes en el tablero limitado por los bordes interiores de los patines de vigas y columnas, pueden influir de manera significativa en la respuesta bajo carga de la estructura, lo que obliga a ^{darles} ~~propor-~~ ~~cionarles~~ una rigidez suficiente para que las deformaciones no afecten el comportamiento de la estructura, o a tenerlas en cuenta en el análisis cuando sean significativas.

El comportamiento de los marcos rígidos depende en buena medida del de sus ~~juntas~~ ^{uniones}; si su rigidez es insuficiente pueden permitir rotaciones elásticas y comportarse como uniones semi-rígidas, lo que hace que los momentos en otras zonas de la estructura sean mayores que los determinados en el análisis (por ejemplo, aumentan los momentos positivos que producen las cargas

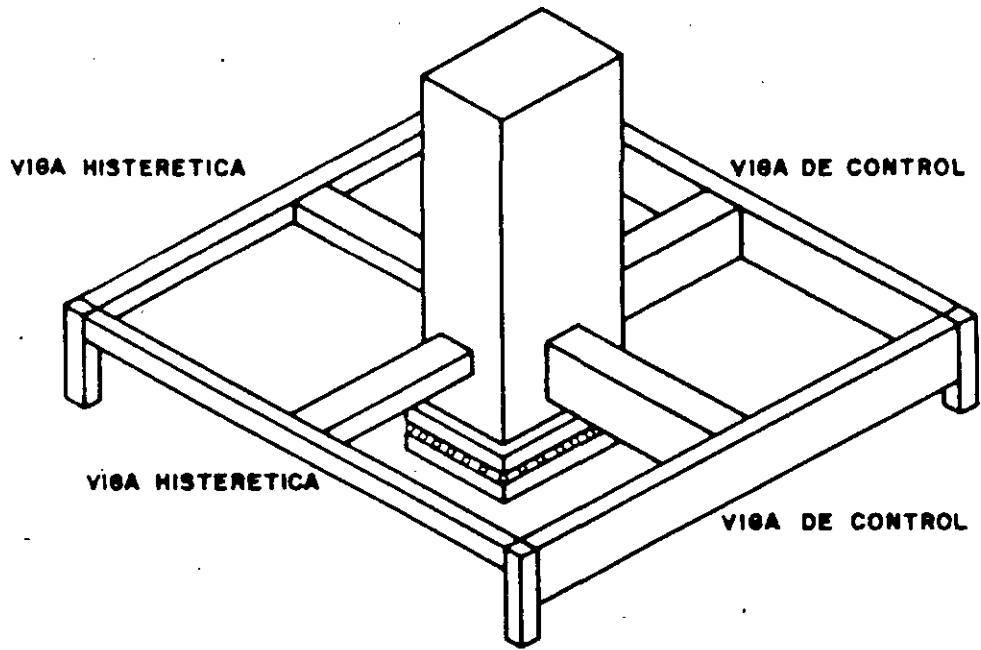


Fig. 38 Aislador con control de desplazamientos

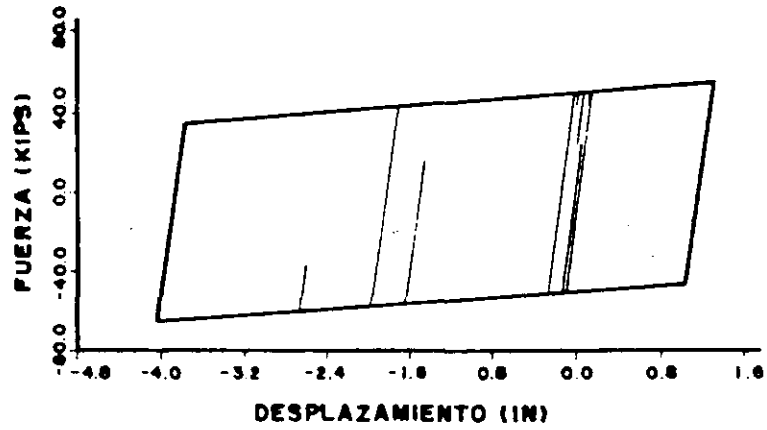


Fig. 39 Comportamiento histerético

Como es usual en estructuras reales, la columna pasa a través de la junta, y las vigas se unen a sus patines. (*Escribir la nota de pie de página entre paréntesis)

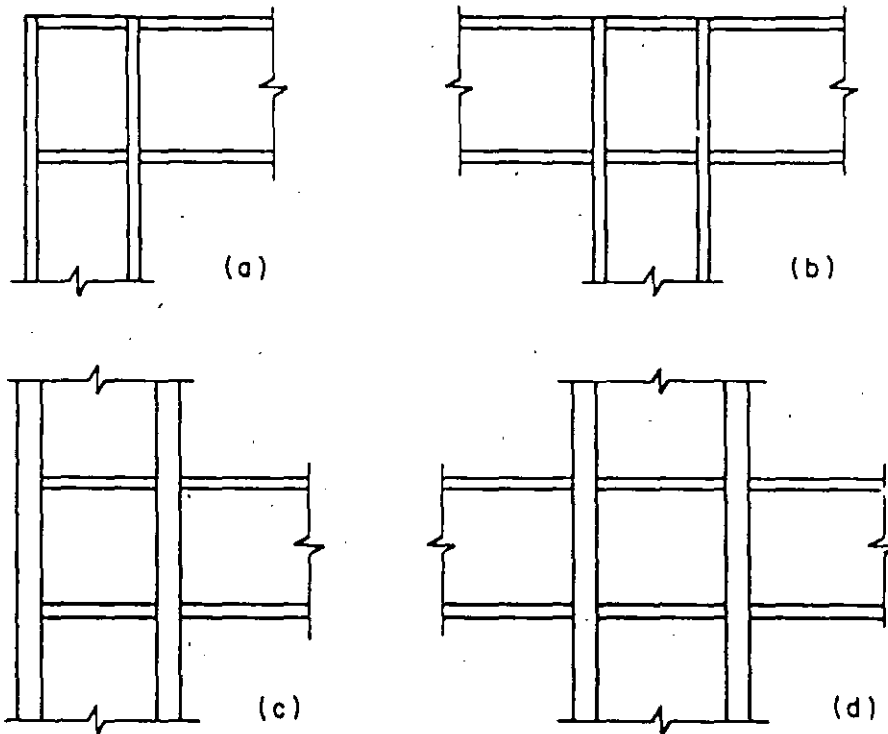


Fig 5-8-1 Conexiones viga-columna de marcos rígidos

5.2

Casi todos los estudios realizados hasta ahora han correspondido a marcos planos, con una o dos vigas unidas a los patines de la columna; sin embargo, en estructuras reales hay casi siempre tres o cuatro vigas en cada ^{unión} ~~conexión~~, pues en cada columna se cruzan dos marcos; las vigas llegan a uno o a los dos patines y a uno o ambos lados del alma.

*Este no es un requisito indispensable; puede haber ocasiones en que convenga que los elementos que se interrumpen en la conexión sean las columnas. Sin embargo, es la situación más común, pues se facilita el montaje de la estructura y se obtienen conexiones más resistentes, en vista de que los perfiles usados como columnas suelen ser mayores que las vigas y su alma es, en general, más gruesa.

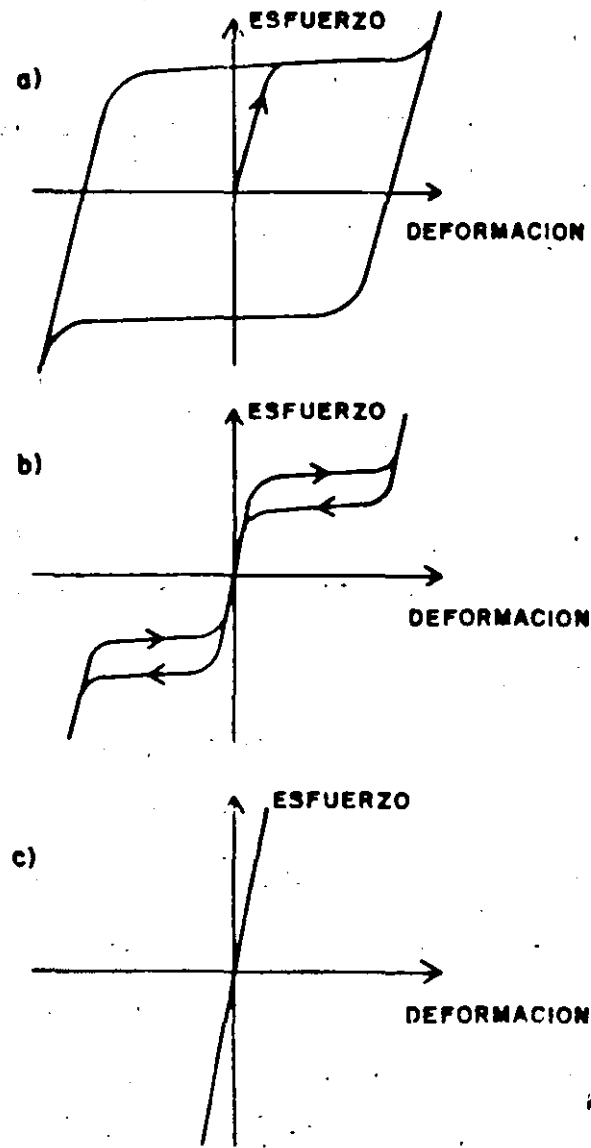


Fig. 40 Curvas esfuerzo deformación de dispositivos de aleación con memoria adaptable

~~es una~~ Características de las ^{uniones} conexiones. Para el comportamiento de una ^{unión} junta sea satisfactorio, han de satisfacerse los requisitos siguientes:

Resistencia. Las ^{uniones} ~~conexiones~~ deben ~~ser capaces de~~ resistir las acciones que les transmiten los miembros de la estructura que llegan a ellas. En diseño elástico, el límite de utilidad estructural debería ser la aparición del esfuerzo de fluencia en la junta o en el extremo de alguna de las vigas o columnas. * En ^{Escribir la nota} ~~En~~ diseño plástico, el estado límite lo constituye la formación de una articulación plástica en la junta o en una o varias de las vigas y columnas; la ^{unión} ~~conexión~~ debe resistir las sollicitaciones de los miembros que la rodean hasta que se formen en éstos las articulaciones plásticas necesarias para que la estructura se convierta en un mecanismo.

Rigidez. La rigidez, en el intervalo elástico, de las ^{uniones} ~~conexiones~~ viga-columna, debe ser suficiente para que las posiciones relativas de todos los elementos estructurales se conserven fijas bajo cargas de trabajo.

*El estado de esfuerzos en las ^{uniones} ~~conexiones~~ es muy complejo, pues los esfuerzos producidos por los momentos flexionantes, fuerzas normales y fuerzas cortantes que les transmiten las vigas y columnas, ya de por sí complicados y difíciles de evaluar, se superponen con los residuales que hay siempre en los perfiles de acero y con los que ocasiona la soldadura; ésto hace que bajo cargas de trabajo (y, seguramente, antes de aplicar esas cargas) haya ya zonas localizadas en estado plástico. La imposibilidad de determinar los esfuerzos reales en condiciones de servicio, y el hecho de que la aparición del esfuerzo de fluencia en algún punto no constituye un estado límite de resistencia, hacen que ~~en la práctica actual~~ ^{uniones} las ~~conexiones~~ se diseñen con métodos plásticos simplificados, ^{en su caso} aunque el diseño de la estructura en general se efectúe utilizando esfuerzos permisibles.

aplican fuerzas a la estructura con la finalidad de contrarrestar el movimiento.

Los principales sistemas desarrollados en la actualidad se describen a continuación:

2.1 Masa activa

Este sistema es una extensión del sistema pasivo con osciladores resonantes. El movimiento de la masa sobre el último nivel de la estructura es controlado por medio de una computadora que detecta el movimiento del edificio a través de los sensores y envía a los actuadores el movimiento que se debe aplicar a las masas (fig 41). A diferencia del sistema pasivo, el activo controla el movimiento del edificio para temblores de banda angosta y de banda ancha. La primera aplicación de este sistema se hizo en Japón para un edificio de acero de 11 niveles (Toyama y col, 1992). Mediciones de la respuesta ante la acción del viento han mostrado que el movimiento lateral del edificio es de alrededor del 30% del que tendría, si no existiera la masa activa.

Una de las principales desventajas de estos sistemas es la gran demanda de energía que se requiere para aplicar las fuerzas de control. Encaminados a ampliar la aplicación de estos dispositivos, se han propuesto diversos sistemas como el descrito por Machiyashi y col, 1992. Se propone un sistema de control similar al anterior, pero con el uso del sistema de masa tanto activa como pasiva, con lo que se logra disminuir la energía necesaria a la tercera parte para el control de viento y sismos moderados. El sistema se encuentra instalado en un edificio del Japón de siete niveles.

Similar al anterior, Fujita y col (1992) describen el estudio experimental de un modelo a escala natural de seis niveles en el que se incorporó una masa de control activo para viento y temblores moderados, que se convierte en pasiva para temblores de gran magnitud. La reducción de la respuesta para estos últimos eventos es de alrededor del 40%. Una propuesta similar es la de Kitamura y col (1992), que incorporan como masa adicional seis tanques sobre aisladores de base, en el último nivel de la estructura. El sistema se incorporó en una estructura de 21 pisos y 130 m de altura.

La respuesta analítica de los desplazamientos con control activo representa el 35% de la estructura sin control. Cuando la masa actúa como sistema pasivo, la máxima reducción encontrada es del 10%.

2.2 Tendones activos

Los tendones son contravientos colocados diagonalmente en forma de X que abarcan uno o varios niveles de la estructura (fig 42). Las fuerzas que se requiere aplicar a los tendones se obtienen de manera similar al sistema anterior.

Se han desarrollado también tendones activos para modificar las propiedades dinámicas de la estructura cuyo objetivo es alejar el periodo fundamental de la estructura de las frecuencias dominantes del temblor para cada instante y con esto evitar el efecto de resonancia. Una de las posibles alternativas es la de modificar la inclinación del tendón con el tiempo, lo que permite cambiar la rigidez de los marcos.

Descripciones más detalladas de estos elementos y estudios de laboratorio se encuentran en Higashino (1990) y Soong (1990 y 1991).

Se han propuesto métodos de análisis para estos sistemas como los descritos en Cheng (1990), Suhardjo y col (1990) y Yamada y col (1990).

2.3 Dispositivo de fricción activo

Akbar y Aktan (1990) propusieron un sistema de control activo, que disipa energía por fricción, similar al pasivo de Pall (1982). El sistema puede controlar la fuerza umbral de deslizamiento de los dispositivos en condiciones de servicio y en condiciones últimas.

COMENTARIOS FINALES

La aplicación de los sistemas anteriores depende de parámetros, que involucran las características de los eventos sísmicos, la localización y el tipo de estructura.

Los disipadores de energía son una opción viable para la disminución de daños provocados

mismos métodos, que se han comportado satisfactoriamente. Las incertidumbres en el cálculo de los esfuerzos provienen de dificultades en la evaluación de las solicitaciones, sobre todo sísmicas, de la complejidad de las estructuras y su interacción con muros, contravientos verticales, sistemas de piso y rampas de escaleras, de la existencia de esfuerzos residuales y concentraciones de esfuerzos, así como de la interacción suelo-estructura que puede ocasionar, entre otros fenómenos, hundimientos diferenciales de los apoyos; por todo esto, las ^{uniones} ~~juntas~~ deben diseñarse para que permitan un comportamiento dúctil de las estructuras bajo solicitaciones mayores que las calculadas, pues en caso contrario la falla puede presentarse mucho antes de que se alcance la resistencia máxima teórica. Por las razones expuestas, las ^{uniones} ~~juntas~~ de los marcos diseñados elásticamente deben dimensionarse y construirse de manera que posean una capacidad de rotación suficiente).

Economía. La resistencia, rigidez y capacidad de rotación de una ^{unión} ~~junta~~ pueden incrementarse siempre aumentando la cantidad de material utilizada en ella; sin embargo, como una parte importante del costo de fabricación de los marcos rígidos corresponde a las ^{uniones,} ~~conexiones,~~ éstas han de diseñarse de manera que tengan propiedades satisfactorias con el menor incremento posible de material y mano de obra. Además, han de proyectarse para que permitan un montaje sencillo y rápido.

~~Sigue la pág. 1067a~~

~~CS. 8.3 Diseño de conexiones cargadas estáticamente. El diseño~~

por temblores en la República Mexicana para ciertas características de las edificaciones. Sin embargo, es necesario comparar su comportamiento con sistemas alternativos que permitan elegir el más adecuado económica y estructuralmente. Por la manera en que disipan energía (mediante desplazamientos relativos entre dos niveles consecutivos) y de acuerdo con los resultados hasta ahora obtenidos, su utilización resulta atractivo para edificios pequeños y de mediana altura.

El principal objetivo de los aisladores de base consiste en flexibilizar a la estructura. La esbeltez es uno de los parámetros que restringe su uso debido a los momentos de volteo y a los desplazamientos laterales. Las mayores reducciones de la respuesta se obtienen en estructuras con periodos pequeños bajo excitaciones con grandes contenidos de frecuencias altas. Debido a lo anterior y a los posibles asentamientos diferenciales, no parece atractivo su uso en la zona blanda de la ciudad de México, aunque sí en otras partes de la República, como son las costas del Pacífico.

El oscilador resonante es un sistema promisorio para estructuras con comportamiento lineal. Los estudios que actualmente se llevan a cabo permitirán definir la aplicabilidad del sistema. El incremento de la capacidad de disipación del sistema se podría lograr con la incorporación de disipadores de energía, o bien con un piso adicional de comportamiento elastoplástico y adecuada ductilidad. Otra posibilidad que hace atractivo al sistema es permitir demandas de ductilidad pequeñas en la estructura cuando se vea sometida a eventos sísmicos de gran magnitud.

Los cables de presfuerzo son una solución atractiva para estructuras pequeñas y de mediana altura para cierto tipo de temblores. Aunque no modifican, de manera importante, la capacidad de disipación de energía de la estructura, incrementan su rigidez y resistencia, y mejoran el comportamiento sísmico, con la contribución de la estructura existente.

Los sistemas de control activo se encuentran en desventaja en nuestro país con respecto a los pasivos, por su elevado costo y la necesidad de mantenimiento periódico; no obstante,

pueden controlar más eficazmente el movimiento de la estructura. Es de esperarse que en el futuro se desarrollen con mayor frecuencia combinaciones de sistemas pasivos y activos (sistemas híbridos) que disminuyan las limitaciones de los primeros y reduzcan las fuerzas de control necesarias, con la consecuente disminución del costo.

RECONOCIMIENTO

Se agradece la lectura crítica de Emilio Rosenbluth y Manuel Jara cuyas valiosas sugerencias se incluyeron en este trabajo. El artículo forma parte de un proyecto de investigación financiado por la Coordinación de Investigación Científica de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. El inicio de este trabajo se realizó en el Centro de Investigación Sísmica de la Fundación Javier Barros Sierra, bajo el patrocinio del Departamento del Distrito Federal.

BIBLIOGRAFÍA

- Aguñiga, F. y Jara, J. M. (1993). "Reducción de daños sísmicos mediante el uso de osciladores resonantes". X Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Pto. Vallarta, Jalisco, pp 826-832.
- Aguirre, M. y Sánchez, R. (1989). "Pruebas de elementos disipadores de energía sísmica". IMCYC.
- Aguirre, M. y Sánchez, R. (1990). "Disipadores de energía sísmica". *Construcción y Tecnología*, Vol. III, No. 27, pp 15-19.
- Aiken, I. D., Kelly, J. M. y Mahmoodi, P. (1990). "The Application of viscoelastic dampers to seismically resistant structures". *Proceedings of Fourth U.S. National Conference on Earthquake Engineering*, Palm Springs, California, pp 459-468.
- Akbay, Z. y Aktan, H. M. (1990). "Intelligent energy dissipation devices". *Proceedings of Fourth U.S. National Conference on Earthquake Engineering*, Palm Springs, California, pp 427-435.
- Alonso, J. I. (1989). "Mechanical characteristics of X-plate energy dissipators". *CE 99 Report*. University of California at Berkeley.

Una unión viga-columna se considera adecuada para desarrollar la resistencia de la viga si satisface alguna de las condiciones siguientes:

a) Los patines de la viga ^{se sueldan} están soldados a tope, con ~~soldaduras de~~ penetración completa, a los ~~patines~~ ^{se} de la columna, y el alma de la viga ~~está~~ ^{se} conectada a la columna, o a una placa vertical soldada a ella, con soldaduras capaces de desarrollar toda su resistencia, o ~~capaces~~ de resistir, como mínimo, el 50 por ciento de la parte del momento plástico de la viga que corresponde al alma más la fuerza cortante que haya en ella, la que se transmite con soldadura adicional o con pernos de alta resistencia que trabajen por fricción.

b) El módulo de sección plástico de los patines es mayor que el 70 por ciento del módulo de sección plástico de la viga completa (es decir, $b_p t_p (d - t_p) F_{yp} \geq 0.7 M_p$). Los patines de la viga ^{se} están ~~se~~ ^{se} soldados a tope, con ~~soldaduras de~~ penetración completa, a los de la columna, y el alma de la viga ~~está~~ ^{se} conectada a la columna, directamente o a través de una placa, por medio de soldaduras o tornillos de alta resistencia que transmiten la fuerza cortante que hay en ella.

c) $b_p t_p (d - t_p) F_{yp} < 0.7 M_p$. ^{Los patines de la viga se sueldan a tope y el} El alma se suelda a la columna directamente o por medio de una placa, con una soldadura que tenga una resistencia de diseño no menor que el 20 por ciento de la resistencia nominal a la flexión del alma. La fuerza cortante en la viga se transmite con soldadura adicional o con pernos de alta resistencia que trabajen por fricción.

d) La conexión; hecha con soldadura o con tornillos de alta resistencia, tiene características diferentes de las indicadas en a, b o c, pero se ha demostrado, por medios analíticos o experimentales, que posee la resistencia requerida. Cuando la demostración se haga analíticamente, la resistencia de diseño de la conexión será 25 por ciento mayor que la ~~resistencia de diseño~~ del elemento conectado, y no se supondrá que las soldaduras y los tornillos contribuyen a transmitir la misma fuerza.

Las condiciones señaladas en a, b y c, que han de cumplirse para que una conexión entre viga y columna desarrolle la resistencia de la primera, están basadas en resultados de laboratorio, obtenidos mediante ensayos estáticos y dinámicos. Cuando la resistencia en flexión de los patines es un porcentaje elevado de la resistencia de la sección completa, los primeros pueden transmitir el momento plástico por sí solos, gracias al endurecimiento por deformación, por lo que la conexión del alma puede diseñarse sólo por fuerza cortante. En cambio, en secciones en las que el alma contribuye significativamente a la resistencia a la flexión debe conectarse para que se transmita, a través de ella, la fuerza cortante completa y el porcentaje del momento plástico que le corresponde, con lo que se evita un endurecimiento por deformación excesivo de los patines. (Comentarios por el **temblor de Northridge**). ^{Ver las 4 figuras siguientes.}

En la Fig. 5.2 se muestran varios tipos de juntas rígidas viga-columna que se han utilizado en la práctica.

- Chen, Y Q y Soong, T T** (1989), "Seismic behavior and response sensitivity of secondary structural systems", Report No. NCEER-89-0030, National Center for Earthquake Engineering Research, State University of New York at Buffalo.
- Chen, F Y** (1990), "Optimum design of seismic structures: methodologies and results", Proceedings of Fourth U.S. National Conference on Earthquake Engineering, Palm Springs, California, pp 917-926.
- Cho, D M y Retamal, E** (1993), "Bearings to withstand an earthquake bigger than the "Big One", Proceeding of Seminar on Seismic Isolation, Passive Energy Dissipation, and Active Control, VI, pp 209-220.
- Den Hartog** (1956), "Mechanical Vibrations", 4th ed, MacGraw Hill, NY.
- Eisenberg, J M y col** (1992), "Applications of seismic isolation in the USSR", Proceedings of the Tenth World Conference on Earthquake Engineering, Madrid, España, V4, pp 2039-2046.
- Ferrito, J M** (1984), "Economics of Seismic Design for New Buildings", Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 110, No. 12.
- Filiatrault, A y Cherry, S** (1987), "Performance evaluation of friction damped braced steel frames under simulated earthquake loads", Earthquake Spectra, Vol 3, No 1, 57-78.
- Filiatrault, A y Cherry, S** (1990), "A simplified seismic design procedure for friction damped structures", Proceedings of Fourth U.S. National Conference on Earthquake Engineering, Palm Springs, California, pp 479-488.
- Filiatrault, A, Cherry, M y Byrne, P M** (1990), "The influence of México City soils on the seismic performance of friction damped and base isolated structures", Earthquake Spectra, Vol. 6, No. 2, pp 335-352.
- Fujita, T** (1985), "Earthquake isolation technology for industrial facilities research, development and applications in Japan", Bull New Zealand Nat Soc Earth Eng, Vol 18, No 3, 224-249.
- Fujita, T y col** (1992), "Mass damper with convertible active and passive modes for response control of buildings", Proceedings of the Tenth World Conference on Earthquake Engineering, Madrid, España, V4, pp 2079-2083.
- Gates, W E, Hart, G C y Crouse, C B** (1990), "Vibration studies of an existing building for base isolation retrofit", Proceedings of Fourth U.S. National Conference on Earthquake Engineering, Palm Springs, California, pp 559-568.
- Gómez, C, Rosenblueth, E y Jara J M** (1993), "Estudio paramétrico de estructuras con disipadores de energía", Boletín del Centro de Investigación Sísmica, Fundación Javier Barros Sierra, Vol 3, No.1.
- Gómez, C y col** (1993), "Estudio paramétrico de estructuras con cables de presfuerzo", X Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Puerto Vallarta, Jalisco, pp 463-469.
- González, M** (1964), "Sistema para eliminar los esfuerzos peligrosos que los temblores causan en las estructuras", V Congreso Mexicano de la Industria de la Construcción, Tijuana, B.C., México.
- Graesser, E J y Cozzarelli, F A** (1989), "Multidimensional models of hysteretic material behavior for vibration analysis of shape memory energy absorbing devices", National Center for Earthquake Engineering, Report No. NCEER-89-0018, Research, State University of New York at Buffalo.
- Griffith, M C y col** (1988), "Experimental evaluation of seismic isolation of medium-rise structures subject to uplift", National Center for Earthquake Engineering Research, Report No. UCB/ERC-88/02, University of California at Berkeley.
- Griffith, M C, Aiken, I D y Kelly, J M** (1990-a), "Displacement control and uplift restraint for base-isolated structures", J Struct Eng, ASCE, Vol 116, No 4, 1135-1148.

$$R_n = (2.5k + N)F_y t_c$$

Ec. 5.3

donde

d = peralte total de la columna

F_y = esfuerzo mínimo especificado de fluencia del alma de la columna

N = grueso del patín de la viga

k = distancia de la cara exterior del patín de la columna al punto donde se inicia la curva de unión de alma y patín

t_c = grueso del alma de la columna

Los atiesadores ^{correspondientes} colocados frente al patín en tensión de la viga, se soldarán al patín de la columna para que transmitan la parte de la fuerza de tensión que les corresponda. Los que estén frente al patín comprimido pueden soldarse al patín de la columna o ajustarse contra él, para recibir la fuerza por apoyo directo. Unos y otros deben unirse al alma de la columna con la soldadura necesaria para transmitirle la fuerza que hayan recibido de la viga.

En lugar de colocar atiesadores transversales, el alma de la columna puede reforzarse por medio de placas adosadas a ella.

c. **Aplastamiento del alma.** Cuando la resistencia del alma de la columna frente al patín comprimido de la viga deba ser mayor que $F_c R_n$, donde $F_c = 0.75$ y R_n se determina como se indica más adelante, el alma de la columna se reforzará con un atiesador transversal, un par de atiesadores transversales, o una placa adosada a ella, de altura igual, cuando menos, a la mitad de su peralte.

1) Cuando el patín está unido a la columna a una distancia de su extremo mayor o igual que $d/2$,

$$R_n = 1140t_w^2 \left[1 + 3 \left(\frac{N}{d} \right) \left(\frac{t_a}{t_p} \right)^{1.5} \right] \sqrt{\frac{F_y t_p}{t_a}} \quad \text{Ec. 5.4}$$

2) Cuando el patín está unido a la columna a una distancia de su extremo menor que $d/2$,

Para $N/d \leq 0.2$,

$$R_n = 570t_w^2 \left[1 + 3 \left(\frac{N}{d} \right) \left(\frac{t_a}{t_p} \right)^{1.5} \right] \sqrt{\frac{F_y t_p}{t_a}} \quad \text{Ec. 5.5}$$

Para $N/d > 0.2$,

$$R_n = 570t_w^2 \left[1 + \left(\frac{4N}{d} - 0.2 \right) \left(\frac{t_a}{t_p} \right)^{1.5} \right] \sqrt{\frac{F_y t_p}{t_a}} \quad \text{Ec. 5.6}$$

t_p es el grueso del patín de la columna.

- on Base Isolation and Passive Energy Dissipation, ATC, Appendix E.
- Kelly, J M (1988)**, "Base isolation in Japan, 1988", Earthquake Engineering Research Center, Report No. UCB/EERC-88/20, University of California at Berkeley.
- Kelly, J M (1990)**, "Base isolation: linear theory and design", Earthquake Spectra, Vol. 6, No. 2, pp 223-244.
- Kelly, T E, Mayes, R L y Weissberg, S (1989)**, "Estimación del daño causado por sismos en estructuras convencionales y aisladas", Memorias del VIII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica y VII Congreso Nacional de Ingeniería Estructural, Acapulco, Guerrero, pp F.149-F.158.
- Kelly, T E y Boardman, OP R (1993)**, "Seismic isolation of the museum of New Zealand, Te Papa Tongarewā", Proceeding of Seminar on Seismic Isolation, Passive Energy Dissipation, and Active Control, VI, pp 389-400.
- Khachian, E E, Khigatian, Z M y Melkumian, M G (1990)**, "Earthquake engineering of high-rise buildings with flexible upper floor (Vibration Damper)", comunicación personal.
- Kirekawa, A, Ito, Y y Asano, K (1992)**, "A study of structural control using viscoelastic material", Proceedings of the Tenth World Conference on Earthquake Engineering, Madrid, España, V4, pp 2047-2054.
- Kitamura, H y col (1992)**, "Design and analysis of a tall building with an active mass damper", Proceedings of the Tenth World Conference on Earthquake Engineering, Madrid, España, V4, pp 2061-2067.
- Kobori, T y col (1992)**, "Development and application of hysteretic steel dampers", Tenth World Conference on Earthquake Engineering, España, V4, pp 2341-2346.
- Korenev, B G y Reznikov, L M (1988)**, "Vibration dynamic dampers theory and technical additions", Physical and Mathematical Literature, Moscu.
- Kuntz, R J (1990)**, "Earthquake hazard mitigation. The need for human resources development and research", Earthquake Spectra, Vol. 6, No. 2, pp 265-276.
- Lee, D M, y Medland, I C (1977)**, "Base isolation for earthquake protection of multi-storey shears structures", Proc 6th Aust Conf Mech and Struct Mats, Vol 1, pp 181-188.
- Lee, D M y Medland, I C (1978-a)**, "Base isolation -An historical development and the influence of higher mode responses", Bull N Z Nat Soc Earth Eng, Vol 11, No 4, pp 219-233.
- Lee, D M y Medland, I C (1978-b)**, "Estimation of base isolated structure response", Bull N Z Nat Soc Earth Eng, Vol 11, No 4, pp 234-244.
- Lin, B C y Tadjbakhsh, I (1986)**, "Effect of vertical motion of friction-driven isolation system", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 14, pp 609-622
- Lin, R C y col (1988)**, "An experimental study of seismic structural response with added viscoelastic dampers", National Center for Earthquake Engineering Research, Report NCEER-88-0018, Buffalo, Nueva York.
- Machayashi y col (1992)**, "Hybrid mass damper system for response control of building", Proceedings of the Tenth World Conference on Earthquake Engineering, Madrid, España, V4, pp 2359-2364.
- Martínez, E (1990)**, "Mejoramiento de la respuesta sísmica de edificios dañados mediante la acción de disipadores de energía", Memorias del Seminario sobre Instrumentación Sísmica y Uso de Elementos Disipadores de Energía en el Comportamiento Estructural, México, D.F., pp 211-248.
- Matsushita, K y Izumi, M (1965-a)**, "Some analyses of mechanisms to decrease seismic force applied to buildings", Proceedings of the 3rd. World Conference on Earthquake Engineering, pp 342-359.
- Matsushita, K y Izumi, M (1965-b)**, "Deflection controlled elastic response of buildings and

Placas adosadas al alma. Cuando se empleen placas adosadas ~~al alma~~ para aumentar la resistencia de diseño de la junta, o para reducir su relación peralte / grueso, se soldarán al alma de la columna, en sus dos bordes horizontales, con soldadura de filete corrida de tamaño no menor que el mínimo especificado, y se unirán a los patines con soldadura de filete o de penetración diseñada para desarrollar la resistencia al corte de la placa

Relación entre los momentos en las vigas y en las columnas. En las uniones viga-columna debe satisfacerse alguna de las relaciones siguientes:

$$\frac{\sum Z_c (F_{yc} - P_{uc} / A_t)}{\sum Z_v F_{yv}} \geq 1.0 \quad \text{Ec. 5.10}$$

$$\frac{\sum Z_c (F_{yc} - P_{uc} / A_t)}{V_n d_v H / (H - d_v)} \geq 1.0 \quad \text{Ec. 5.11.}$$

En las ecuaciones anteriores,

A_t = área total de la sección transversal de la columna.

F_{yv} = esfuerzo de fluencia mínimo especificado de la viga.

F_{yc} = esfuerzo de fluencia mínimo especificado de la columna.

H = promedio de las alturas de entrepiso arriba y abajo de la unión.

P_{uc} = fuerza axial de diseño en la columna.

V_n = resistencia nominal de la junta, calculada con la ec. 5.8.

Z_v y Z_c = módulo de sección plástico de una viga y de una columna.

d_v = promedio de los peraltes de las vigas que llegan a la unión.

No es necesario satisfacer los requisitos anteriores cuando:

- La compresión en las columnas satisface la condición $P_{uc} < 0.3F_{yc}A_t$.
- Las columnas forman parte de un entrepiso que tiene una relación resistencia al corte de diseño / fuerza cortante de diseño 50 por ciento mayor que la del entrepiso que está encima de él.
- La columna no forma parte del sistema que ~~resiste~~ ^{soporta} las fuerzas cortantes producidas por sismo, pero sí está incluida entre las que resisten los momentos de volteo.

Al imponer las condiciones dadas por las ecs. 5.10 y 5.11 se busca que las articulaciones plásticas se formen en las vigas, y no en las columnas.

- buildings in Canada". Proceeding of Seminar on Seismic Isolation, Passive Energy Dissipation, and Active Control, V2, pp 675-686.
- Paniagua, J P, Gómez, A, e Iglesias, J** (1989). "Sistema amortiguador hidrodinámico". VIII Con Nat Ing Sis y VII Nal Ing Est, Vol III, Acapulco, Guerrero, pp F227-F236.
- Popov, E P, Engelhardt, M D y Ricles, J M** (1989). "Eccentrically braced frames. US practice". Engineering Journal, AISC.
- Priestley, M J N, Crosbie, R L y Carr, A J** (1977). "Seismic forces in base isolated masonry structures". Bull New Zealand Nat Soc Earth Eng, Vol 10, No 2, pp 55-68.
- Ricles, J M y Popov, E P**, (1987). "Dynamic analysis of seismically resistant eccentrically braced frames". Earthquake Engineering Research Center, Report No. UCB/EERC-87/07, University of California at Berkeley.
- Ricles, J M y Bolin, S M** (1990). "Energy dissipation in eccentrically braced frames". Proceedings of Fourth U.S. National Conference on Earthquake Engineering, Palm Springs, California, pp 309-318.
- Robinson, W H y Greenbank, L R** (1975). "Properties of an extrusion energy absorber". Bulletin of the New Zealand National Society for Earthquake Engineering, Vol. 8, No. 3, pp 187-191.
- Robinson, W H y Greenbank, L R** (1976). "An extrusion energy absorber suitable for the protection of structures during an earthquake". International Journal of Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 4, pp 255-259.
- Robinson, W H y Tucker, A G** (1977). "A lead rubber shear damper". Bulletin of the New Zealand National Society for Earthquake Engineering, Vol 10, No. 3, pp 151-153.
- Robinson, W H** (1982). "Lead rubber hysteretic bearings suitable for protecting structures during earthquakes". Earth Eng Struct Dyn, Vol 10, pp 593-604.
- Robinson, W H y Cousins, W J** (1987). "Recent development in lead dampers for base isolation". Pacific Conference on Earthquake Engineering, Nueva Zelanda, pp 279-283.
- Rodwell, E y col** (1990). "EPRI contribution to international utility industry seismic isolation development program". Earthquake Spectra, Vol. 6, No. 2, pp 419-430
- Roeder, W C, Stanton, J F, y Taylor, A W** (1990). "Fatigue of steel reinforced elastomeric bearings". J Struct Eng, ASCE, Vol 116, No 2, pp 407-425.
- Sarrazin, M y Moroni, M O** (1992). "Design of a base isolated confined masonry building". Proceedings of the Tenth World Conference on Earthquake Engineering, Madrid, España, V4, pp 2505-2508.
- Saruta, M, Yokota, H y Watanabe, H** (1990). "Verification test on base isolated building". Memorias del seminario sobre Instrumentación Sísmica y Uso de Elementos Disipadores de Energía en el Comportamiento Estructural, México, D.F., pp 273-289.
- Scholl, R E** (1984). "Brace dampers: An alternative structural system for improving the earthquake performance of buildings". Proc 8th World Conference on Earthquake Engineering, San Francisco, V, pp 1015-1022.
- Scholl, R E** (1990). "Improve the earthquake performance of structures with added damping and stiffness elements". Proceedings of Fourth U.S. National Conference on Earthquake Engineering, Palm Springs, California, pp 489-498.
- Scholl, R E** (1993). "Design criteria for yielding and friction energy dissipator". Proceeding of Seminar on Seismic Isolation, Passive Energy Dissipation, and Active Control, San Francisco, California, V2, pp 485-495.
- Sharpe, R L** (1990). "Independent engineer peer review for seismic isolation projects". Earthquake Spectra, Vol.6, No. 2, pp 309-316.
- Shimoda, I y col** (1992). "Development of a lead rubber bearing with stepped plug". Pro-

~~El objetivo de los estudios reportados en las refs 5.8.18 y~~
~~5.8.19 es examinar las conexiones~~ ^{se han estudiado las uniones} por alma desde los puntos de
vista de resistencia, rigidez y ductilidad, así como ~~considerar~~
los efectos que producen los atiesadores, cuando son necesarios
para alcanzar la resistencia o rigidez deseadas, ^{con la} ~~su~~ mira final
es formular recomendaciones para diseño.

El comportamiento de las ^{uniones} ~~conexiones~~ es adecuado, en general,
cuando se emplean atiesadores que evitan que el alma de la
columna se deforme (Fig ^{5.3.} ~~5.8.14~~, b y c), pero puede no serlo si
el ancho del patín de la viga es menor que el peralte del alma
de la columna y la unión se hace en forma directa, sin atiesa-
dores (Fig ^{5.3.d} ~~5.8.14d~~), ya que puede formarse un mecanismo de falla
~~con líneas de flujo~~ en el alma de la columna, antes de que
aparezca un/articulación plástica en la viga. Además, aunque no
se forme ese mecanismo, lo que depende del ancho del patín y del
peralte de la viga, así como del peralte y grueso del alma de la
columna, es posible que no se alcance la carga máxima predicha
por la teoría plástica ~~simple~~ porque la unión mencionada oca-
siona elevadas concentraciones de esfuerzos y pérdida de ducti-
lidad, que pueden producir la fractura del material.

La mayor parte de las ^{uniones que se han ensayado} ~~conexiones ensayadas~~ falló por fractura
cuando la carga alcanzó el valor predicho por la teoría plástica
simple, o estaba cerca de él, sin que se presentasen deforma-
ciones plásticas significativas. Las grietas que ocasionaron la
falla se iniciaron en la unión del patín en tensión de la viga y

- Tajirian, F F, Kelly, J M y Aiken, I D** (1990). "Seismic isolation for advanced nuclear power stations", *Earthquake Spectra*, Vol. 6, No. 2, pp 371-401.
- Takayama, M Tada, H y Wada, A** (1987). "A practical research of base isolation system", *Pacific Conference on Earthquake Engineering*, Nueva Zelanda, pp 285-296.
- Tanabe, T y col** (1992). "Experiments of base isolation with full-scale buildings", *Proceedings of the Tenth World Conference on Earthquake Engineering*, Madrid, España, V4, pp 2479-2484.
- Toyoma, K y col** (1992). "Application of the active mass driver (AMD) system to structural active seismic response control", *Proceedings of the Tenth World Conference on Earthquake Engineering*, Madrid, España, V4, pp 2347-2352.
- Tsai, K CH y col** (1993). "Welded steel triangular plate device for seismic energy dissipation", *Proceeding of Seminar on Seismic Isolation, Passive Energy Dissipation, and Active Control*, San Francisco, California, V2, pp 687-698.
- Tyler, R G** (1977-a). "Dynamic test of laminated rubber bearings", *Bull New Zealand Nat Soc Earth Eng*, Vol 10, No 3, pp 143-150.
- Tyler, R G** (1977-b). "Dynamic test on PTFE sliding layers under earthquake conditions", *Bull New Zealand Nat Soc Earth Eng*, Vol. 10, No. 3, pp 129-138.
- Tyler, R G** (1977-c). "Damping in building structures by means of PTFE sliding joints", *Bull New Zealand Nat Soc Earth Eng*, Vol. 10, No. 3, pp 139-142.
- Tyler, R G y Robinson, W H** (1984). "High-strain test on lead rubber bearings for earthquake loads", *Bull New Zealand Nat Soc Earth Eng*, Vol 17, No 2, pp 90-105.
- Urrego, O E y col** (1993). "Influencia de la distribución de disipadores de energía en la respuesta sísmica de un edificio", X Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Puerto Vallarta, Jalisco, pp 849-855.
- Way, D y Howard, J** (1990). "Seismic rehabilitation of the mackay school of mines, phase III, with base isolation", *Earthquake Spectra*, Vol. 6, No. 2, pp 297-308.
- Vestroni, F y col** (1992). "Dynamic behaviour of isolated buildings", *Proceedings of the Tenth World Conference on Earthquake Engineering*, Madrid, España, V4, pp 2473-2478.
- Villaverde, R y Newmark, N M** (1980). "Seismic response on light attachments to buildings", *Civil Engineering Studies, Struct Res Series No 469*, University of Illinois.
- Villaverde, R** (1986). "Simplified seismic analysis of secondary systems", *J Struct Eng*, Vol 112, No. 3.
- Villaverde, R** (1988). "Rosenblueth's modal combination rule for systems with non-classical damping" *J Earth Eng Struct Dyn*, No 16, pp 315-328.
- Villaverde, R** (1993). "Are vibration control techniques a competitive alternative for the seismic design of structures?", X Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Pto. Vallarta, Jalisco, pp 870-878.
- Warburton, G B y Soni, S R** (1977). "Errors in response calculation of non-classically damped structural dynamics", *J Earth Eng Struct Dyn*, Vol 5, pp 363-375.
- Whittaker, A. y col** (1993). "Code requirements for the design and implementation of passive energy dissipation systems", *Proceeding of Seminar on Seismic Isolation, Passive Energy Dissipation, and Active Control*, San Francisco, California, V2, pp 497-508.
- Whittaker, A y col** (1989). "Earthquake simulator testing of steel plate added damping and stiffness elements", *Earthquake Engineering Research Center, Report No UCB/EERC-89/02*, University of California at Berkeley.

1. Empleo de placas para transmitir el momento de grueso mayor que el del patín de la viga (Fig ^{5.4a} ~~5.8-15a~~), con lo que se reducen las concentraciones de esfuerzos en las zonas de las placas adyacentes a los extremos de los patines de la columna.

2. Empleo de atiesadores en la columna del lado opuesto al que recibe la viga (Fig ^{5.4b} ~~5.8-15b~~). Algunos análisis realizados con elemento finito han indicado que las concentraciones de esfuerzos en las zonas indicadas en el punto 1 se reducen cuando menos en un tercio al colocar esos atiesadores.

3. Alargamiento de las placas de conexión para separar las soldaduras entre ellas y el patín de la viga y los de la columna, evitando la intersección de soldaduras y los elevados esfuerzos residuales asociados con ella (Fig ^{5.4c} ~~5.8-15c~~).

4. Uso de placas de ancho variable para reducir la concentración de esfuerzos en la sección crítica (Fig ^{5.4d} ~~5.8-15d~~).

5. Reducción de la ^{sección transversal de la} placa de conexión entre su unión con los patines de la viga y los de la columna, a cierta distancia de ambas uniones (Fig ^{5.4e} ~~5.8-15e~~).



**FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA**

CURSOS ABIERTOS

XXI CURSO INTERNACIONAL DE INGENIERIA SISMICA

**M O D U L O III:
DISEÑO SISMICO DE EDIFICIOS**

TEMAS: VARIOS

**AUTOR: ING. OSCAR DE BUEN LOPEZ
DE HEREDIA**

**EXPOSITOR: ING. JOSE LUIS SANCHEZ
MARTINEZ**

6. SISTEMAS ESTRUCTURALES

La solución ideal, desde un punto de vista económica, consiste en escoger sistemas estructurales que se diseñen para soportar las cargas verticales, y que ^{resistan} ~~sean capaces de resistir~~ la combinación de éstas y las sollicitaciones sísmicas sin que el aumento de esfuerzos (o la disminución de factores de carga respecto a la falla) exceda el incremento permitido en los reglamentos para sollicitaciones producidas por cargas permanentes y accidentales combinadas; al mismo tiempo, debe revisarse que los desplazamientos horizontales relativos entre niveles consecutivos no sobrepasen límites aceptables, y comprobarse que se tiene una seguridad adecuada contra la inestabilidad de conjunto de la construcción.

Los edificios de pocos pisos, con muros de carga, suelen satisfacer automáticamente las dos condiciones ~~anteriores~~ de resistencia y rigidez; al aumentar el número de niveles y requerirse una estructura el problema se vuelve más difícil, y para evitar incrementos excesivos en costo y en el tamaño de los elementos estructurales deben utilizarse sistemas adecuados.

ELECCION DEL SISTEMA ESTRUCTURAL.

Las características principales que debe tener un edificio que se va a construir en una zona sísmica son:

Resistencia. El edificio ha de tener una seguridad adecuada contra el colapso durante temblores intensos. Para ello, debe diseñarse para que soporte sollicitaciones sísmicas relativamente altas, compatibles con la sismicidad de la zona.

Rigidez. Es necesaria para evitar daños en muros, cancelas, instalaciones y otros elementos no estructurales, durante temblores frecuentes de poca intensidad, y para impedir fallas por inestabilidad, debida a amplificación excesiva de los momentos por interacción carga vertical - desplazamiento horizontal, en temblores intensos. La rigidez apropiada se logra manteniendo los desplazamientos laterales de entrepiso por debajo de límites adecuados, que se indican en los reglamentos.

Ductilidad. Esta propiedad no es indispensable, en teoría, puesto que pueden construirse estructuras que, también en teoría, se comporten elásticamente bajo

temblores de cualquier intensidad; constituye, sin embargo, una manera económica de obtener estructuras capaces de soportar temblores intensos, si bien sufriendo daños que pueden ser importantes. Además, como no se conocen las características (intensidad, duración, contenido de frecuencias, etc) del temblor más desfavorable a que quedará sometida la construcción, no puede suprimirse la ductilidad, al menos en zonas críticas de la estructura, sin correr el riesgo de que el comportamiento real esté muy por debajo del previsto.

SISTEMAS PARA PROPORCIONAR RIGIDEZ Y RESISTENCIA LATERALES.

^{Aunque}
~~A pesar de que~~ la razón de ser de la estructura de un edificio proviene de la necesidad de soportar cargas verticales, la elección del sistema estructural queda determinada, casi siempre, por la manera en que ^{se resisten} ~~han de resistirse~~ las fuerzas horizontales; más todavía, aunque no hubiese más que cargas verticales, también se tendría que pensar en cómo obtener rigidez lateral adecuada, puesto que siempre es teóricamente posible que un edificio completo, o alguno de sus entresijos, falle por inestabilidad lateral. Las solicitaciones horizontales son, pues, las que determinan las características principales de los sistemas estructurales de los edificios excepto, quizá, en los que no tienen más de dos o tres niveles.

Las estructuras deben ser estables bajo cualquier condición posible de carga. Cuando lo son, las solicitaciones exteriores ocasionan ~~en ellas~~ deformaciones pequeñas, y las fuerzas interiores les devuelven su forma original cuando desaparecen las cargas. En cambio, si una estructura es inestable las cargas producen deformaciones muy grandes, que crecen aunque las solicitaciones se mantengan constantes; además, las acciones interiores estabilizadoras no logran que la estructura recupere su configuración inicial cuando se descarga. El conjunto de vigas y columnas de la fig. 1/a. es claramente inestable, pues no resiste fuerzas horizontales ni tiene ningún mecanismo que haga que recupere su forma inicial.

En la fig. 1/b se ilustran los pocos mecanismos que pueden utilizarse para obtener sistemas estructurales estables, capaces de resistir los efectos producidos por fuerzas horizontales. El primero consiste en añadir una diagonal, con lo que se obtiene una estructura contraventada. En el segundo la estabilidad lateral se logra por medio de muros de cortante o de rigidez, de mampostería de tabi-

que o de concreto reforzado, que son elementos planos verticales de gran rigidez y resistencia. Por último, los miembros que forman la estructura pueden unirse entre sí por medio de conexiones rígidas, que impiden las grandes rotaciones asociadas con el colapso: la estabilidad lateral se consigue con el uso de marcos rígidos.

Para asegurar la estabilidad, en todas las direcciones, de un edificio, puede utilizarse uno solo de los sistemas mencionados, o una combinación de varios de ellos.

Ventajas del acero estructural. El acero es el material más común en sistemas estructurales de varios pisos. Sus ventajas principales son su alta resistencia, en tensión o en compresión, y su gran rigidez, que proviene de su elevado módulo de elasticidad; la combinación de estas propiedades produce estructuras mucho menos masivas y, por consiguiente, más ligeras y eficientes desde el punto de vista del uso de los espacios, que las que se obtienen con el otro material ~~que se utiliza en la~~ construcción, el concreto reforzado. Además, con acero se pueden salvar claros grandes, lo que permite crear los grandes espacios abiertos necesarios en los edificios modernos de oficinas. El empleo de sistemas de piso de lámina acanalada, en vez de losas de concreto, elimina el uso de obra falsa y aumenta la ligereza de la estructura. Su ductilidad lo hace el material más adecuado para los edificios altos, sobre todo para los que se construirán en zonas sísmicas. También la ligereza es un factor favorable, ~~en este caso~~, pues al disminuir el peso de la construcción disminuyen las fuerzas de inercia producidas por los temblores.

Las estructuras de acero se fabrican en taller, de manera que su uso industrializa el proceso de construcción, con las consiguientes ventajas de velocidad, precisión y calidad que llevan, finalmente, a la obtención de un sistema estructural muy confiable. Cuando la rigidez lateral de la estructura se vuelve crítica, el acero puede utilizarse combinado con concreto.

Para determinar el sistema estructural más conveniente en un edificio alto ha de reconocerse que su capacidad para resistir fuerzas horizontales se vuelve crítica, y que deja de serlo la manera en que se transmiten las cargas verticales (función que, de todos modos, no debe olvidarse). El sistema que resiste las

fuerzas horizontales, producidas por viento o sismo, está compuesto por una combinación de vigas, columnas, contraventeos en diagonal y muros de rigidez. Debe diseñarse para que soporte la mayor cantidad posible de carga vertical, de modo que se eviten, o se reduzcan a un mínimo, las tensiones netas transmitidas a la cimentación durante un sismo, y para que proporcione soporte lateral a subsistemas diseñados sólo para carga vertical.

Las fuerzas laterales producen fuerzas cortantes horizontales, momentos de volteo y desplazamientos. ~~laterales~~. La demanda de resistencia y rigidez crece rápidamente cuando aumenta la altura del edificio, y el sistema estructural debe satisfacer esa demanda. La fuerza cortante aumenta linealmente con la altura, y el momento de volteo y los desplazamientos laterales crecen con su segunda y cuarta potencia.

En edificios de cierta altura el diseño suele quedar regido por la necesidad de proporcionar rigidez lateral suficiente para mantener los desplazamientos relativos de entrepiso dentro de límites aceptables, no por la capacidad del sistema para resistir las fuerzas cortantes horizontales y los momentos de volteo. Esto ha hecho que en las últimas tres décadas se hayan desarrollado diversos sistemas estructurales, buscando satisfacer la demanda de rigidez lateral de manera económica.

Los sistemas estructurales que se han empleado a partir de los años sesenta siguen un proceso lógico de evolución, basado en comparaciones con el sistema más eficiente posible, un cantiliver que utiliza las dimensiones exteriores totales del edificio. La medida de la eficiencia de un sistema estructural cualquiera está, pues, relacionada directamente con su efectividad para soportar fuerzas horizontales trabajando como cantiliver.

El marco rígido, que resiste las fuerzas horizontales por flexión de los miembros que lo componen, constituye el cantiliver menos eficiente, por lo que se colocó al principio de una carta de sistemas posibles; el otro extremo ~~lo consti-~~^{es} ~~tuye~~ un cantiliver completamente efectivo, que utiliza la forma exterior tridimensional completa de la construcción. Entre los dos extremos hay una serie de sistemas, que se muestran en la Fig. ^{6.2.} ~~(Fig. 2, pág. 648, "Constructional...").~~ La carta es útil en las primeras etapas del proceso de diseño, ya que permite escoger un sistema adecuado, que después se dimensiona para lograr la eficiencia busca

← (Las alturas límite indicadas en la figura corresponden a edificios construidos en zonas donde las fuerzas horizontales de diseño son ^{producidas por} ~~debidas a~~ viento; en zonas sísmicas son, en general, menores; la ductilidad del sistema, de enorme importancia en diseño sísmico, es mucho menos crítica cuando el diseño es por viento/

Marcos rígidos.

Los marcos rígidos tridimensionales, formados por un conjunto de vigas y columnas, constituyen un sistema estructural eficiente para edificios de altura pequeña o media, hasta unos 10 ó 12 pisos. En edificios destinados a habitación no suele justificarse su empleo como únicos elementos resistentes, pues por requisitos de funcionamiento se cuenta con gran número de muros, que separan unas habitaciones de otras, colocados en las mismas posiciones en todos los niveles, que pueden utilizarse con ventaja, solos o en combinación con los marcos. En cambio, los edificios de oficinas carecen casi por completo de divisiones de carácter permanente, por lo que en ellos sí puede convenir utilizar ~~los~~ marcos rígidos como único sistema estructural, pues proporcionan la máxima libertad de planeación y operación.

Los marcos rígidos constituyen una solución adecuada en edificios de poca o mediana altura que se van a construir en zonas sísmicas porque, además de proporcionar la resistencia necesaria ante cargas verticales y horizontales de una manera económica, permiten obtener estructuras de ductilidad elevada, capaces de incursionar en el intervalo inelástico bajo sollicitaciones sísmicas intensas, disipando una parte importante de la energía que les transmite el terreno sin sufrir daños, o experimentando desperfectos locales, de pequeña cuantía y fácil reparación.

~~Los marcos rígidos~~ Bien diseñados, detallados y construidos, tienen un comportamiento dúctil estable bajo cargas cíclicas ~~que los hacen trabajar~~ fuera del intervalo elástico, y la mayor parte de los códigos de construcción los consideran sistemas estructurales preferenciales, para los que especifican cargas laterales menores que las correspondientes a otros sistemas.

Es una práctica aceptada generalmente la de que el dimensionamiento de los miembros que componen los marcos rígidos se haga de manera que las articulaciones plásticas se formen en las vigas antes que en las columnas, con lo que se logra que las deformaciones plásticas más importantes se concentren en zonas que pueden

aceptarlas con poca, o ninguna, pérdida de resistencia. Esta es la filosofía de diseño conocida como "columnas resistentes - vigas débiles".

Sin embargo, la ductilidad se convierte en la principal desventaja de los marcos rígidos cuando se pretende utilizarlos en edificios altos carentes de elementos estructurales adicionales que contribuyan a la resistencia y rigidez lateral del conjunto. Se hace necesario aumentar las dimensiones de vigas y columnas, muy por encima de las requeridas para soportar las cargas verticales, primero para obtener la resistencia necesaria ante cargas horizontales y después, cuando crece el número de pisos, para controlar los desplazamientos laterales y mantenerlos dentro de límites adecuados.

Los marcos rígidos constituyen el esqueleto resistente de un gran número de construcciones modernas de muy diversos tipos. (Fig. 2) Su nombre proviene de que los elementos principales que los componen, vigas y columnas, están ligados entre sí por medio de conexiones rígidas, capaces de transmitir los momentos, fuerzas normales y cortantes, sin que haya desplazamientos lineales o angulares relativos entre los extremos de las barras que concurren en cada nudo, lo que hace que la estructura resultante pueda resistir por sí sola, sin la ayuda de elementos adicionales de otros tipos, cargas verticales y horizontales. El dimensionamiento de las conexiones entre vigas y columnas constituye uno de los aspectos más importantes del diseño de los marcos rígidos.

En la Fig. ^{6.3} (Fig. ~~pág. 658, "Construccional..."~~) se muestra un marco rígido deformado por fuerzas horizontales. La deformación, que se caracteriza por la rotación de los nudos y la flexión de las vigas y columnas, comprende dos partes, la deformación por cortante y la deformación por flexión, que se produce por el alargamiento y acortamiento de las columnas. En marcos rígidos de proporciones usuales la primera representa entre el 80 y el 90% de la deformación total, de manera que un dimensionamiento óptimo de la estructura, desde el punto de vista de las deformaciones, estará dirigido a minimizarla.

Los desplazamientos por cortante son proporcionales a las sumas de rigideces I/L e I/h de todas las vigas y columnas de cada nivel; como el claro de las vigas es, en general, dos o tres veces mayor que la altura de las columnas, para que las contribuciones de unas y otras sean semejantes los momentos de inercia de las primeras deben ser dos o tres veces mayores que los de las segundas, lo que in.

que cuando los claros crecen tienen que utilizarse vigas de peralte considerable para controlar los desplazamientos. El peralte económico aumenta en los pisos inferiores, en los que la fuerza cortante es mayor, y en edificios de cierta altura excede del permitido por requisitos arquitectónicos o funcionales, lo que obliga a utilizar secciones más pesadas; ésta es una de las causas principales de la ineficiencia de los marcos rígidos. Además, si los desplazamientos se controlan aumentando las dimensiones de las vigas éstas se hacen más resistentes que las columnas, lo que está en contra de la hipótesis, generalmente aceptada, de que en zonas sísmicas conviene que tengan una resistencia menor.

La relación altura/ancho total del edificio es también de la mayor importancia en la eficiencia de los marcos rígidos, ya que cuando el ancho es grande aumenta el número de crujeías. Los marcos de la periferia del inmueble pueden ser más eficientes que los interiores si el proyecto arquitectónico permite disminuir la separación entre sus columnas y aumentar el peralte de las vigas.

uniones rígidas

Las ~~conexiones~~ aumentan el costo, ~~de los marcos rígidos~~, por este motivo, un sistema estructural popular en Estados Unidos es el formado por marcos rígidos colocados sólo en la periferia del edificio, mientras que el resto de la estructura tiene juntas flexibles; disminuye así sustancialmente el número de conexiones rígidas, pero aumenta el grueso de las paredes de los elementos que han de unirse entre sí, puesto que el sismo es resistido por sólo dos marcos en cada dirección, crecen las dificultades para hacer buenas soldaduras y disminuye la hiperestaticidad del sistema. Las fallas de soldadura de penetración completa entre los patines de vigas y columnas registradas durante el temblor de Northridge, California, del 17 de enero de 1994, se han achacado, al menos en parte, a los problemas creados al soldar placas muy gruesas, originados por el sistema estructural mencionado.

predominancia

En edificios altos, en los que ~~las~~ ^{predominan} las solicitaciones producidas por viento o sismo, ~~se vuelven predominantes~~, el marco rígido convencional deja de ser una solución adecuada, pues para darle la resistencia y rigidez necesarias se requieren vigas y columnas de dimensiones y costo excesivos. En esos casos conviene utilizar elementos estructurales adicionales, muros de rigidez o contraventeos, que resistan las fuerzas horizontales más eficiente y económicamente.

El uso de los elementos mencionados hace que el marco rígido deje de ser indispensable pues la estructura de soporte de un edificio puede construirse con

~~articuladas en las columnas,~~
vigas ~~y columnas articuladas entre sí~~, proporcionando la rigidez y resistencia laterales necesarias para evitar problemas de inestabilidad y para soportar los efectos producidos por fuerzas horizontales por medio, por ejemplo, de armaduras verticales formadas por columnas, vigas y contraventeos en diagonal colocados entre ellas.

En un mismo edificio se puede emplear una combinación de marcos rígidos, contraventeos, muros de rigidez y vigas articuladas en las columnas, cambiando incluso la forma de trabajo en las dos direcciones principales, ya que, de acuerdo con sus características arquitectónicas y funcionales, una combinación de dos o más de los sistemas estructurales mencionados puede proporcionar la solución más eficiente y económica.

Marcos contraventeados.

Bajo cargas horizontales, las armaduras verticales formadas por vigas, columnas y diagonales trabajan como elementos en cantiliver; los momentos de volteo son equilibrados por fuerzas normales, de tensión y compresión, que aparecen en las columnas, y las fuerzas cortantes son resistidas por las diagonales; éstas pueden tener diversas configuraciones, como se muestra en la fig. ~~Fig. 11,~~ ^{6.4} ~~Fig. 11,~~ ~~652, "Constructional...")~~.

Las armaduras de cortante pueden, por sí solas, proporcionar toda la resistencia y rigidez requeridas en edificios de altura media; se emplean con frecuencia para resistir los efectos del viento, pero en zonas sísmicas suelen combinarse con marcos rígidos, con lo que se obtiene un sistema de marcos y armaduras que interactúan entre sí. Cuando se combina la deformación por cortante de los marcos con la de las armaduras, en flexión, se obtiene un sistema de gran rigidez lateral; en la parte superior del edificio los marcos restringen las deformaciones de las armaduras, y en la parte inferior ~~ocede lo contrario~~ son las armaduras las que restringen a los marcos. Esto ocasiona una redistribución de fuerzas cortantes entre marcos y armaduras (Fig. ~~12,~~ ^{6.3} ~~pág. 653, "Constructional...")~~ que lleva la rigidez del sistema a un nivel mucho más alto que el que se obtiene sumando directamente las rigideces de unos y otras.

Las armaduras verticales se colocan alrededor del núcleo de servicios (que incluye elevadores, escaleras, sanitarios, ductos y cuartos para equipo mecán

eléctrico y de teléfonos) y en los muros de lindero del edificio, y se combinan con marcos rígidos.

— Sigue pág. 73 —

Contraventeos excéntricos.

En la Fig. ^{6.6} se muestran cuatro marcos provistos de otros tantos tipos de contraventeos excéntricos. Las fuerzas axiales que aparecen en las diagonales, como un resultado de las acciones sísmicas, se transmiten a las columnas o a otras diagonales a través de un tramo corto de viga, llamado "eslabón activo", que trabaja en flexión y cortante. Escogiendo adecuadamente su geometría puede lograrse que un marco contraventeado excéntricamente tenga una rigidez elástica muy cercana a la de marcos similares provistos de contraventeos concéntricos y que, por otro lado, los eslabones activos se deformen inelásticamente durante temblores severos, absorbiendo y disipando energía de una manera análoga a la de los marcos rígidos no contraventeados. Se obtiene así un sistema estructural que posee características favorables de los dos sistemas, y que puede satisfacer, en forma eficiente, los dos requisitos de rigidez y ductilidad característicos del diseño sísmico.

La capacidad de los eslabones activos de disipar grandes cantidades de energía durante sobrecargas extremas es de importancia crítica para la ductilidad de conjunto del sistema estructural; se ha encontrado, por medio de estudios de laboratorio, que los eslabones que fluyen principalmente en cortante son más eficientes que los que fluyen en flexión.

La elección de las excentricidades constituye uno de los pasos más importantes en el diseño de marcos contraventeados excéntricamente, pues de sus valores depende tanto la rigidez elástica del marco como la demanda de ductilidad en los eslabones activos.

En resumen, los marcos contraventeados excéntricamente son estructuras dúctiles en las que las deformaciones inelásticas se confinan a regiones en las que no afectan de manera adversa la resistencia y estabilidad de conjunto de la estructura.

Los contraventeos, las columnas y las vigas, estas últimas en las zonas que no forman parte de los eslabones activos, se diseñan para que permanezcan en el intervalo elástico, y no se pandeen; prácticamente toda la actividad inelástica se

(En pág. 14, Curso internacional)

La ductilidad que se obtiene por medio de deformaciones inelásticas reversibles es la justificación principal para que el diseño sísmico se haga con fuerzas mucho menores que las que aparecerían en una estructura elástica durante un temblor de tierra intenso. Sin embargo, la capacidad de los marcos contraventeados para resistir deformaciones inelásticas reversibles está severamente limitada. El alargamiento y el acortamiento axial de miembros esbeltos no son reversibles, y el de elementos comprimidos más robustos es posible sólo hasta que se presenta un pandeo significativo; se ha encontrado, de manera experimental, que la resistencia de miembros bajo carga axial disminuye ~~avanz~~ rápidamente cuando se les somete a cargas cíclicas después de que se inicia el pandeo; además, no recuperan su forma recta original.

Por las razones anteriores, los contraventeos sólo se permiten cuando están acompañados por marcos rígidos que pueden soportar una parte sustancial de la fuerza sísmica total. En esas condiciones, el RFD93 permite que se diseñen con un factor de comportamiento sísmico igual al de marcos rígidos sin contraventeo; en cambio, en SEAOC y en ASCE se especifica una fuerza de diseño 1.5 veces mayor.

El comportamiento, durante temblores, de los marcos contraventeados, es aceptable mientras conservan una configuración estable; en general, su respuesta en el intervalo elástico es excelente, pero puede no serlo fuera de él; las recomendaciones para diseño buscan evitar fallas frágiles y elevar el nivel de respuesta estable.

Cuando se pandea un elemento de contraventeo comprimido, se presentan varios fenómenos:

- a. Una parte de la carga se transfiere a la diagonal en tensión, con lo que aumenta la fuerza que debe resistir.
- b. Pueden ocasionarse rotaciones excesivas en los extremos de la diagonal, que pueden provocar la falla local de la conexión.
- c. Es posible una falla por pandeo local o torsional en la zona central de la diagonal.
- d. Si el contraventeo se sale de su plano original, destruye los elementos no estructurales colocados a sus lados.
- e. El pandeo puede presentarse en forma asimétrica en los varios sistemas de contraventeo del edificio, ocasionando un incremento de la torsión, tal vez significativo.

Las relaciones de esbeltez reducidas y los esfuerzos bajos disminuyen, o evitan, la deformación del contraventeo fuera de su plano; esto es lo que se busca con las recomendaciones de los códigos. Además, debe prestarse especial cuidado para evitar el pandeo o la fractura de las placas de conexión, el pandeo local del contraventeo y la fractura de las soldaduras de unión, cuando las diagonales están formadas por varios perfiles (dos ángulos, por ejemplo), así como el pandeo entre ellas.

Concentra, ~~pues~~, en zonas escogidas, diseñadas y detalladas especialmente. El resto de la estructura se dimensiona para que resista, trabajando elásticamente, las sollicitaciones que aparecen en ella mientras los eslabones activos fluyen plásticamente, las que se determinan estudiando el mecanismo de colapso del marco; posteriormente se revisa su comportamiento bajo cargas de trabajo, utilizando métodos elásticos.

Tubos reticulares. Si se incrementa la resistencia de los marcos de las fachadas, colocando columnas muy juntas y aumentando los peraltes de las vigas, y se hacen continuos en las esquinas, se obtiene un cantiliver tubular de paredes perforadas, que es muy eficiente para resistir fuerzas horizontales.

En la Fig. ^{6.7 aparece} ~~(Fig. 46, pág. 655, "Construccional...")~~ se muestra la distribución de fuerzas normales en las columnas. Si las paredes del tubo fueran macizas, serían iguales en todas las columnas de los marcos de "los patines", y tendrían una distribución triangular en las columnas de "las almas"; sin embargo, las deformaciones por cortante de los marcos rígidos reales reducen la eficiencia del cantiliver. Debe buscarse ^{el} ~~un~~ comportamiento ~~lo~~ más cercano posible al del voladizo de paredes macizas; ^{se} ~~se~~ logra que la deformación por cortante no exceda del 25% de la total.

Tubos con diagonales. El tubo con diagonales en las fachadas constituye una solución muy apropiada para estructuras de acero. En el sistema tubular ideal todas las columnas exteriores se interconectan por medio de diagonales, de manera que se forma una estructura tridimensional muy rígida, que resiste las ^{acciones} ~~fuerzas~~ laterales con las fuerzas axiales que se generan en los miembros, en vez de utilizar su resistencia a la flexión.

Comparado con el tubo reticular, este sistema tiene la ventaja de que permite separaciones mucho mayores entre las columnas de las fachadas.

Los tubos con diagonales resisten las fuerzas horizontales de manera muy eficiente, pero pueden no ser adecuados para zonas de alta sismicidad, porque su ductilidad es limitada. Sin embargo, pueden combinarse con marcos rígidos dúctiles, o interconectarse por medio de elementos de ductilidad suficiente (Fig. ^{6.8} ~~de~~, ~~pág. 669, "Construccional...")~~).

Los dos sistemas estructurales anteriores influyen de manera importante en la arquitectura de los edificios, sobre todo en las fachadas, lo que no está muy de acuerdo con las tendencias arquitectónicas actuales.

Supermarcos o megamarcos. La estructura de un supermarco está constituida por piernas verticales situadas en las esquinas del edificio, ligadas entre sí por elementos horizontales colocados cada 10 a 20 pisos. Tanto las piernas como los elementos horizontales ^{Tienen} ~~son estructuras~~ de grandes dimensiones (Fig. ~~26a,~~ ^{69).} pág. ~~661~~ "Constructional...").

Los supermarcos ^{admiten} ~~permiten el acomodo de~~ espacios variables, adecuados para múltiples funciones. Históricamente, los edificios altos han estado destinados a oficinas o departamentos, pero las megaestructuras de muchos pisos deberán integrar varias funciones en un sólo edificio, con espacios flexibles que puedan ser planeados eficientemente para la actividad que ~~vaya a desarrollarse~~ ^{se} desarrollarse en cada uno de ellos, y con la menor interferencia posible de la estructura.

La eficiencia estructural se obtiene de la concentración de columnas en ~~las esquinas de~~ las esquinas; aumenta transfiriéndoles las cargas de las columnas interiores, de manera que crecen su rigidez y resistencia, y se contrarrestan las tensiones producidas por las fuerzas horizontales.

Parámetros de diseño. La elección del sistema estructural que resistirá las fuerzas horizontales depende de gran número de variables; las más importantes son las deflexiones laterales de entrepiso, los efectos geométricos de segundo orden ($P\Delta$), las tensiones en la cimentación y las frecuencias de vibración del edificio.

Las deflexiones laterales de entrepiso deben mantenerse por debajo de límites que aseguren un comportamiento satisfactorio de elementos no estructurales, como muros y cancelas, durante sismos frecuentes de poca intensidad.

El efecto geométrico de segundo orden conocido como efecto $P\Delta$ está íntimamente ligado con la rigidez lateral del edificio y, por consiguiente, con sus desplazamientos de entrepiso. Hace que crezcan los elementos mecánicos con respecto a los de primer orden.

Un parámetro muy importante para determinar los límites de aplicación de un sistema dado ~~es el constituido por~~^{son} las tensiones (o fuerzas "hacia arriba") que aparecen en las columnas, sobre todo en ~~el~~^{el} tramo inferior. Un edificio puede rigidizarse de manera que sus desplazamientos laterales se conserven dentro de los límites de diseño, pero al hacerlo es posible que una parte del sistema resistente "atraiga" fuerzas horizontales de magnitud tal que aparezca en ella un momento de volteo ~~tan grande~~ que origine fuerzas de tensión en la cimentación, cuya capacidad para soportar fuerzas hacia arriba suele ser reducida; este fenómeno puede limitar la aplicación de un sistema estructural determinado.

En edificios muy esbeltos es frecuentemente necesario transferir cargas verticales de las columnas interiores a las de la periferia, para contrarrestar las fuerzas hacia arriba.

La primera frecuencia de vibración transversal en cada dirección y la frecuencia torsional tienen una influencia considerable en el comportamiento de los edificios altos. Es preferible que los periodos correspondientes estén separados uno de otro cuando menos en 15%, y que el torsional sea el tercero. Se evitan así acoplamientos dinámicos de los modos, que pueden ocasionar una respuesta inconveniente.

Los periodos fundamentales de vibración del edificio deben estar suficientemente separados del periodo del terreno, para evitar posibles fenómenos de amplificación por resonancia.

Una suposición básica en el análisis y diseño sísmico de edificios altos es ~~la de~~ que los sistemas de piso, actuando como diafragmas, transfieren las fuerzas horizontales a los elementos resistentes y las distribuyen entre ellos en proporción a sus rigideces laterales. Los esfuerzos en los diafragmas de edificios normales son pequeños, y pueden ser resistidos, sin problemas, por el sistema de piso. Sin embargo, deben revisarse las zonas en que haya cambios bruscos de rigidez lateral, y cuando las cortantes horizontales se transfieren de un elemento resistente a otro que no se encuentra en el mismo plano vertical. Los esfuerzos en los diafragmas pueden ser también críticos cuando hay en ellos aberturas de dimensiones considerables.

5. CONEXIONES

Las conexiones deben ser capaces de transmitir los esfuerzos mecánicos calculados en los miembros que ligen, satisfaciendo, al mismo tiempo, las condiciones de restricción y continuidad supuestas en el análisis de la estructura.

Las conexiones están formadas por elementos de unión (atiesadores, placas, ángulos, ménsulas) y conectores (soldaduras, tornillos, remaches). Los elementos componentes se dimensionan de manera que su resistencia de diseño sea igual o mayor que la solicitación de diseño correspondiente, determinada, a) por medio de un análisis de la estructura bajo cargas de diseño, b) como un porcentaje especificado de la resistencia de diseño de los miembros conectados. Con frecuencia se diseñan para desarrollar la capacidad íntegra de los miembros conectados, incrementada muchas veces, sobre todo en diseño sísmico, para tener en cuenta la sobrerresistencia debida al endurecimiento por deformación del material.

Uniones viga-columna en marcos rígidos de edificios.

~~Uniones rígidas entre vigas y columnas.~~ En lo que sigue se da el nombre de "conexión" al conjunto de elementos que unen las vigas con la columna (placas o ángulos por patines o alma, soldaduras, remaches, tornillos), y se llama "junta" a la zona completa de intersección de los miembros; en la mayoría de los casos la junta es la parte de la columna, incluyendo atiesadores o placas adosadas al alma, que queda comprendida entre los planos horizontales que pasan por los bordes superior e inferior de la viga de mayor peralte.

→ Págs. 1060 a 1067 y 1072

En el diseño se supone que los elementos que experimentan deformaciones plásticas grandes aplican a ~~los otros elementos de~~ la unión cargas iguales a 1.25 veces su resistencia máxima no factorizada, y se considera que un elemento responde elásticamente cuando las solicitaciones a que está sometido no exceden su resistencia de diseño.

Las resistencias en los extremos de vigas y columnas se determinan como si ^{la} estuviesen sometidas a carga ^{curse} estática, con las modificaciones indicadas en la sección 4, y la de la junta se evalúa con los métodos que se presentan más adelante.

En general se considera conveniente que no sean las columnas las que fluyan plásticamente, para evitar mecanismos de colapso restringidos a un solo entrepiso, que exigen una ductilidad elevada, muchas veces excesiva. Sin embargo, aparecen articulaciones plásticas en las bases de las columnas inferiores, y ~~debe reconocerse que en~~ hay casos en los que es impráctico evitar la plastificación de columnas de entrepisos superiores; eso sucede ^{por ejemplo,} cuando se emplean vigas de alma abierta (armadura).

Resistencia de la conexión. La resistencia de la conexión de cada viga debe ser suficiente para transmitir ^{ci} al menos, 1.25 veces las acciones internas de diseño que haya en el extremo de la viga, sin que sea necesario sobrepasar su resistencia o la de la junta.

desplazamientos lineales o angulares relativos entre los extremos de las barras que concurren en ^{ellas,} ~~cada nudo~~; para que el comportamiento de la estructura real corresponda al supuesto, no basta con analizar y diseñar vigas y columnas con gran exactitud, sino se requiere también que las uniones entre ellas se diseñen y construyan de manera que se satisfaga esa suposición.

Hasta hace pocos años las ^{uniones} ~~conexiones~~ se trataban, ~~en general,~~ como si no tuviesen dimensiones, como si fuesen el punto de intersección de los ejes de las barras que concurren en ellas; si se consideraban las dimensiones, se suponía que eran indeformables. La realidad es otra: las ^{uniones} ~~conexiones~~ son elementos estructurales deformables de dimensiones finitas; sus deformaciones, sobre todo las producidas por las fuerzas cortantes en el tablero limitado por los bordes interiores de los patines de vigas y columnas, pueden influir de manera significativa en la respuesta bajo carga de la estructura, lo que obliga a ^{darles} ~~propor-~~ ~~cionarles~~ una rigidez suficiente para que las deformaciones no afecten el comportamiento de la estructura, o a tenerlas en cuenta en el análisis cuando sean significativas.

El comportamiento de los marcos rígidos depende en buena medida del de sus ^{uniones} ~~juntas~~; si su rigidez es insuficiente pueden permitir rotaciones elásticas y comportarse como uniones semi-rígidas, lo que hace que los momentos en otras zonas de la estructura sean mayores que los determinados en el análisis (por ejemplo, aumentan los momentos positivos que producen las cargas

verticales en la parte central de las vigas); si su resistencia es baja, pueden ser incapaces de resistir las sollicitaciones que obran sobre ellas, o de alcanzar y mantener, durante rotaciones importantes, los momentos necesarios para que se forme el mecanismo de colapso, lo que ocasiona una disminución de la resistencia del marco.

Como el diseño correcto de un marco rígido requiere un conocimiento completo del comportamiento de sus ^{uniones,} ~~conexiones~~, en los intervalos elástico e inelástico, se han realizado muchos estudios, analíticos y experimentales, para determinarlo; la mayor parte de ellos, sobre todo los recientes, se refiere a ^{uniones} ~~juntas~~ soldadas, con tornillos de alta resistencia, o con una combinación de ambos.

Buena parte de los estudios se ha encaminado a conocer el comportamiento bajo carga estática, pero en los últimos años se han investigado también las ^{uniones} ~~conexiones~~ cargadas cíclicamente, para obtener métodos de diseño aplicables a marcos rígidos de edificios construidos en zonas sísmicas.

Las cuatro ^{uniones} ~~conexiones~~ viga-columna que se emplean en marcos de edificios se muestran en la Fig ^{5.1} ~~5-8-1~~; las dos primeras corresponden al nivel superior y las otras dos a uno intermedio; en cada caso se ha dibujado una columna lateral y una interior.

Como es usual en estructuras reales, la columna pasa a través de la junta, y las vigas se unen a sus patines. (*Escribir la nota de pie de pág. entre paréntesis)

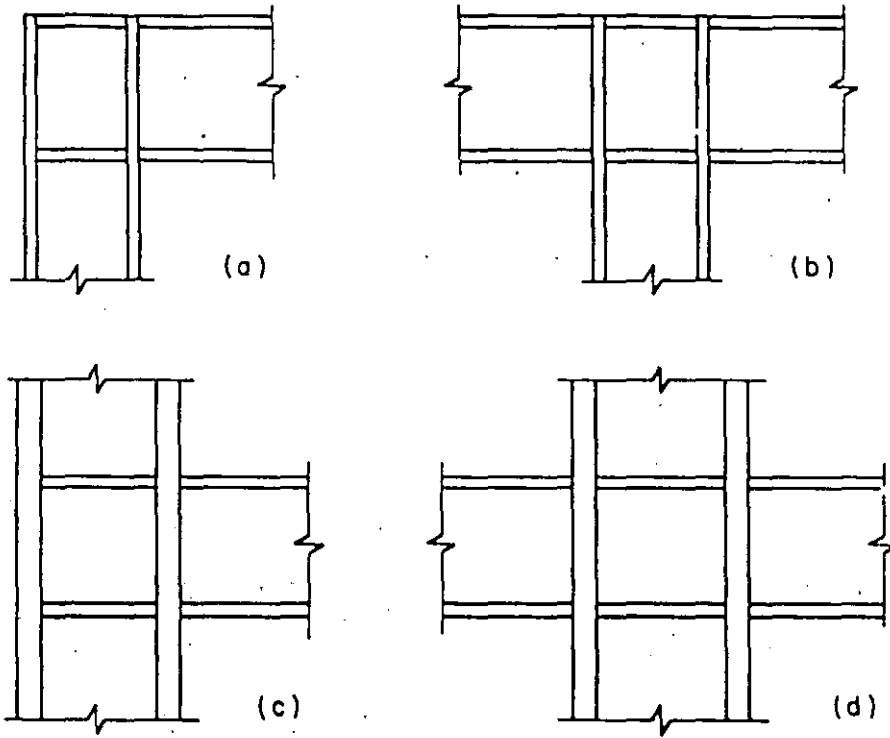


Fig 5.8-1 Conexiones viga-columna de marcos rígidos

Casi todos los estudios realizados hasta ahora han correspondido a marcos planos, con una o dos vigas unidas a los patines de la columna; sin embargo, en estructuras reales hay casi siempre tres o cuatro vigas en cada ^{unión} conexión, pues en cada columna se cruzan dos marcos; las vigas llegan a uno o a los dos patines y a uno o ambos lados del alma.

*Este no es un requisito indispensable; puede haber ocasiones en que convenga que los elementos que se interrumpen en la conexión sean las columnas. Sin embargo, es la situación más común, pues se facilita el montaje de la estructura y se obtienen conexiones más resistentes, en vista de que los perfiles usados como columnas suelen ser mayores que las vigas y su alma es, en general, más gruesa.

Cuando la columna pasa a través de la ^{unión,} junta, el diseño de ^{esta} ~~la~~ ~~conexión~~ consiste en:

1. Dimensionamiento de los medios de unión entre traveses y columna, necesarios para transmitir a ésta los elementos mecánicos de las secciones extremas de aquellas, utilizando soldadura, remaches~~o~~ o tornillos de alta resistencia. En juntas soldadas la unión puede ser directa o por medio de placas en los patines, ángulos o placas en el alma, o asientos; en juntas atornilladas siempre se utilizan placas, ángulos u otros elementos (tés, por ejemplo).
2. Revisión de la columna para determinar si tiene resistencia y rigidez adecuadas para soportar las solicitaciones que recibe de las vigas, al mismo tiempo que actúa sobre ella la compresión que proviene de los niveles superiores.
3. Diseño, en su caso, de los refuerzos necesarios: atiesadores entre los patines de la columna, placas adosadas o paralelas al alma.

Bajo carga vertical las ^{uniones} ~~juntas~~ más críticas suelen ser las laterales (Fig 5-8-1, a y c), porque los momentos que recibe una columna central de las dos vigas son, en general, de signos contrarios, por lo que tienden a equilibrarse; la situación cambia cuando obran sobre la estructura fuerzas horizontales ocasionadas por viento o sismo.

* Los remaches casi no se usan en estructuras modernas; no se tratarán aquí.

~~Características de las conexiones~~ ^{uniones}. Para que el comportamiento de una ~~junta~~ ^{unión} sea satisfactorio, han de satisfacerse los requisitos siguientes:

Resistencia. Las ~~conexiones~~ ^{uniones} deben ser capaces de resistir las acciones que les transmiten los miembros de la estructura que llegan a ellas. En diseño elástico, el límite de utilidad estructural debería ser la aparición del esfuerzo de fluencia en la junta o en el extremo de alguna de las vigas o columnas.* En ^{escribir la nota entre ()} En diseño plástico, el estado límite lo constituye la formación de una articulación plástica en la junta o en una o varias de las vigas y columnas; la ~~conexión~~ ^{unión} debe resistir las solicitaciones de los miembros que la rodean hasta que se formen en éstos las articulaciones plásticas necesarias para que la estructura se convierta en un mecanismo.

Rigidez. La rigidez, en el intervalo elástico, de las ~~conexiones~~ ^{uniones} viga-columna, debe ser suficiente para que las posiciones relativas de todos los elementos estructurales se conserven fijas bajo cargas de trabajo.

*El estado de esfuerzos en las ~~conexiones~~ ^{uniones} es muy complejo, pues los esfuerzos producidos por los momentos flexionantes, fuerzas normales y fuerzas cortantes que les transmiten las vigas y columnas, ya de por sí complicados y difíciles de evaluar, se superponen con los residuales que hay siempre en los perfiles de acero y con los que ocasiona la soldadura; ésto hace que bajo cargas de trabajo (y, seguramente, antes de aplicar esas cargas) haya ya zonas localizadas en estado plástico. La imposibilidad de determinar los esfuerzos reales en condiciones de servicio, y el hecho de que la aparición del esfuerzo de fluencia en algún punto no constituye un estado límite de resistencia, hacen que ~~en la práctica actual,~~ ^{uniones} las ~~conexiones~~ se diseñen con métodos plásticos simplificados, ^{en su caso} aunque el diseño de la estructura en general se efectúe utilizando esfuerzos permisibles.

Capacidad de rotación. Las ^{uniones} ~~conexiones~~ deben admitir rotaciones inelásticas importantes conservando la resistencia a la flexión correspondiente a la formación, en ellas, de una articulación plástica, o tener resistencia y rigidez suficientes para que se formen articulaciones plásticas en el extremo contiguo a ellas de alguno o algunos de los miembros, y que giren, bajo momento M_p constante, los ángulos necesarios para las redistribuciones de momentos que ^{se presentan durante} ~~preceden~~ la formación del mecanismo de colapso.

Esta característica es indispensable para que la estructura alcance la carga de colapso teórica, pues para ello tienen que formarse todas las articulaciones requeridas para el mecanismo sin que disminuya el momento resistente de ninguna, lo que sólo sucede cuando su capacidad de rotación bajo momento M_p constante es suficiente.

Las ^{uniones} ~~juntas~~ de estructuras diseñadas elásticamente no requieren, en teoría, capacidad de rotación, ya que el límite de utilidad estructural corresponde a la aparición del esfuerzo de fluencia en alguna zona crítica; sin embargo, la ductilidad es deseable como una protección contra fallas frágiles y para obtener un comportamiento aceptable bajo sollicitaciones sísmicas. (Los esfuerzos evaluados con métodos elásticos aplicados a estructuras de cierta complejidad tienen poco que ver con los que realmente existen en ellas; su utilidad estriba en que permiten comparar el comportamiento previsto de la estructura que se está diseñando con el de otras ya construidas, diseñadas con los

mismos métodos, que se han comportado satisfactoriamente. Las incertidumbres en el cálculo de los esfuerzos provienen de dificultades en la evaluación de las solicitaciones, sobre todo sísmicas, de la complejidad de las estructuras y su interacción con muros, contravientos verticales, sistemas de piso y rampas de escaleras, de la existencia de esfuerzos residuales y concentraciones de esfuerzos, así como de la interacción suelo-estructura que puede ocasionar, entre otros fenómenos, hundimientos diferenciales de los apoyos; por todo esto, las ^{uniones} ~~juntas~~ deben diseñarse para que permitan un comportamiento dúctil de las estructuras bajo solicitaciones mayores que las calculadas, pues en caso contrario la falla puede presentarse mucho antes de que se alcance la resistencia máxima teórica. Por las razones expuestas, las ^{uniones} ~~juntas~~ de los marcos diseñados elásticamente deben dimensionarse y construirse de manera que posean una capacidad de rotación suficiente).

Economía. La resistencia, rigidez y capacidad de rotación de una ^{unión} ~~junta~~ pueden incrementarse siempre aumentando la cantidad de material utilizada en ella; sin embargo, como una parte importante del costo de fabricación de los marcos rígidos corresponde a las ^{uniones,} ~~conexiones,~~ ~~éstas~~ han de diseñarse de manera que tengan propiedades satisfactorias con el menor incremento posible de material y mano de obra. Además, han de proyectarse para que permitan un montaje sencillo y rápido.

Sigue la pág. 1067 a

~~CS. 8.3 Diseño de conexiones cargadas estáticamente. El diseño~~

El comportamiento dúctil y la absorción inelástica de energía pueden presentarse en tres elementos de las ^{uniones} ~~uniones~~ de los marcos rígidos: los extremos de las vigas y columnas, ~~que concurren en la junta~~, en los que pueden formarse articulaciones plásticas por flexión, y la zona común a vigas y columnas, que puede fluir por cortante. Dentro de ciertos límites, se permite el comportamiento inelástico de cualquiera de esos elementos o de una combinación de dos o más de ellos. La elección final queda en manos del ingeniero estructural. Los problemas que han de resolverse en el diseño dependen, en buena parte, de cuál de las tres áreas se escoge para que tenga el umbral de inelasticidad más bajo.

La preocupación principal al diseñar un marco que debe ser capaz de responder inelásticamente es evitar fracturas frágiles y pandeo severo en las zonas inelásticas.

Aunque puede permitirse el flujo plástico en las columnas, la mayoría de los ingenieros considera que es el menos deseable; cuando se diseña para que se presente, se limita la fuerza axial en la columna y se toman medidas especiales para contraventearla. Cuando el comportamiento inelástico se inicia por flujo plástico por cortante en la ^{junta} ~~zona común a vigas y columnas~~, su flexibilidad contribuye significativamente a los desplazamientos totales de entrepiso, por lo que debe considerarse en el diseño. Si se escoge evitar el comportamiento inelástico en las dos zonas anteriores, las articulaciones plásticas se formarán en los extremos ~~de~~ las vigas, lo que hace que los aspectos críticos del diseño sean la conexión viga-columna y la estabilidad de la viga. /u

Los requisitos que deben satisfacerse en el diseño de las ^{uniones} ~~conexiones~~ tienen por objeto asegurar que las deformaciones plásticas que pueden presentarse en ellas durante la respuesta a sismos severos no tendrán lugar en los elementos de ^{conexión} ~~unión~~, sino en alguna de las dos zonas adyacentes, la viga o el ~~tablero de alma de la junta~~. El diseño no se hace para las fuerzas obtenidas en el análisis, sino para las resistencias nominales de los miembros que emplean realmente en la estructura, evitando así que las ^{uniones} ~~conexiones~~ fallen antes de que se presenten las deformaciones inelásticas necesarias; ésto es cierto aún cuando los miembros estén sobrediseñados por resistencia, por ejemplo cuando se aumentan sus dimensiones para reducir los desplazamientos de entrepiso.

Una unión viga-columna se considera adecuada para desarrollar la resistencia de la viga si satisface alguna de las condiciones siguientes:

a) Los patines de la viga ^{se sueldan} están soldados a tope, con ~~soldaduras de~~ penetración completa, a los ~~patines~~ de la columna, y el alma de la viga ^{se} está conectada a la columna, o a una placa vertical soldada a ella, con soldaduras capaces de desarrollar toda su resistencia, o ~~capaces~~ de resistir, como mínimo, el 50 por ciento de la parte del momento plástico de la viga que corresponde al alma más la fuerza cortante que haya en ella, la que se transmite con soldadura adicional o con pernos de alta resistencia que trabajen por fricción.

b) El módulo de sección plástico de los patines es mayor que el 70 por ciento del módulo de sección plástico de la viga completa (es decir, $b_p t_p (d - t_p) F_{yp} \geq 0.7 M_p$). Los patines de la viga ^{se} están ~~soldados~~ ^{sueldan} a tope, con ~~soldaduras de~~ penetración completa, a los de la columna, y el alma de la viga ^{se} está conectada a la columna, directamente o a través de una placa, por medio de soldaduras o tornillos de alta resistencia que transmiten la fuerza cortante que hay en ella.

c) $b_p t_p (d - t_p) F_{yp} < 0.7 M_p$. ^{Los patines de la viga se sueldan a tope y el} El alma se suelda a la columna directamente o por medio de una placa, con una soldadura que tenga una resistencia de diseño no menor que el 20 por ciento de la resistencia nominal a la flexión del alma. La fuerza cortante en la viga se transmite con soldadura adicional o con pernos de alta resistencia que trabajen por fricción.

d) La conexión, hecha con soldadura o con tornillos de alta resistencia, tiene características diferentes de las indicadas en a, b o c, pero se ha demostrado, por medios analíticos o experimentales, que posee la resistencia requerida. Cuando la demostración se haga analíticamente, la resistencia de diseño de la conexión será 25 por ciento mayor que la ~~resistencia de diseño~~ del elemento conectado; y no se supondrá que las soldaduras y los tornillos contribuyen a transmitir la misma fuerza.

Las condiciones señaladas en a, b y c, que han de cumplirse para que una conexión entre viga y columna desarrolle la resistencia de la primera, están basadas en resultados de laboratorio, obtenidos mediante ensayos estáticos y dinámicos. Cuando la resistencia en flexión de los patines es un porcentaje elevado de la resistencia de la sección completa, los primeros pueden transmitir el momento plástico por sí solos, gracias al endurecimiento por deformación, por lo que la conexión del alma puede diseñarse sólo por fuerza cortante. En cambio, en secciones en las que el alma contribuye significativamente a la resistencia a la flexión debe conectarse para que se transmita, a través de ella, la fuerza cortante completa y el porcentaje del momento plástico que le corresponde, con lo que se evita un endurecimiento por deformación excesivo de los patines. (Comentarios por el temblor de Northridge). Ver las Figuras siguientes.

En la Fig. 5.2 se muestran varios tipos de juntas rígidas viga-columna que se han utilizado en la práctica.

Conexiones con vigas en el alma de la columna.

Comentario NTC-RDF, págs. 1101 a 1106.

Revisión de la columna. Cuando las vigas están unidas a los patines de la columna, deben revisarse los estados límite siguientes:

- a) Flexión local del patín de la columna frente al patín en tensión de la viga.
- b) Flujo plástico local del alma de la columna frente a cualquiera de los patines de la viga.
- c) Aplastamiento del alma de la columna frente al patín comprimido de la viga.
- d) Pandeo del alma de la columna por compresión-frente al patín comprimido de la viga.
- e) Cortante en el alma de la columna.

Comentario NTC, pág. 1075 a 1078.

va inmediatamente después del título "Revisión de la columna".

A continuación se indica cómo se revisan los estados límite indicados arriba.

a) **Flexión local del patín.** Si la resistencia requerida del patín de la columna frente al patín en tensión de la viga excede de $F_c R_n$, donde

$$F_c = 0.90$$

$$R_n = 6.25 t_p^2 F_y \quad \text{Ec. 5.1}$$

se colocará un par de atiesadores transversales en el alma de la columna, frente al patín de la viga, que se prolongarán, cuando menos, hasta la mitad del peralte del alma.

Las literales que aparecen en las expresiones anteriores tienen los significados siguientes:

F_y = esfuerzo mínimo especificado de fluencia del patín de la viga

t_p = grueso del patín de la viga

No es necesario revisar la ec.5.1 cuando el ancho del patín de la viga es menor que 0.15 veces el del patín de la columna.

Si el patín en tensión de la viga está unido a la columna a una distancia del extremo de ésta menor que $10 t_p$ (lo que puede suceder en ^{el último piso de los} los tramos superiores de las columnas de edificios), R_n se reduce en 50 por ciento.

Cuando se coloquen atiesadores transversales, se soldarán al patín y al alma de la columna con la soldadura necesaria para transmitir la fuerza que les corresponda.

b) **Flujo plástico local del alma.** Se colocará un par de atiesadores transversales, o una placa de refuerzo adosada al alma de la columna que llegue, cuando menos, hasta la mitad de su peralte, frente a cualquiera de los patines de la viga, siempre que la resistencia requerida del alma en el inicio de la curva de unión con los patines sea mayor que $F_c R_n$, donde $F_c = 1.0$ y R_n se determina como sigue:

1) Cuando el patín está unido a la columna a una distancia de su extremo mayor que d ,

$$R_n = (5k + N)F_y t_c \quad \text{Ec. 5.2}$$

2) Cuando la distancia es menor o igual que d ,

$$R_n = (2.5k + N)F_u t_c \quad \text{Ec. 5.3}$$

donde

d = peralte total de la columna

F_u = esfuerzo mínimo especificado de fluencia del alma de la columna

N = grueso del patín de la viga

k = distancia de la cara exterior del patín de la columna al punto donde se inicia la curva de unión de alma y patín

t_c = grueso del alma de la columna

Los atiesadores ^{correspondientes} colocados frente al patín en tensión de la viga, se soldarán al patín de la columna para que transmitan la parte de la fuerza de tensión que les corresponda. Los que estén frente al patín comprimido pueden soldarse al patín de la columna o ajustarse contra él, para recibir la fuerza por apoyo directo. Unos y otros deben unirse al alma de la columna con la soldadura necesaria para transmitirle la fuerza que hayan recibido de la viga.

En lugar de colocar atiesadores transversales, el alma de la columna puede reforzarse por medio de placas adosadas a ella.

c. **Aplastamiento del alma.** Cuando la resistencia del alma de la columna frente al patín comprimido de la viga deba ser mayor que $F_u R_n$, donde $F_u = 0.75$ y R_n se determina como se indica más adelante, el alma de la columna se reforzará con un atiesador transversal, un par de atiesadores transversales, o una placa adosada a ella, de altura igual, cuando menos, a la mitad de su peralte.

1) Cuando el patín está unido a la columna a una distancia de su extremo mayor o igual que $d/2$,

$$R_n = 1140t_w^2 \left[1 + 3 \left(\frac{N}{d} \right) \left(\frac{t_a}{t_p} \right)^{1.5} \right] \sqrt{\frac{F_y t_p}{t_a}} \quad \text{Ec. 5.4}$$

2) Cuando el patín está unido a la columna a una distancia de su extremo menor que $d/2$,

Para $N/d \leq 0.2$,

$$R_n = 570t_w^2 \left[1 + 3 \left(\frac{N}{d} \right) \left(\frac{t_a}{t_p} \right)^{1.5} \right] \sqrt{\frac{F_y t_p}{t_a}} \quad \text{Ec. 5.5}$$

Para $N/d > 0.2$,

$$R_n = 570t_w^2 \left[1 + \left(\frac{4N}{d} - 0.2 \right) \left(\frac{t_a}{t_p} \right)^{1.5} \right] \sqrt{\frac{F_y t_p}{t_a}} \quad \text{Ec. 5.6}$$

t_c es el grueso del patín de la columna.

Cuando se necesiten atiesadores, se ajustarán o soldarán al patín y al alma de la columna, para transmitir la fuerza que haya en ellos..

d. **Pandeo del alma de la columna.** Cuando la resistencia del alma de la columna frente al patín comprimido de la viga deba ser mayor que $F_c R_n$, donde $F_c = 0.90$ y R_n se determina como se indica más adelante, el alma de la columna se reforzará con un atiesador transversal, un par de atiesadores transversales, o una placa adosada a ella, de altura igual, cuando menos, a su peralte.

$$R_n = \frac{34390 t_a^3 \sqrt{F_{ya}}}{h} \quad \text{Ec. 5.7}$$

Si la distancia del patín comprimido al extremo de la columna es menor que $d/2$, R_n se reduce en 50 por ciento.

Cuando se necesiten atiesadores, se ajustarán o soldarán al patín y al alma de la columna, para transmitir la fuerza que haya en ellos.

e. **Cortante en el alma de la columna.** ~~(El alma de la viga es paralela a la de la columna).~~

1. Resistencia a cortante. La resistencia a cortante requerida en la junta, V_n , se basará en los momentos flexionantes de los extremos de las vigas, pero no es necesario que exceda de $0.9 \sum F_R M_p$ de las vigas que llegan a la columna. La resistencia de diseño de la junta, $F_R V_n$, se determina con la expresión

$$F_R V_n = 0.6 F_y F_R d_c t_p \left[1 + \frac{3 b_{pc} t_{pc}^2}{d_v d_c t_p} \right] \quad \text{Ec. 5.8}$$

donde $F_R = 0.75$ y

t_p = grueso total del alma de la junta, incluyendo placas adosadas a ella

d_c = peralte total de la columna

b_{pc} = ancho del patín de la columna

t_{pc} = grueso del patín de la columna

F_y = esfuerzo de fluencia mínimo especificado del acero de la junta

2. Grueso de la junta. Para reducir a un mínimo la posibilidad de que se presente una falla por pandeo por cortante durante las deformaciones inelásticas de la junta, el grueso del alma de la columna debe satisfacer la condición

$$t_c \geq (d_j + e_j) / 90 \quad \text{Ec. 5.9}$$

donde d_j y e_j son el peralte y el ancho de la junta medidos, respectivamente, entre los atiesadores horizontales y entre los patines de la columna.

En t_c no se incluye el grueso de placas adosadas al alma de la columna, a menos que se unan a ella por medio de soldaduras de tapón que eviten el pandeo local individual de cada placa.

Placas adosadas al alma. Cuando se empleen placas adosadas ~~al alma~~ para aumentar la resistencia de diseño de la junta, o para reducir su relación peralte / grueso, se soldarán al alma de la columna, en sus dos bordes horizontales, con soldadura de filete corrida de tamaño no menor que el mínimo especificado, y se unirán a los patines con soldadura de filete o de penetración diseñada para desarrollar la resistencia al corte de la placa

Relación entre los momentos en las vigas y en las columnas. En las uniones viga-columna debe satisfacerse alguna de las relaciones siguientes:

$$\frac{\sum Z_c (F_{yc} - P_{uc} / A_f)}{\sum Z_v F_{yv}} \geq 1.0 \quad \text{Ec. 5.10}$$

$$\frac{\sum Z_c (F_{yc} - P_{uc} / A_f)}{V_n d_v H / (H - d_v)} \geq 1.0 \quad \text{Ec. 5.11.}$$

En las ecuaciones anteriores,

A_f = área total de la sección transversal de la columna.

F_{yv} = esfuerzo de fluencia mínimo especificado de la viga.

F_{yc} = esfuerzo de fluencia mínimo especificado de la columna.

H = promedio de las alturas de entrepiso arriba y abajo de la unión.

P_{uc} = fuerza axial de diseño en la columna.

V_n = resistencia nominal de la junta, calculada con la ec. 5.8.

Z_v y Z_c = módulo de sección plástico de una viga y de una columna.

d_v = promedio de los peraltes de las vigas que llegan a la unión.

No es necesario satisfacer los requisitos anteriores cuando:

- La compresión en las columnas satisface la condición $P_{uc} < 0.3F_{yc}A_f$.
- Las columnas forman parte de un entrepiso que tiene una relación resistencia al corte de diseño / fuerza cortante de diseño 50 por ciento mayor que la del entrepiso que está encima de él.
- La columna no forma parte del sistema que ~~resiste~~ ^{soporta} las fuerzas cortantes producidas por sismo, pero sí está incluida entre las que resisten los momentos de volteo.

Al imponer las condiciones dadas por las ecs. 5.10 y 5.11 se busca que las articulaciones plásticas se formen en las vigas, y no en las columnas.

que la segunda se flexione alrededor de su eje de menor momento de inercia. ~~(dets 5.8.18 y 5.8.19)~~. Los especímenes ensayados han sido del tipo mostrado en la Fig ^{5.3} 5-8-14; en la columna actúa una ~~presión~~ compresión, aplicada en el extremo superior, que reproduce los efectos de los niveles del edificio situados encima de ella.

El análisis y diseño de estas ^{uniones} ~~conexiones~~ es más difícil que ~~es~~ cuando las vigas se apoyan en ~~las~~ ~~de las que tienen las vigas unidas~~ a los patines de la columna, por las razones siguientes: ~~(dets 5.8.18 y 19)~~

1. La resistencia máxima de la ^{unión} ~~conexión~~ corresponde, en teoría, a la formación de articulaciones plásticas en la columna o en la viga. Sin embargo, hay otros factores que limitan esa resistencia; por ejemplo, si los patines de la viga son mucho más angostos que el alma de la columna, puede formarse en ésta un mecanismo con líneas de flujo antes de que aparezcan las articulaciones plásticas. Otros factores que pueden impedir que se alcance la resistencia máxima predicha por la teoría plástica simple son el pandeo local de los patines o el alma de la columna y la fractura de material del conjunto. La posible formación de un mecanismo con líneas de flujo ^{en el alma de la columna} o el pandeo local pueden obligar a rigidizar la columna.

2. El montaje en campo puede ser difícil, aunque la ^{unión} ~~conexión~~ se haya diseñado y detallado adecuadamente, a causa de las restricciones de espacio que crean los patines de la columna.

~~El objetivo de los estudios reportados en las refs 5.8.18 y~~
~~5.8.19 es examinar las conexiones~~ ^{se han estudiado las uniones} por alma desde los puntos de
vista de resistencia, rigidez y ductilidad, así como ~~considerar~~
los efectos que producen los atiesadores, cuando son necesarios
para alcanzar la resistencia o rigidez deseadas, ^{con la} ~~su~~ mira final
es formular recomendaciones para diseño.

El comportamiento de las ^{uniones} ~~conexiones~~ es adecuado, en general,
cuando se emplean atiesadores que evitan que el alma de la
columna se deforme (Fig ^{5.3} ~~5.8.14~~, b y c), pero puede no serlo si
el ancho del patín de la viga es menor que el peralte del alma
de la columna y la unión se hace en forma directa, sin atiesa-
dores (Fig ^{5.3.d} ~~5.8.14d~~), ya que puede formarse un mecanismo de falla
~~con líneas de flujo~~ en el alma de la columna, antes de que
aparezca un/articulación plástica en la viga. Además, aunque no
se forme ese mecanismo, lo que depende del ancho del patín y del
peralte de la viga, así como del peralte y grueso del alma de la
columna, es posible que no se alcance la carga máxima predicha
por la teoría plástica ~~simple~~ porque la unión mencionada oca-
siona elevadas concentraciones de esfuerzos y pérdida de ducti-
lidad, que pueden producir la fractura del material.

La mayor parte de las ^{uniones que se han ensayado} ~~conexiones ensayadas~~ falló por fractura
cuando la carga alcanzó el valor predicho por la teoría plástica
simple, o estaba cerca de él, sin que se presentasen deforma-
ciones plásticas significativas. Las grietas que ocasionaron la
falla se iniciaron en la unión del patín en tensión de la viga y

el alma de la columna en las conexiones como la mostrada en la Fig 5.8.14^{5.3d,}, y en el punto en que se unen la placa de conexión y el patín de la columna en las del tipo de la Fig 5.8.14^{5.3b,}; estas últimas grietas se debieron, probablemente, al estado triaxial de esfuerzos que se crea en el punto mencionado, ~~ver~~ ~~ver~~.

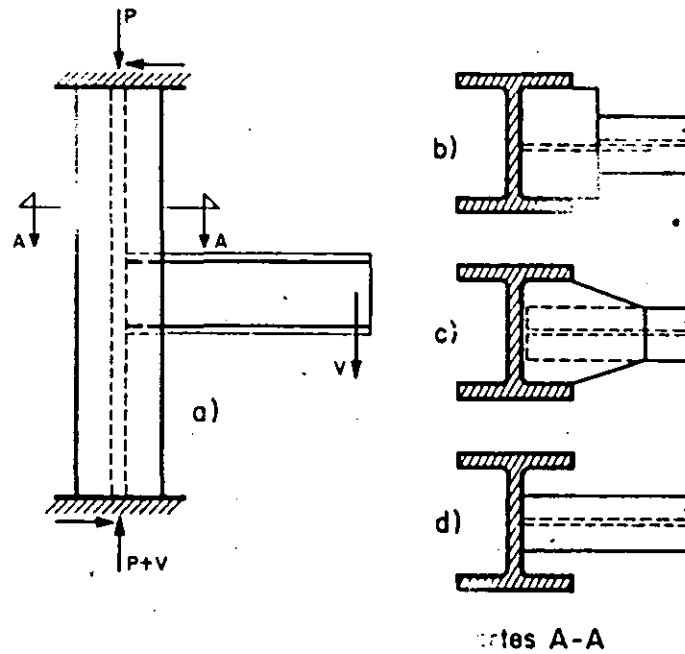


Fig 5.8.14 Viga conectada al alma de la columna.

Las ~~uniones~~ ^{uniones} juntas que no tienen capacidad de rotación bajo carga máxima no son satisfactorias, puesto que impiden la redistribución de momentos que es necesaria tanto en diseño plástico como en estructuras construidas en zonas de alta sismicidad.

~~En la ref 5.8.20 se sugieren~~ ^{Se han sugerido} medidas para mejorar el comportamiento de las ~~conexiones,~~ ^{uniones,} sobre todo desde el punto de vista de su capacidad de rotación (Fig 5.8.15)^{5.4}:

1. Empleo de placas para transmitir el momento de grueso mayor que el del patín de la viga (Fig ^{5.4a} ~~5-8-15a~~), con lo que se reducen las concentraciones de esfuerzos en las zonas de las placas adyacentes a los extremos de los patines de la columna.

2. Empleo de atiesadores en la columna del lado opuesto al que recibe la viga (Fig ^{5.4b} ~~5-8-15b~~). Algunos análisis realizados con elemento finito han indicado que las concentraciones de esfuerzos en las zonas indicadas en el punto 1 se reducen cuando menos en un tercio al colocar esos atiesadores.

3. Alargamiento de las placas de conexión para separar las soldaduras entre ellas y el patín de la viga y los de la columna, evitando la intersección de soldaduras y los elevados esfuerzos residuales asociados con ella (Fig ^{5.4c} ~~5-8-15c~~).

4. Uso de placas de ancho variable para reducir la concentración de esfuerzos en la sección crítica (Fig ^{5.4d} ~~5-8-15d~~).

5. Reducción de la ^{sección transversal de la} placa de conexión entre su unión con los patines de la viga y los de la columna, a cierta distancia de ambas uniones (Fig ^{5.4e} ~~5-8-15e~~).

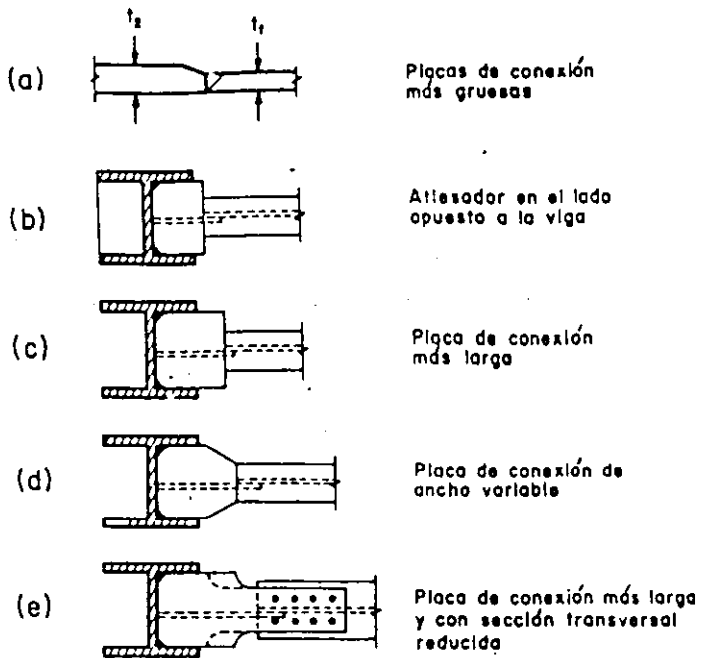


Fig 5.8.15 Medidas para mejorar el comportamiento de juntas con vigas unidas al alma de la columna

C5.8.3.4 Conexiones viga-columna cargadas estáticamente.

Resumen de resultados. Los resultados que se resumen aquí corresponden a juntas en las que la columna recibe vigas en uno o en los dos patines y en una o en las dos caras del alma.

Columnas no atiesadas. No se necesitan atiesadores frente a los patines comprimidos de las vigas si

$$t_c \geq \frac{C_1 A_p}{t_v + 5k_c} \quad \text{C5.8.2}$$

y, simultáneamente,

$$t_c \geq \frac{h_c \sqrt{F_{yc}}}{1510} \quad \text{C5.8.3}$$

o la fuerza aplicada por el patín de la viga no excede de

rotación tipo, más grande que la necesaria en la mayoría de los casos; todas las juntas ensayadas admiten rotaciones mayores, bajo momento casi constante. Además, como ya se ha mencionado, si se le dá a la junta la resistencia adecuada, las rotaciones necesarias para que se forme el mecanismo de colapso se presentan en los extremos de las vigas, y no en ella.

~~5.8.3 Conexiones con carga estática simétrica.~~ En la Fig 5.5 ~~5.8.5~~ se muestran esquemáticamente las sollicitaciones existentes en una ^{unión} ~~conexión~~ interior viga-columna con carga vertical simétrica; en la columna no hay flexión, pues los momentos que le transmiten las vigas se equilibran entre sí.

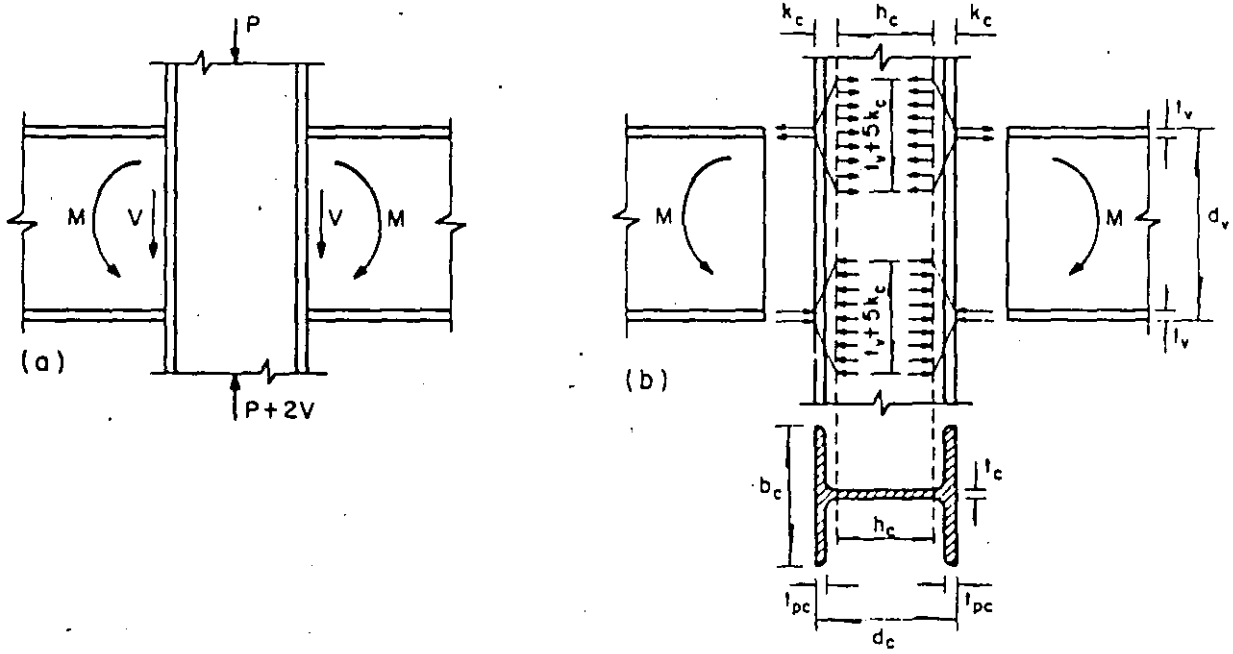


Fig 5.8.5 Conexión viga-columna con carga vertical simétrica. Acciones sobre la columna

En la Fig ~~5.8.5b~~^{5.5b} se ha dibujado el diagrama de cuerpo libre de la columna, sustituyendo las vigas por sus efectos; no se incluyen las fuerzas cortantes, que son de importancia secundaria, y los momentos se sustituyen por fuerzas aplicadas por los patines.

En la Fig ~~5.8.6~~^{5.6} se muestran las deformaciones de una columna que no tiene atiesadores, exageradas para mayor claridad.

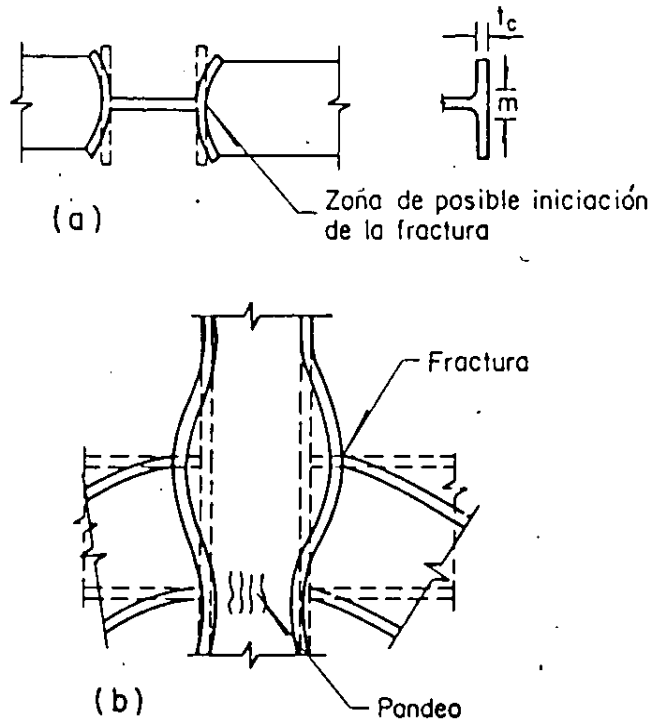


Fig 5.8.6 Deformaciones de una columna sin atiesadores

Debe investigarse el comportamiento del alma de la columna en las zonas frente a los dos patines de las vigas, en tensión y en compresión, y el de los patines de la columna en la zona en tensión. El alma puede ser crítica en cualquiera de las dos zonas, ya que puede fallar por flujo plástico, acompañado o seguido inmediatamente por pandeo en la zona comprimida, o por fractura

en la de tensión; si el alma es delgada, el pandeo de la zona comprimida puede iniciarse antes de que los esfuerzos lleguen al límite de fluencia.

En la zona en tensión pueden ser críticos los patines de la columna, que se flexionan y contribuyen a la fractura de las soldaduras que los unen con los de las vigas; por su poca rigidez, los extremos se flexionan hacia afuera, siguiendo el desplazamiento de la viga, pero la deformación de la zona central está restringida por el alma de la columna, y es probable que ahí se inicie una falla de la soldadura cuando se agote su capacidad de deformación y no pueda seguir, sin fracturarse, los desplazamientos de los extremos (Fig ^{5.6b} ~~5.8-6b~~).

La zona del alma afectada por la fuerzas concentradas que recibe de los patines de las vigas se extiende al penetrar en la columna; si la ampliación de esa zona es insuficiente para reducir a F_{yc} los esfuerzos en la base de la curva de unión de patines y alma (~~e sea~~ a la distancia k_c del paño exterior de la columna, Fig ^{5.7b} ~~5.8-5b~~), la resistencia del alma es insuficiente. Este efecto debe revisarse frente a los dos patines de la viga, en las regiones en compresión y en tensión. Cuando la columna está formada por tres placas soldadas la fuerza de tensión puede hacer que falle la soldadura que une patines y alma; además, la distancia k_c se reduce a la suma del grueso del patín y el tamaño de la soldadura. Por todo ésto, muchas veces es necesario aumentar las dimensiones de las soldaduras en la zona de la ^{unión.} ~~conexión.~~

Es difícil determinar analíticamente cómo se distribuyen las fuerzas que recibe la columna, por lo que se suele suponer una distribución lineal, basada en investigaciones experimentales; se obtienen buenos resultados con una pendiente de 2.5: 1 desde el punto de contacto hasta la distancia k_c (Fig ~~5.8.5b~~^{5.5b}), En diseño elástico se utilizaba una pendiente de 1:1, correspondiente a una distribución de esfuerzos según rectas a 45° trazadas a partir del punto de aplicación de la carga. Las dos suposiciones están basadas en resultados experimentales; la discrepancia entre ellas se debe probablemente a que los especímenes se cargan hasta el colapso para obtener resultados aplicables a diseño plástico, mientras que en diseño elástico los estudios se suspenden cuando las sollicitaciones alcanzan intensidades poco mayores que las de trabajo. Sin embargo, para hacer compatibles sus dos especificaciones (refs 5.8.2 y 5.8.3), el AISC recomienda ahora la pendiente 2.5:1 también en sus normas para diseño por esfuerzos permisibles (ref 5.8.3).

~~La suposición anterior~~^{lo que} implica que la fuerza de cada uno de los patines tiene que ser resistida, a la distancia k_c de la cara exterior de la columna, por una porción de alma de longitud $t_v + 5k_c$, donde t_v es el grueso del patín de la viga.

C5.8.3.1.1 Análisis de la zona comprimida de la conexión. La viga se sustituye por una placa de dimensiones iguales a las de uno de sus patines, que aplica una fuerza de compresión en la columna (Fig 5.8.7).

El temblor de Northridge tuvo lugar el 17 de enero de 1994 a las 4.41 a.m., hora local, en el valle de San Fernando; su duración fue de 10 a 15 seg. El epicentro se localizó a 1.6 km; aproximadamente, al suroeste de Northridge, y 32 km al noroeste de Los Angeles. Su magnitud fue de 6.8 en la escala de Richter, y su duración estuvo comprendida entre 10 y 15 seg.

A pesar de su magnitud relativamente pequeña, tuvo una intensidad elevada en zonas con alta densidad de construcción, como lo revela el que se hayan medido aceleraciones máximas del terreno de 1.8 y 1.2 g, en las direcciones horizontal y vertical, respectivamente.

Hasta antes de este temblor se consideraba que los marcos rígidos de acero constituían el sistema estructural más ^{conveniente} adecuado para resistir acciones sísmicas intensas, pues tomando las medidas adecuadas para evitar fallas por inestabilidad, o de tipo frágil, se obtenían estructuras que respondían dúctilmente hasta el colapso; éste se presentaba al formarse mecanismos, con articulaciones plásticas, principalmente en las vigas, precedidos por la absorción y disipación, por comportamiento inelástico, de grandes cantidades de energía.

Las fallas de tipo frágil pueden presentarse, principalmente, en las conexiones viga-columna. Desde fines de los años 50 se cuenta con métodos, basados en resultados de laboratorio, para diseñar ese tipo de conexiones sometidas a cargas estáticas, y unos diez años después se empezaron a realizar estudios, también básicamente experimentales, para ampliar y completar esos métodos, de manera de obtener procedimientos seguros para el diseño de conexiones viga-columna bajo sollicitaciones sísmicas intensas. Aparentemente el objetivo se había logrado; en normas y especificaciones se proporcionaban métodos para diseñar conexiones cuyo comportamiento, en estructuras reales bajo temblores de tierra reales, había sido, al menos en apariencia, completamente satisfactorio.

Sin embargo, el temblor de Northridge produjo fallas de tipo frágil en varios miles de conexiones, en más de un centenar de edificios de alturas comprendidas entre uno y veintitantos pisos; aunque no hubo ningún colapso y, por consiguiente, no se perdió ninguna vida por este problema, la magnitud de los daños es tal que, sumando todos los producidos por el temblor, éste va a ser la segunda catástrofe natural más costosa en la historia de los Estados Unidos; se calcula que se invertirán varios miles de millones de dólares en reparar estructuras dañadas y en reforzar construcciones potencialmente peligrosas.

El temblor de Northridge ha sacudido la confianza que se tenía en el marco rígido como sistema estructural preferente en zonas sísmicas. Una vez más se ha demostrado que en ingeniería sísmica no se justifica la confianza ciega, sobre todo si se deposita en una conexión ~~convencional~~ en la que la transmisión de la fuerza se efectúa a través de una sola soldadura de penetración completa, cuya supervivencia depende de gran número de parámetros, muchos de ellos relacionados con la calidad de la mano de obra. Además, el problema aumenta cuando esas conexiones, responsables de la integridad del edificio, se reducen a un mínimo, de manera que la falla de muy pocas pone en peligro a la construcción completa.

En Estados Unidos se opina que el temblor de Northridge ha invalidado las recomendaciones de los códigos y las prácticas que seguía la profesión para diseñar marcos rígidos en zonas sísmicas.

Los cinco problemas que se han mencionado con mayor frecuencia, entre las muchas causas ^{que pueden haber ocasionado el} ~~que pueden haber ocasionado el~~ pobre comportamiento de las conexiones, han sido:

1. Ejecución incorrecta de las soldaduras.
2. Grietas preexistentes en las soldaduras o en el metal base adyacente.
3. Esfuerzos residuales en las juntas, generados durante la construcción de la estructura, incluyendo la ^{ejecución} ~~colocación~~ de las soldaduras.
4. Falla del patín de la columna, ocasionada por tensiones en la dirección del grueso.
5. Problemas básicos de configuración de las juntas.

El gran número de conexiones falladas, en estructuras fabricadas por muchas empresas diferentes, elimina al primer factor como la causa principal de las fallas.

En el diseño de estructuras para edificios situados en las zonas sísmicas de los Estados Unidos se ha tratado, siempre, de reducir a un mínimo el número de conexiones rígidas entre vigas y columnas, de las que depende la estabilidad de la construcción durante temblores intensos, buscando obtener soluciones económicas, ya que el costo de las juntas representa un porcentaje elevado del valor total de la estructura. Con esa idea, ^{como los} ~~y teniendo en cuenta que los~~ marcos perimetrales son los más eficientes, y ~~que~~ en ellos se pueden emplear, con frecuencia, vigas de mayor peralte que en el resto del edificio, se ha vuelto muy común un sistema estructural en el que las acciones sísmicas son resistidas exclusivamente por los marcos de la periferia, que son los únicos que se diseñan y construyen como rígidos; todas las vigas restantes, incluyendo las normales a los marcos perimetrales, se conectan a las columnas con uniones flexibles.

El número de conexiones rígidas se reduce, ~~efectivamente~~, pero al concentrar en pocos marcos (muchas veces, en dos en cada dirección) la resistencia ^{total} a fuerzas horizontales, aumentan significativamente las dimensiones de las vigas y columnas que los componen lo que, a su vez, lleva a que crezca el grueso de las placas que han de unirse entre sí: ésto hace que todos los problemas mencionados arriba se vuelvan más críticos.

Las fallas se han debido, seguramente, a una combinación de los factores mencionados, más dos aspectos a los que hasta ahora, al menos en apariencia, se ha prestado poca atención: la naturaleza casi instantánea de las fuerzas ocasionadas por los sismos, y los complejos estados de esfuerzos tridimensionales existentes en las conexiones desde la fabricación y montaje de la estructura, agravados por los efectos del temblor.

Es bien sabido que las fallas dúctiles están asociadas con esfuerzos cortantes; una barra en tensión axial, cargada lentamente, a la temperatura ambiente, se rompe después de un alargamiento muy importante, producido por deslizamientos en planos inclinados cuarenta y cinco grados respecto a la línea de acción de la fuerza, porque los esfuerzos cortantes en esos planos, iguales al cincuenta por ciento de los de tensión, ocasionan deslizamientos antes de que

los cristales se separen por efecto de la tensión; esta forma de falla, que se produce sin deformaciones previas significativas, es de tipo frágil.

Es también sabido que los incrementos en la velocidad de aplicación de las cargas, y los descensos de temperatura, ocasionan aumentos de la resistencia al corte, con lo que cambian las relaciones entre sollicitaciones y resistencias a cortante y a tensión; ambos fenómenos hacen que disminuya la ductilidad del acero, y cualquiera de ellos, o la combinación de ^{los dos,} ~~ambos~~, puede ser causa de que un acero dúctil en condiciones normales se vuelva completamente frágil. No parece que las temperaturas bajas hayan influido en el comportamiento de la mayoría de las estructuras dañadas (la temperatura ambiente a la hora del temblor era de 4°C., y varias de las fracturas de columnas se presentaron en estructuras en construcción, en las que el acero no estaba todavía protegido por recubrimientos y acabados), pero sí debe haber jugado un papel importante la velocidad de aplicación de la carga.

Puesto que para las fallas dúctiles se requieren, necesariamente, esfuerzos cortantes, en una región de una estructura que estuviese sometida a un estado triaxial de esfuerzos con los tres esfuerzos principales de tensión y de magnitudes iguales, no podría presentarse nunca una falla de tipo dúctil, pues los esfuerzos cortantes son nulos en todas las direcciones, como se comprueba trazando el círculo de Mohr correspondiente. Es cierto que en una estructura real los esfuerzos principales no son nunca de magnitudes iguales; sin embargo, la ^ocontracción irregular y restringida de la soldadura depositada entre los patines de viga y columna, y del material base adyacente, durante el enfriamiento desde el estado líquido hasta la temperatura ambiente, produce esfuerzos residuales de tensión que, a lo largo del eje de la soldadura, pueden ser mayores que el límite de fluencia del material, y que son también elevados en las dos direcciones ortogonales; su superposición con los esfuerzos ^{ocasionados} ~~producidos~~ por las acciones sísmicas origina estados triaxiales para los que disminuye drásticamente la relación esfuerzo cortante/esfuerzo axial, que tienden a promover fallas de tipo frágil. Lo anterior se agrava por las concentraciones de esfuerzos producidas por discontinuidades en el material (debidas, por ejemplo, a defectos de las soldaduras, o provenientes del proceso de laminado) y por cambios en la dirección en que se transmiten las fuerzas interiores.

La combinación de los efectos ^{mencionados} ~~anteriores~~ puede hacer que sea imposible construir conexiones con los patines de las vigas soldados a tope ^ocontra los de las columnas que no fallen de manera frágil bajo ^{las acciones} ~~los efectos~~ casi instantáneos de un temblor; desde luego, quedan invalidadas suposiciones como aquella que permitía, en muchos casos, diseñar la conexión por alma sin tener en cuenta la parte del momento de flexión que le corresponde, bajo la suposición de que el endurecimiento por deformación permitiría a los patines transmitir, por sí solos, el momento plástico completo de la viga; es indudable que ésta se fracturará mucho antes ^{de} ~~que~~ se presenten las deformaciones correspondientes al endurecimiento.

La afirmación anterior parece verse confirmada por los resultados de una serie de ensayos de laboratorio ^{realizados} ~~que se realizaron~~ en la Universidad de Texas en Austin, con el objeto de evaluar el efecto de soldaduras "mejoradas" en el comportamiento de las conexiones

tradicionales, y determinar diseños alternos: todos los especímenes "tradicionales", construidos con soldaduras y detalles mejorados (depósitos de soldadura de alta calidad, remoción de las placas de respaldo y de extensión, colocación de una soldadura de filete para reforzar la penetración completa y reducir concentraciones de esfuerzos) fallaron prematuramente, bajo niveles de carga considerablemente menores que los requeridos para que se formasen articulaciones plásticas.

La solución, si se desea seguir utilizando conexiones soldadas, parece estar en reforzarlas para que su resistencia aumente, de manera importante, por encima de la de las vigas, de tal forma que las articulaciones plásticas se formen en éstas, sin exigir deformaciones significativas en las conexiones; ésto se ha visto confirmado, al menos parcialmente, por el comportamiento, muy superior, de especímenes de laboratorio en los que, por fuera de los patines de las vigas soldados a tope (es decir, encima del superior y debajo del inferior), se colocaron placas de refuerzo horizontales, soldadas a tope al patín de la columna y con filetes al de la viga, o verticales, en forma de cartabones soldados a los dos patines.

Debe buscarse, además, reducir los esfuerzos residuales; ^{lo que} ésto puede lograrse haciendo la conexión sin soldar los patines de las vigas con los de las columnas, sino transmitiendo las fuerzas de unos a otros por medio de placas unidas a las vigas con soldaduras de filete, y a las columnas con penetración completa; haciendo primero esta soldadura los esfuerzos residuales longitudinales disminuyen, pues la placa no está, todavía, restringida en esa dirección; además, las placas pueden sobrediseñarse para alejar la articulación plástica de la conexión. La placa inferior se soldará en el taller, con lo que se evitará la difícil soldadura en la zona central del patín.

Conviene promover también el uso de técnicas que reduzcan los esfuerzos residuales, como pueden ser secuencias adecuadas de colocación de los cordones y martilleo ("peening") de éstos.

Por último, parece que convendrá aumentar el número de marcos rígidos que resisten el sismo en cada dirección para que el grueso de las placas por unir sea menor y, además, disminuya la importancia de cada unión individual en la resistencia de la estructura completa. Este último punto es de poca importancia en México, pues en nuestros diseños solemos utilizar todos los marcos, o al menos la mayoría de ellos, para resistir las acciones sísmicas.

Apasentamente, las fortunas fueron el resultado inevitable del descuido de algunos aspectos básicos de ciencia de los materiales, debido a experiencia limitada en estos eventos.

En el futuro cercano aumentará, seguramente, el uso de conexiones soldadas sin filetes y el empleo de tornillos de alta resistencia en las uniones viga-columna, y se recurrirá, cada vez más, a soluciones más complejas, pero prometedoras, como ~~en~~ el aislamiento de la base de los edificios, para limitar la energía que reciben durante un evento sísmico, y el empleo de amortiguadores, para disipar esa energía sin que la estructura sufrá deformaciones inelásticas.

CONEXIONES, DE DIAGONALES DE CONTRAVENTEEO.

Fuerzas. La resistencia de diseño de las conexiones de los miembros de contraventeo (incluyendo uniones viga-columna, si forman parte del sistema) no será menor que la más pequeña de las siguientes:

1. La resistencia de diseño en tensión axial del miembro.
2. La fuerza en el miembro obtenida de un análisis con las combinaciones de carga especificadas en el reglamento.
3. La fuerza máxima, indicada por un análisis, que puede transmitir la estructura al contraventeo.

Con las condiciones anteriores se busca evitar que sean críticas las fallas por pandeo fuera del plano o por fractura de la placa de conexión. El tercer criterio pretende cubrir la posibilidad de que la fuerza cortante esté limitada por el momento de volteo que puede ~~ser desarrollado por~~ desarrollarse por el sistema estructural.

Area neta. En juntas atornilladas se cumplirá la relación

$$\frac{A_e}{A_t} \geq \frac{1.2 \alpha P_U^*}{F_R P_n}$$

donde:

A_e = área neta efectiva de la sección transversal del elemento de contraventeo.

A_t = área total de la sección transversal.

P_U^* = resistencia ^{requerida} del contraventeo. ~~requerido.~~

P_n = resistencia nominal en tensión.

F_R = factor de resistencia = 0.75.

α = fracción de la fuerza en el miembro que es transferida a través de una sección neta particular.

Placas de unión.

1. Cuando el plano crítico de pandeo del contraventeo sea el del marco, la placa y las demás partes de la conexión tendrán una resistencia de diseño igual o mayor que la resistencia nominal a la flexión, en ese plano, del contraventeo.

2. Cuando el pandeo se presenta fuera del plano indicado arriba, debe proporcionarse una longitud libre de cubreplaca suficiente para que se forme una articulación plástica; para ello, el contraventeo debe terminar a una distancia no menor que el doble del grueso de la cubreplaca, medida a partir de la línea teórica en la que la flexión está restringida por la unión con la viga o la columna. La placa tendrá la resistencia en compresión necesaria para resistir, sin pandearse, la fuerza que le transmite el contraventeo. (Fig. 5.7).

DISEÑO SÍSMICO DE ESTRUCTURAS DE ACERO.

1. **FILOSOFÍA DEL DISEÑO SÍSMICO.** El objetivo principal de todos los reglamentos modernos para diseño sísmico es proteger la seguridad del público durante los temblores de intensidad máxima que es probable que se presenten en el sitio durante la vida útil de la construcción; se pretende obtener una seguridad adecuada contra fallas mayores y contra la pérdida de vidas, y tienen carácter secundario la limitación de daños, que la edificación se mantenga funcionando, o que sea fácil de reparar después de un evento sísmico.

Las estructuras diseñadas y construidas correctamente deben, en general, satisfacer tres requisitos:

1. Resistir temblores frecuentes, de poca intensidad, sin daños de ningún tipo.
2. Resistir temblores de intensidad media, que es probable que se presenten dos o tres veces durante la vida útil de la edificación, sin daños estructurales, pero con posible deterioro de elementos no estructurales e instalaciones.
3. Resistir movimientos de tierra mayores, de intensidad igual al terremoto máximo experimentado o predicho para el sitio, sin colapso, pero con posibles daños no estructurales y estructurales.

El nivel de daños depende de múltiples factores, como son la configuración de la construcción, las características del sistema estructural, los materiales empleados y el cuidado con el que se haya hecho la construcción.

Es razonable esperar que una estructura bien planeada y construida no sufrirá un colapso durante un temblor de gran intensidad, aunque los daños del sistema estructural primario pueden ser insignificantes o de gran importancia, reparables o no. Las vidas de los ocupantes están razonablemente protegidas, pero no con una seguridad absoluta.

Las consideraciones anteriores deben hacerse del conocimiento de las autoridades que adopten el reglamento y de los propietarios de los edificios; unas u otros pueden optar por una seguridad mayor, con el aumento consiguiente de costos, y sabiendo que aún así no podrá garantizarse la seguridad de manera absoluta.

La filosofía aceptada hace difícil especificar las fuerzas de diseño, ya que no sólo dependen de las características dinámicas del edificio, como periodo natural y grado de amortiguamiento, sino también de la capacidad de la estructura para admitir deformaciones inelásticas importantes sin pérdida significativa de resistencia, pues la experiencia ha demostrado que no es económicamente factible, en general, diseñar los edificios para que respondan elásticamente durante temblores de gran intensidad.

Los objetivos mencionados se alcanzan especificando fuerzas para el dimensionamiento de los miembros de magnitud compatible con la sismicidad de la zona, y proporcionando normas para diseñar, detallar y construir la estructura que aseguren que podrá desarrollar la ductilidad requerida.

El empleo de fuerzas de diseño mucho menores que las que se tendrían si la respuesta fuese elástica hasta el colapso se justifica por la suposición de que durante un temblor intenso la estructura experimentará varios ciclos de deformación inelástica, de manera que el nivel de carga depende del sistema estructural y de su capacidad para soportar esas deformaciones y disipar energía por comportamiento inelástico, sin pérdida significativa de resistencia bajo carga vertical.

Los códigos tienen en cuenta la influencia del material y del sistema estructural por medio del **factor de comportamiento sísmico**, que es un número, igual o mayor que uno, entre el que se dividen las fuerzas correspondientes a una respuesta elástica ilimitada para obtener las de diseño. Su valor, elevado en sistemas estructurales dúctiles y reducido en los frágiles, se ha fijado, hasta ahora, por consenso entre ingenieros e investigadores destacados en el campo de la ingeniería sísmica, quienes se apoyan en estudios analíticos y experimentales y, sobre todo, en el comportamiento, satisfactorio o no, que han tenido las estructuras de diversos tipos ante temblores de tierra reales. El factor de comportamiento sísmico se designa con la letra **Q** en el Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal (ref.1).

Para que la ductilidad de un sistema sea adecuada, todos los miembros críticos, y sus conexiones, deben desarrollar la ductilidad local requerida durante el proceso de deformación inelástica; a menos que haya sido optimizado, la falla de un sistema estructural dúctil bien diseñado se presenta después de la formación y rotación de un buen número de articulaciones plásticas, acompañadas por la disipación de grandes cantidades de energía. Influye también en este comportamiento la sobrerresistencia del sistema.

El acero es un material dúctil por naturaleza que tiene, además, un comportamiento muy estable bajo inversiones de carga, trabaja igual en tensión que en compresión y tiene una relación resistencia/peso muy favorable; es, por todo ello, muy adecuado para construcciones sismorresistentes. Sin embargo, la ductilidad del material no garantiza la de la estructura, que puede perderse por prácticas inadecuadas de diseño o construcción; las recomendaciones para diseño de estructuras de acero en zonas sísmicas están encaminadas, principalmente, a conservar en la estructura la ductilidad propia del material.

La ductilidad de un miembro estructural está relacionada con el tipo de deformación que experimenta bajo carga. Los elementos que trabajan en flexión o en tensión pueden desarrollar ductilidades mucho mayores que los sometidos a compresión, de manera que los marcos rígidos, que usan la resistencia a la flexión para soportar las cargas laterales, y en los que puede haber plastificación completa de miembros y conexiones, tienen una gran capacidad de disipación de energía, y son muy apropiados para construcciones en zonas sísmicas; sin embargo, son sistemas flexibles, antieconómicos en edificaciones de cierta altura. La rigidez de los miembros en tensión o compresión es mucho mayor, por lo que se emplean en marcos contraventeados, pero su uso implica reducciones importantes de ductilidad. En el diseño en zonas sísmicas se busca, entre otras

cosas, encontrar sistemas estructurales de rigidez lateral adecuada que tengan, al mismo tiempo, ductilidad suficiente.

La pérdida de ductilidad de las estructuras de acero suele estar asociada con algún tipo de inestabilidad, pandeo, local, de miembro o de conjunto, o con alguna forma de fractura frágil, casi siempre en las conexiones; deben evitarse fallas prematuras de estos tipos, que harían que la estructura no pudiese desarrollar la ductilidad asociada con el valor escogido de las fuerzas sísmicas de diseño.

Las estructuras no fallan aunque los esfuerzos producidos por las sollicitaciones sísmicas alcancen el límite de fluencia; son seguras mientras las deformaciones plásticas y, por ende, las demandas de ductilidad, permanecen dentro de límites aceptables.

En los posibles fenómenos de inestabilidad deben incluirse el pandeo local de los elementos planos que forman los perfiles estructurales, el pandeo por flexión de columnas largas y contravientos, el pandeo lateral por flexotorsión de vigas y elementos flexocomprimidos, y el efecto P- Δ en marcos esbeltos con carga vertical importante. Las fracturas frágiles pueden deberse a fallas en tensión en las áreas netas de conexiones atornilladas o remachadas, fractura de soldaduras en zonas de concentración de esfuerzos, desgarramiento laminar en placas que no admiten las deformaciones a través del grueso ocasionadas por contracciones del metal de soldadura, fractura de placas debida a deformaciones grandes, producidas por pandeo local o por flexión, y fatiga con pocos ciclos de carga y deformaciones inelásticas importantes. Si el diseñador controla todos estos problemas, la estructura resultante tendrá ductilidad y capacidad de disipación de energía suficientes.

Estructuras dúctiles. Las acciones internas que generan los sismos en las estructuras son, en la mayoría de los casos, mucho menores que las que corresponderían a una respuesta elástica hasta el colapso; en cambio, los desplazamientos laterales de entrepiso sí son del orden de los predichos por la teoría elástica. Este comportamiento se debe, en parte, a la plastificación, en regiones localizadas, que precede al colapso.

Otro factor que contribuye, de manera muy importante, a que la resistencia real sea mayor que la evaluada con la teoría elástica, es la sobrerresistencia del sistema; si no se presenta una falla frágil, las estructuras tienen reservas de resistencia, ante cargas laterales, que no se consideran explícitamente; son consecuencia del uso de factores reductivos en el cálculo de las resistencias de diseño, de que las resistencias reales de los materiales son, en promedio, mayores que las nominales, las fórmulas de diseño son conscientemente conservadoras, los perfiles comerciales tienen resistencias mayores, sistemáticamente, que las necesarias teóricamente, y, además, al modelar las estructuras no se consideran elementos y efectos que contribuyen a su resistencia, como losas, firmes, cancelos y muros divisorios, escaleras y efectos tridimensionales.

La sobrerresistencia ha sido, probablemente, uno de los factores que más ha contribuido a la supervivencia de edificios ante sismos de gran intensidad.

Las normas de diseño sísmico la tienen en cuenta de manera implícita, pero no se pide que se ^{cuantifique} ~~cuantifique~~ su importancia, lo que lleva a diseños con niveles de seguridad contra el colapso que no son uniformes, y que pueden ser peligrosamente bajos, e incluso inaceptables, en estructuras de hiperestaticidad muy pequeña o que hayan sido dimensionadas con métodos de diseño óptimo.

La respuesta global de una estructura se muestra esquemáticamente en la Fig.1.1. Las ordenadas son fuerzas cortantes en la base de la estructura, o en alguno de sus entrepisos, y las abscisas desplazamientos horizontales totales del nivel superior o desplazamientos relativos de los niveles que limitan el entrepiso considerado.

Como se ve en la figura, el factor de reducción Q' es igual al producto de los factores de ductilidad, μ , y de sobrerresistencia, Ω .

Uno de los problemas asociados con el diseño "elástico" es que, como no se conoce la resistencia real de las estructuras, no puede calcularse su sobrerresistencia; si es mucho menor que la implícita en los códigos, es probable que el comportamiento, bajo sismos intensos, no sea satisfactorio. La definición precisa de ductilidad estructural, y su evaluación, en edificios de varios pisos, constituye otro obstáculo que no se ha salvado todavía.

Tampoco se sabe mucho respecto a los daños que se acumulan en las estructuras durante temblores de tierra sucesivos, o durante un solo terremoto de larga duración. Si el sistema estructural es dúctil, puede experimentar deformaciones importantes, bajo carga aproximadamente constante, sin sufrir daños excesivos o pérdida de resistencia que afecten significativamente su respuesta ante aplicaciones de carga posteriores.

Puede obtenerse una seguridad adecuada contra el colapso dando a la estructura una resistencia suficiente para que su respuesta sea básicamente elástica, haciéndola muy dúctil, o combinando de manera económica las dos propiedades: éste es el camino que se sigue en los reglamentos modernos de diseño sísmico.

Como las vigas pueden, en general, desarrollar ductilidades locales mayores que las columnas, la mayoría de las estructuras de edificios construidos en zonas de sismicidad elevada se diseñan con el criterio de *columnas resistentes - vigas débiles*; para ello se adoptan factores de ~~carga~~ y resistencia diferentes para las distintas formas de falla, para propiciar que la mayoría de las articulaciones plásticas se forme en los extremos de las vigas.

Para obtener un comportamiento dúctil se identifican los modos de falla posibles, se determinan los que se caracterizan por una respuesta dúctil, y se escoje un conjunto de factores de seguridad que reduzca a un valor suficientemente bajo la probabilidad de que se alcance primero algún estado límite asociado con una forma de falla frágil.

Las pequeñas regiones de las que depende la ductilidad global de la estructura se diseñan y detallan de manera muy cuidadosa, para obtener las ductilidades locales necesarias.

Las recomendaciones del Capítulo 11 de la ref.1 están encaminadas a obtener estructuras cuya respuesta ante sismos sea dúctil, y que no sufran deterioro significativo aunque el temblor sea

de larga-duración, de manera que los daños localizados que experimenten puedan repararse después del evento; al mismo tiempo, se procura que tengan una sobrerresistencia del orden de la supuesta implícitamente al escoger las sollicitaciones de diseño. Se buscan márgenes de seguridad más elevados contra las fallas frágiles que contra las dúctiles, y el diseño se hace de manera que las articulaciones plásticas asociadas con el mecanismo eventual de colapso se formen, predominantemente, en las vigas. Se reconocen aquí las bases del diseño por capacidad.

Las consideraciones anteriores llevaron al desarrollo, en Nueva Zelanda, de un enfoque determinístico sencillo para el diseño sísmico, el **diseño por capacidad**. En él, los resultados de un análisis elástico tradicional, efectuado con cargas estáticas laterales especificadas, se utilizan para establecer una jerarquía aceptable en la formación de mecanismos disipadores de energía. La jerarquía debe ser formulada por el diseñador en un esfuerzo para "*decirle*" a la estructura "*qué hacer*" en el caso de un evento sísmico extremo. Una vez hecha la elección, a cada miembro se le da la resistencia necesaria para asegurar que, cuando se requiera, sólo se formarán los mecanismos escogidos. La simplicidad del método proviene de que el diseñador ordena a la estructura "*qué es lo que debe hacer*", en vez de preguntarle, por medio de un análisis, "*qué puede hacer*". El objetivo que se busca es, ~~para~~ asegurar un comportamiento elastoplástico deseable y predecible durante temblores de tierra extremos, de características desconocidas.

En el diseño por capacidad de estructuras resistentes a temblores se escogen los elementos resistentes primarios, los que se diseñan y detallan adecuadamente para que puedan disipar energía durante deformaciones inelásticas severas. A los elementos estructurales restantes se les proporciona la resistencia suficiente para que se conserven los medios de disipación de energía elegidos.

Para asegurar una respuesta inelástica satisfactoria durante un evento sísmico extremo, el diseñador debe depender de mecanismos disipadores de energía confiables, que formen parte de la estructura, que proporcionarán el amortiguamiento histerético necesario. Por consiguiente, una parte importante del esfuerzo de diseño debe destinarse a detallar adecuadamente las regiones de las articulaciones plásticas potenciales, en las que la demanda de ductilidad será máxima.

Desde el punto de vista del diseño para que la estructura sobreviva el temblor más intenso, debe quitarse énfasis a la precisión de los análisis elásticos, en vista de las burdas aproximaciones inevitables en las reglas contenidas en los códigos para análisis estático y de las incertidumbres asociadas con la respuesta dinámica inelástica de estructuras sometidas a temblores cuyas características son, todavía, imposibles de predecir. Las cargas laterales estáticas especificadas, y las técnicas de análisis elástico modal, deben considerarse, principalmente, como medios para obtener una distribución razonable de las resistencias potenciales de la estructura. Como las que se obtienen al aplicar los requisitos de los códigos son considerablemente menores que las que se requerirían si los edificios respondiesen elásticamente ante el temblor de diseño, cualquier técnica razonable de análisis elástico es adecuada.

Comportamiento de estructuras de acero. Buena parte de los estudios sobre el comportamiento de estructuras de acero bajo solicitaciones sísmicas se ha encaminado a comprobar si las reglas para diseño por carga estática siguen siendo aplicables cuando la carga es dinámica y, de no serlo, a determinar las modificaciones necesarias para asegurar una respuesta adecuada.

En general, se escoge de antemano el mecanismo de colapso más conveniente, desde los puntos de vista de resistencia, rigidez y capacidad de disipación de energía, se dimensionan muy cuidadosamente las zonas en que se concentrarán las deformaciones inelásticas, para evitar fallas no dúctiles prematuras, y se diseña el resto de la estructura para que responda elásticamente hasta el colapso potencial.

La ductilidad final de una estructura de acero depende de múltiples factores, que pueden agruparse en aspectos relativos al material y a la geometría de las secciones de los elementos estructurales, propiedades de los miembros (vigas, columnas, contraventeos) y de las conexiones, y características de los sistemas estructurales. Todos estos factores se estudian en los apartados siguientes.

2. Material.

Composición química. El acero es una aleación de hierro con cantidades muy pequeñas de carbono; los aceros estructurales contienen, además, otros elementos en cantidades variables, principalmente manganeso, fósforo, azufre y silicio que son impurezas que no pueden eliminarse, o cuya supresión sería demasiado costosa, o que se añaden intencionalmente, en diferentes combinaciones y cantidades, para obtener características y propiedades específicas en los productos terminados.

El hierro es dúctil, pero blando y de baja resistencia; el carbono se añade para endurecerlo y aumentar su resistencia mecánica; cuando crece el contenido de carbono suben la dureza, la resistencia a la ruptura en tensión y el esfuerzo de fluencia, pero disminuyen ductilidad, tenacidad y soldabilidad, por lo que en los aceros estructurales se limita ese contenido; en general, el máximo permitido es 0.30% o menos, dependiendo de los otros elementos de aleación y de la soldabilidad y tenacidad deseadas. Cada aumento de 0.01% de carbono eleva el esfuerzo de fluencia en unos 35 kg/cm².

El manganeso aumenta la dureza y la resistencia de los aceros, aunque en menor grado que el carbón; además, se combina con el azufre, formando sulfatos de manganeso, con lo que se minimizan los efectos desfavorables del azufre.

Este es casi siempre perjudicial; hace que disminuyan ductilidad, tenacidad y soldabilidad.

El silicio y el aluminio se emplean en la manufactura del acero para eliminar los gases, principalmente oxígeno, que se disuelven en el metal en estado líquido. El aluminio se utiliza también para controlar el tamaño del grano.

Para obtener propiedades deseables en ciertas aplicaciones se alean elementos adicionales; por ejemplo, el cobre aumenta la resistencia a la corrosión atmosférica.

Cambios de temperatura. Si durante el proceso de fabricación el metal fundido se enfría lentamente, se solidifica como una solución de carbono en hierro, que recibe el nombre de austenita; cuando el enfriamiento continúa, a partir de una temperatura comprendida entre los 910 y los 720°C, en aceros con no más del 0.80% de carbono, disminuye la solubilidad del carbono en el hierro, y se forman cristales de hierro casi puro, conocidos como ferrita; la transformación termina por debajo de los 720°C; el acero, a temperatura ambiente, está formado por granos de ferrita en una matriz de perlita, que es un compuesto de ferrita y cementita (carburo de hierro, Fe₃C).

La ferrita es muy dúctil y de baja resistencia a la tensión; las altas resistencias de los aceros al carbón provienen de la perlita o, más específicamente, de la cementita que hay en ella.

Cuando el enfriamiento desde la etapa austenítica es rápido no hay tiempo para que se presenten las transformaciones mencionadas, y se obtienen otras microestructuras, con propiedades mecánicas diferentes; en general, cuanto mayor es la velocidad de enfriamiento, mayor es la dureza y la resistencia del acero a la temperatura ambiente, pero menor es su ductilidad. Los tratamientos térmicos aprovechan esos efectos de las temperaturas para obtener propiedades deseables.

Las velocidades de enfriamiento muy altas producen aceros que, a la temperatura ambiente, están compuesto por cristales de martensita, duros y relativamente frágiles.

Las piezas de acero experimentan cambios de temperatura durante ciertas etapas del proceso de fabricación de las estructuras; por ejemplo, cuando se utiliza calor para enderezar o para dar forma a elementos estructurales; si el proceso no se controla adecuadamente, pueden formarse estructuras cristalinas frágiles en zonas localizadas. Cuando se enfría una soldadura, el metal pasa, en muy poco tiempo, del estado líquido al sólido a la temperatura ambiente, por lo que para evitar la formación de estructuras martensíticas, demasiado frágiles, en el metal de soldadura y en el material base afectado por el ciclo térmico, ha de controlarse con mucho cuidado todo el proceso, sobre todo la velocidad de enfriamiento.

Segregación. En una de las etapas de la producción de perfiles estructurales con los métodos tradicionales, el acero fundido se vacía en moldes en los que se enfría y solidifica, formando lingotes de sección transversal rectangular, con esquinas redondeadas; en una etapa posterior se recortan los extremos de los lingotes, para remover material indeseable, se vuelven a calentar, y se laminan para obtener los productos terminados.

El proceso de enfriamiento y solidificación es causa de que la composición química de los lingotes no sea uniforme; el acero líquido en contacto con las paredes y el fondo del molde, que están relativamente fríos, se solidifica muy rápidamente, sin que cambie su composición química, pero cuando disminuye la velocidad de solidificación, al crecer la distancia a las paredes, se forman cristales de hierro casi puro, que contienen menos carbono, manganeso, fósforo, azufre y otros elementos que el líquido del que provienen, de manera que el material que se solidifica al final,

situado alrededor del eje del lingote en su mitad superior, como elementos. La parte del lingote en la que la segregación es más alta se elimina antes de la laminación.

Los productos de acero hechos con el proceso de laminación tienen una composición más uniforme, pues se elimina el paso intermedio de los lingotes.

Además de la segregación en los lingotes, la porosidad es una característica inherente del enfriamiento y solidificación. La porosidad depende de la composición y temperatura del metal líquido, la forma del lingote y la cantidad de metal descartado de sus extremos. Como en el caso de los productos planos, y en forma de hojas, la laminación redistribuye la segregación, la porosidad y las cavidades para dar forma al material durante el proceso de laminación, produciendo las propiedades de los productos terminados.

Efectos de la laminación. La laminación es el proceso de laminación de los productos de acero. Consiste en hacer pasar el material entre rodillos en direcciones opuestas y que están separados una distancia menor que el espesor de la sección transversal, de manera que la sección transversal se reduce y la longitud y el área se alargan. La escoria y otros materiales deformables se alargan en la dirección de laminación.

Los diferentes efectos del proceso en la dirección de laminación se combinan con cambios químicos y microestructurales en el metal, lo que se manifiesta especialmente en variaciones de la ductilidad y resistencia.

La mayor parte de los perfiles laminados H pesados (con un espesor de alma de 2" (5cm), aproximadamente), tiene una región de material de baja ductilidad en el alma y los patines, producida por la menor velocidad de enfriamiento y las restricciones geométricas, se aplican en ella, durante el proceso de laminación que en el resto del perfil. Es también común que el material situado en el alma esté segregado y compuesto por granos gruesos. Al hacer soldaduras, han de tomarse precauciones especiales para reducir el riesgo de que aparezcan grietas, sobre todo en zonas de concentración de esfuerzos. En los análogos en secciones hechas con placas soldadas, cuando el grueso de la soldadura es mayor o más.

Si los perfiles pesados trabajan en tensión (como sucede en algunas ocasiones, en columnas de edificios bajo solicitaciones estáticas), se debe tener cuidado con las especificaciones del material y los procedimientos de fabricación de las soldaduras o uniones soldadas. Pueden ser preferibles las juntas atornilladas.

—**Desgarramiento laminar.** La ductilidad del acero a través del grueso de las placas suele ser mucho menor que en las direcciones paralelas a su superficie. Este fenómeno influye poco en la mayoría de las aplicaciones, pero se vuelve importante en el diseño y construcción de estructuras con juntas muy restringidas, en las que puede ocasionar grietas por **desgarramiento laminar**, que se inician debajo de la superficie de las placas como un resultado de deformaciones excesivas a través de su grueso, asociadas, casi siempre, con contracciones del metal de soldadura impedidas por la rigidez de la junta

Las grietas, constituidas por una serie de terrazas paralelas a la superficie del metal, pueden permanecer dentro de él, o emerger en los bordes de placas, perfiles o soldaduras.

El fenómeno se manifiesta con mayor frecuencia en construcción soldada pesada, particularmente en juntas entre placas gruesas y perfiles estructurales de grandes dimensiones. Para controlarlo han de escogerse con especial cuidado los detalles de las juntas soldadas, el metal de aportación y los procedimientos para depositarlo. Además, pueden utilizarse aceros producidos por procesos especiales, en los que se controlan el contenido de azufre y las inclusiones, para mejorar la ductilidad a través del grueso.

En la Fig.2.2 aparece, en forma esquemática, una fractura por desgarramiento laminar, y en la Fig.2.3 se muestran varias juntas inadecuadas desde este punto de vista, y se dan sugerencias para mejorarlas.

Esfuerzos residuales. Los esfuerzos residuales están presentes en los elementos estructurales antes de que se les apliquen fuerzas exteriores. Son ocasionadas por deformaciones plásticas no uniformes en regiones vecinas, producidas por procesos térmicos, mecánicos o metalúrgicos.

Los esfuerzos residuales del primer tipo se deben a las deformaciones permanentes que se generan cuando un metal se calienta y enfría en condiciones que restringen los cambios de volumen asociados con las variaciones de temperatura (las expansiones y contracciones libres no producen esfuerzos residuales). En general, aparecen esfuerzos de tensión en las zonas del metal que se enfrían al final. Son típicos los esfuerzos que se generan en los perfiles por el enfriamiento no uniforme que experimentan al pasar de la temperatura de laminación a la ambiente (Fig.2.4).

Las deformaciones permanentes no uniformes asociadas con el alargamiento o acortamiento del metal, producido por medios mecánicos en condiciones restringidas, originan esfuerzos residuales del segundo tipo (por ejemplo, cuando se enderezan o curvan elementos de acero durante la fabricación de una estructura).

Los esfuerzos de origen metalúrgico se generan cuando la microestructura del acero cambia de ferrita-perlita a martensita, transformación que ocasiona un aumento del 3 al 4% en el volumen del material.

La soldadura suele ocasionar esfuerzos residuales tridimensionales muy complejos, debidos al calentamiento y enfriamiento irregulares (es decir, a procesos térmicos o metalúrgicos) y a

restricciones (efectos mecánicos). Los cortes con soplete oxiacetilénico producen esfuerzos residuales semejantes, aunque, en general, en zonas más reducidas. Los esfuerzos residuales producidos por la soldadura suelen ser más elevados que los de laminación (Fig.2.4).

La combinación de varias operaciones de fabricación ocasiona esfuerzos residuales muy complejos, como se ve también en la Fig.2.4.

La importancia de estos esfuerzos en el comportamiento de los elementos estructurales que los contienen depende de cómo se combinan con los producidos por las acciones exteriores y del tipo de sollicitación a que esté sometido el elemento.

Soldabilidad. La soldabilidad es la capacidad de un material para ser unido por medio de soldadura, en condiciones de fabricación adecuadas, para formar una estructura diseñada para desempeñar un servicio determinado, y para tener un comportamiento satisfactorio bajo esas condiciones.

El factor que más afecta la soldabilidad de un metal es su composición química.

Los aceros al carbono están compuestos por hierro, carbono en una cantidad que no excede generalmente del 1.0 por ciento, y cantidades menores de manganeso, fósforo, azufre y silicio. Su soldabilidad depende, principalmente, del contenido de carbono, aunque los otros elementos, residuales o de aleación, influyen en ella de manera secundaria.

La soldabilidad de los aceros al carbono es tanto mejor cuanto más bajo es su contenido de carbono.

En las estructuras modernas se utilizan aceros de resistencia mucho mayor que las de los aceros al carbono; por ejemplo, se puede obtener un límite de fluencia de 3500 kg/cm² y un esfuerzo de ruptura de unos 5000 kg/cm², sin tratamientos térmicos, añadiendo dos o más elementos de aleación, y se logra una soldabilidad adecuada restringiendo el contenido de carbono a un máximo de 0.20 por ciento. En algunos aceros tratados térmicamente, con límite de fluencia de hasta 7000 kg/cm², se obtienen juntas soldadas comparables a las de los aceros al carbono escogiendo adecuadamente el metal de aportación y los procedimientos para hacer las soldaduras.

Se han hecho intentos para relacionar la composición química con la soldabilidad de los aceros, expresando la influencia relativa de los diversos componentes en términos de lo que se ha llamado **carbono equivalente**; una de las fórmulas para calcularlo es

$$CE = \%C + \%Mn/4 + \%Ni/20 + \%Cr/10 + \%Cu/40 - \%Mo/50 - \%V/10$$

El carbono equivalente está relacionado con la velocidad máxima con la que pueden enfriarse la soldadura y el metal base adyacente sin que éste se agriete; cuanto más alto sea, menor será la velocidad de enfriamiento admisible. Si CE, dado por la fórmula anterior, excede de 0.40, es probable que se formen grietas inmediatamente debajo de la soldadura, aunque debe recordarse que también influyen otros factores, entre los que está el precalentamiento.

--Todos los aceros estructurales son soldables, pero en algunos se requieren electrodos y métodos especiales, que deben emplearse con un control riguroso, con una inspección y un criterio de aceptación muy estrictos.

Clasificación de los aceros. Los aceros estructurales se clasifican en cuatro grupos: al carbono, de alta resistencia y baja aleación, al carbono o de alta resistencia y baja aleación tratados térmicamente, y aleados tratados térmicamente. Los límites de fluencia especificados están entre 2100 y 2800 kg/cm² en el primer grupo, entre 2950 y 5600 kg/cm² en el segundo, y entre 3250 y 7050 y 6350 y 7050 kg/cm² en el tercero y cuarto.

Propiedades mecánicas. Las propiedades mecánicas más importantes para el diseño y la evaluación de las estructuras de acero se obtienen por medio de ensayos de tensión. En la Fig.2.5 se muestran las gráficas esfuerzo-deformación unitaria típicas de diversos aceros estructurales, y en la Fig.2.6 se representan, agrandadas, las porciones iniciales. Las gráficas de probetas ensayadas en compresión son similares, pero después de que se inicia el endurecimiento por deformación la probeta se sigue aplastando, sin romperse. Los esfuerzos de fluencia y el módulo de elasticidad son iguales en compresión que en tensión.

Las propiedades mecánicas que se mencionan en la literatura son, casi siempre, las que se obtienen con probetas orientadas a lo largo de la placa o del perfil. Las propiedades a través del grueso suelen ser diferentes; en particular, la ductilidad se reduce.

La primera parte de las gráficas es una recta inclinada, que describe un comportamiento elástico lineal; su pendiente, el **módulo de elasticidad**, o **módulo de Young**, es prácticamente constante para todos los aceros; está comprendido entre 2000000 y 2100000 kg/cm².

El comportamiento elástico lineal termina en el **límite de proporcionalidad**; en los aceros estructurales este punto se confunde, prácticamente, con el esfuerzo de fluencia.

Sigue después, en muchos aceros, un tramo horizontal, de deformación creciente bajo esfuerzo constante, en el que el acero trabaja como un material plástico; el **esfuerzo de fluencia** constituye una de las propiedades más importantes de los aceros estructurales. Cuando no aparece una zona clara de comportamiento plástico, se define en función de una deformación inelástica especificada.

Más adelante vuelve a requerirse un aumento en la fuerza de tracción para que sigan creciendo las deformaciones; este fenómeno, el **endurecimiento por deformación**, termina cuando se alcanza la **resistencia máxima** del espécimen; después se reducen las dimensiones de la sección transversal crítica, aumentan las deformaciones longitudinales, con carga decreciente, y la probeta se rompe.

La **ductilidad** es un índice de la capacidad del material para admitir deformaciones inelásticas importantes, sin romperse. Debe tener un nivel adecuado para permitir redistribuciones locales de esfuerzos, como las asociadas con cambios bruscos de geometría, y es una de las

propiedades básicas en estructuras que se construyan en zonas sísmicas. El diseño suele estar basado en su capacidad para disipar energía por medio de deformaciones plásticas.

Se expresa en términos de la elongación total o de la reducción de área del espécimen; la primera se calcula dividiendo el alargamiento total de la probeta, después de la fractura, entre la longitud inicial, y la segunda de manera análoga, pero en términos de las áreas de la sección transversal; en ambos casos la ductilidad se indica como un porcentaje de la longitud o del área inicial. Su valor depende de la geometría del espécimen; así, el porcentaje de elongación disminuye cuando aumenta la longitud de medición.

El cociente, en valor absoluto, de las deformaciones unitarias transversal y longitudinal recibe el nombre de **coeficiente de Poisson**; vale 0.30 en el intervalo elástico y crece cuando las deformaciones aumentan, hasta 0.50 cuando el material está plastificado por completo.

La **tenacidad** refleja la capacidad de absorción de energía de un espécimen liso; es igual al área bajo la curva esfuerzo-deformación unitaria.

La ductilidad de los aceros que se utilizan en zonas sísmicas debe ser elevada; en pruebas de tensión deben exhibir una meseta pronunciada de deformaciones crecientes bajo esfuerzo constante y un alargamiento a la ruptura no menor de 20%, en probetas de 2". Además, deben endurecerse por deformación, y la relación entre la resistencia a la ruptura en tensión y el esfuerzo de fluencia debe estar comprendida entre 1.2 y 1.8; si no se cumplieren estas dos condiciones, las articulaciones plásticas se formarían en tramos de longitud muy pequeña, lo que ocasionaría demandas de ductilidad excesivas durante su formación y rotación. La soldabilidad ha de ser buena. Deben evitarse la fractura frágil y la fatiga de bajo ciclo. Como la falla se presenta, con frecuencia, por agrietamiento en zonas pandeadas localmente, sometidas a severas deformaciones inelásticas producidas por tensiones y compresiones alternadas, deben establecerse relaciones, que no se conocen todavía, entre la composición química y las características metalúrgicas de los aceros, por un lado, y su resistencia al agrietamiento en las condiciones mencionadas, por el otro.

Los aceros estructurales que no satisfacen las condiciones anteriores no deben utilizarse en construcciones en zonas sísmicas. En sus recomendaciones para diseño sísmico de estructuras para edificios, el Instituto Americano de la Construcción en Acero (AISC) indica los materiales que pueden utilizarse y prohíbe el uso de otros, incluyendo los que tengan un esfuerzo de fluencia especificado mayor de 3515 kg/cm², a menos que se demuestre que su comportamiento inelástico es equivalente al de los aceros permitidos.

3. GEOMETRIA DE LAS SECCIONES TRANSVERSALES.

En los perfiles de acero de sección I o H flexionados alrededor del eje de mayor momento de inercia pueden presentarse dos fenómenos de inestabilidad, pandeo lateral y pandeo local, que aparecen siempre, eventualmente, solos o combinados, con independencia de las precauciones que se tomen para evitarlos. (El pandeo lateral puede evitarse proporcionando soporte lateral, continuo a los patines comprimidos de las vigas). Sin embargo, si se conservan las relaciones ancho/grueso de patines y almas por debajo de ciertos límites y se coloca un contraventeo lateral adecuado, se logra que las dos formas de pandeo se retrasen lo suficiente para obtener un comportamiento satisfactorio. Las relaciones ancho/grueso y las distancias entre puntos soportados lateralmente que pueden aceptarse en un problema dado dependen del comportamiento que se espera que tenga la estructura; las restricciones serán máximas en zonas de formación de articulaciones plásticas en construcciones en áreas sísmicas, pues deben ser capaces de admitir rotaciones inelásticas importantes sin pérdida de resistencia por pandeo local o lateral.

Las curvas momento-deflexión de la fig. 3.1 describen el comportamiento de vigas con cargas de magnitud creciente perpendiculares a su eje, alojadas en el plano de simetría de sus secciones transversales.

La respuesta inicial, bajo cargas pequeñas, es elástica lineal, como lo muestra el primer tramo, recto, de las curvas. Si las relaciones ancho/grueso de los elementos planos que componen la viga, y el contraventeo lateral de que está provista, son adecuados para posponer la falla por pandeo local y lateral hasta que se presenten deformaciones plásticas importantes, el comportamiento elástico lineal termina cuando la suma de los esfuerzos normales producidos por las cargas y los residuales existentes en la viga llega, en algún punto, al esfuerzo de fluencia σ_y . (Punto A de la curva con línea continua de la fig. 3.1).

Cuando crece la carga fluye plásticamente una porción cada vez mayor del material, la capacidad de la viga para soportar incrementos adicionales de carga disminuye, y desaparece cuando el momento flexionante iguala al plástico resistente, M_p , en la sección crítica. (Esto sucede cuando la viga es isostática; de

no serlo, su resistencia máxima no se alcanza cuando se forma la primera articulación plástica, sino cuando se convierte en un mecanismo). A partir de ese instante (punto D) la curva es aproximadamente horizontal; la deformación crece sin cambio apreciable en la carga, hasta ser varias veces mayor que la que corresponde a la iniciación del flujo plástico. Por último, después de una deformación considerable, el acero entra en el intervalo de endurecimiento por deformación, y el momento resistente sobrepasa a M_p .

El comportamiento que se acaba de describir (curva llena OADB) es el más deseable desde los puntos de vista de resistencia y capacidad de rotación; corresponde a un caso ideal, que rara vez se presenta en las estructuras.

La situación más común en vigas reales de proporciones adecuadas y con contraventeo lateral suficiente es la representada por la curva OADNC; el momento resistente no se incrementa por endurecimiento por deformación, pero se alcanza el momento plástico del perfil, que se conserva durante deformaciones importantes.

OADE corresponde a una variación rápida del momento flexionante a lo largo del eje (en la vecindad de una carga concentrada o en los extremos de vigas de marcos rígidos, por ejemplo). El endurecimiento por deformación en la zona de momento máximo hace que éste suba por encima de M_p ; después la curva desciende, al iniciarse fenómenos de pandeo local y lateral.

Las curvas OAFG, OAHJ y OJK describen comportamientos que terminan con fallas por pandeo lateral o local, o por una combinación de ambos, las dos primeras en el intervalo inelástico y la tercera en el elástico.

La curva OADB representa el mejor comportamiento posible; la OADC es también satisfactoria si el tramo DN, de deformación creciente bajo momento M_p constante, tiene amplitud suficiente para que la ductilidad de la barra sea adecuada para el trabajo correcto de la estructura. Estas curvas carga-deflexión suelen representarse, de manera idealizada, por dos líneas rectas, una inclinada, OL, correspondiente al intervalo elástico, y otra horizontal, LM, de amplitud indeterminada, que describe el comportamiento plástico, caracterizado por deformaciones crecientes bajo momento constante.

Clasificación de las secciones y relaciones ancho/grueso máximas.

Si el pandeo lateral no es crítico, la resistencia de las barras en flexión se agota cuando se pandea localmente alguno de sus elementos planos. El pandeo local del patín comprimido es de primera importancia en vigas, pero también puede pandearse el alma (o las almas, en secciones en cajón), sobre todo en trabes armadas esbeltas, o los patines y almas de columnas comprimidas axialmente o flexocomprimidas.

La resistencia a la flexión de vigas con soporte lateral suficiente para que el pandeo lateral no sea crítico depende de las relaciones ancho/grueso de las placas que las forman; si son demasiado esbeltas, el pandeo local puede impedir que se alcancen los momentos M_p o M_y . (M_p es el momento plástico resistente nominal de un miembro en flexión, con la sección transversal completamente plastificada, y M_y es el que corresponde a la iniciación del flujo plástico, en los puntos de la sección más alejados del eje de flexión).

En la fig. 3.2 se han trazado las curvas momento-deflexión de vigas compuestas por placas de diferentes relaciones ancho/grueso.

La curva característica de las secciones tipo 1 representa el comportamiento más favorable; el momento resistente llega a M_p y lo supera ligeramente, mientras crecen las deflexiones. Eventualmente, después de deflexiones inelásticas importantes, la resistencia empieza a disminuir cuando se inicia el pandeo local del patín comprimido o del alma.

También las secciones tipo 2 pueden desarrollar el momento plástico M_p , pero su capacidad de deformación inelástica bajo momento constante es mucho menor que la de las secciones tipo 1; la disminución de resistencia, ocasionada por pandeo local, se inicia poco después de que el momento alcanza, o supera ligeramente, ese valor. Los requisitos relativos a las relaciones ancho/grueso de los elementos planos son menos estrictos que en las secciones tipo 1, puesto que se exigen deformaciones inelásticas menores.

Las placas que componen las secciones tipo 3, más esbeltas, se pandean localmente cuando el momento es menor que M_p ; sin embargo, permiten que se

alcance el momento M_y . las secciones tipo 3 no tienen capacidad de deformación.

Por último, son secciones tipo 4 las formadas por placas tan esbeltas que se pandean localmente antes de que el momento llegue a M_y ; su resistencia a la flexión se expresa en función de las relaciones ancho/grueso de sus elementos planos.

En las Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras Metálicas del Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal (Ref. 1) se indican los estados límite de resistencia correspondientes a los cuatro tipos de secciones:

Secciones tipo 1. Desarrollo del momento plástico en vigas y del momento plástico reducido por compresión en barras flexocomprimidas, con capacidad de rotación suficiente para poder ser utilizadas en estructuras diseñadas plásticamente. Reciben el nombre de "secciones para diseño plástico".*

Secciones tipo 2. El estado límite de resistencia es el mismo que el de las tipo 1, pero sin requisitos de capacidad de rotación. Se conocen también como "secciones compactas".*

Secciones tipo 3 (o "secciones no compactas"). Desarrollo del momento correspondiente al inicio del flujo plástico en vigas, o de ese momento, reducido por compresión, en barras flexocomprimidas.

Secciones tipo 4 ("secciones esbeltas"). Pandeo local de alguno de los elementos planos que las componen.

En miembros en compresión axial no existe la distinción basada en capacidad de rotación, pues dada su forma de trabajo esta propiedad no es significativa; por esto, los límites de almas y patines comprimidos axialmente son los mismos para las secciones 1 a 3.

* Más adelante se demuestra que las secciones tipo 2 tienen capacidad de rotación suficiente para ser utilizadas en estructuras diseñadas plásticamente que se construirán en zonas no sísmicas, y que la capacidad de rotación de las secciones tipo 1 las hace adecuadas para vigas de estructuras en las que se requiere un elevado factor de ductilidad, como son los edificios de varios pisos en zonas de alta sísmicidad.

Pandeo local de los patines.

El patín comprimido de una viga está en condiciones parecidas a las de una columna en compresión axial. Si se evita su desplazamiento lateral por medio de un contraventeo adecuado, y el alma es suficientemente robusta para impedir el pandeo en el plano vertical (esta condición se cumple casi siempre; son excepciones las trabes armadas de alma muy esbelta), la única forma de pandeo posible es por torsión, acompañada por una rotación del alma.

En la fig. 3.3 se muestran esquemáticamente el patín comprimido, la sección transversal original de la viga, y la configuración deformada que adopta al pandearse.

Cuando el momento alcanza el valor crítico el patín gira alrededor de su unión con el alma, la sección transversal deja de ser simétrica y las deformaciones adicionales ocasionan una rápida reducción de la resistencia a la flexión.

En la fig. 3.4 se ha trazado la curva momento-rotación de una viga de sección I, libremente apoyada, flexionada alrededor de su eje de mayor momento de inercia por una carga aplicada en el centro del claro. El cambio de pendiente en cada apoyo es $\theta/2$, y $\theta_p = M_p L/EI$ es la suma de las rotaciones en los dos extremos que correspondería al instante en que se forma una articulación plástica en la sección media de la viga ($M_c = M_p$) si su comportamiento fuese elástico hasta ese instante (punto A de la curva y fig. 3.5a). Las dos rectas trazadas con línea interrumpida, OA y AB, representan el comportamiento supuesto en la teoría plástica simple.

La línea continua, que muestra el comportamiento real, se separa del idealizado cuando comienza el flujo plástico; sin embargo, el momento resistente sigue creciendo, y eventualmente sobrepasa a M_p , a causa del endurecimiento por deformación de las fibras exteriores.

El pandeo local, que se inicia en la porción plástificada del patín comprimido, ocasiona una caída en la resistencia a la flexión.

El comportamiento que se acaba de describir es típico de vigas con momentos flexionantes que varían con cierta rapidez en la vecindad de la sección crítica.

La "capacidad de rotación" de la viga se define como

$$R = \frac{\theta_U}{\theta_p} - 1$$

θ_U es la rotación correspondiente al punto en que la rama descendente de la curva de la fig. 3.4 cruza la recta horizontal $M = M_p$, y θ_p , que ya se ha definido, es la rotación elástica ficticia representada por la abscisa del punto A.

R vale cero cuando el miembro resiste el momento M_p pero no puede conservarlo si las rotaciones crecen por encima de θ_p , pues en ese caso $\theta_U = \theta_p$. Es lo que sucede, teóricamente, en las secciones tipo 2, aunque las vigas reales de este tipo tienen una pequeña capacidad de rotación.

El ángulo que gira la articulación plástica entre los puntos A y B de la fig. 3.4 es $\theta_H = \theta_U - \theta_p$, igual a la suma de rotaciones en los extremos de la viga desde que el momento en el centro del claro alcanza el valor M_p (suponiendo comportamiento elástico hasta entonces) hasta que vuelve a adquirir ese valor, en la rama descendente de la curva (figs. 3.4 y 3.5); los desplazamientos d eje de la viga, en ese intervalo, se deben exclusivamente a las rotaciones en los apoyos y en la articulación plástica.

Para que la resistencia de una estructura iguale o exceda la predicha por la teoría plástica simple, la capacidad de rotación de los miembros que la componen, en las secciones en que aparecerán las articulaciones plásticas asociadas con el mecanismo de colapso, debe ser igual o mayor que la requerida para la formación de ese mecanismo.

Se tiene abundante información experimental sobre las relaciones, en el intervalo plástico, entre las longitudes no soportadas lateralmente, los cocientes ancho/grueso de patines y alma, y la capacidad de rotación de las vigas, pero no existe ningún método de análisis que incluya esa información de manera satisfactoria. Además, aunque se contase con ese método, su utilidad en problemas rutinarios de diseño sería cuestionable, pues no es práctico determinar en cada caso la capacidad de rotación requerida en cada articulación plástica para alcanzar el nivel deseado de redistribución de momentos. El proceso es difícil y poco confiable; además, a causa del endurecimiento por deformación,

rotaciones plásticas necesarias son significativamente menores que las calculadas suponiendo un comportamiento elastoplástico ideal.

En normas y especificaciones de diseño se ha seguido, en general, un enfoque más realista, que consiste en proporcionar reglas para controlar el pandeo lateral y el local hasta que se desarrollen rotaciones plásticas suficientes en la mayoría de las estructuras ordinarias.

Se han hecho estudios que demuestran que las capacidades de rotación requeridas en estructuras típicas diseñadas plásticamente son pequeñas, menores de dos, y aún cuando las demandas teóricas sean grandes, disminuyen drásticamente para cargas muy poco menores que la máxima.

Las reglas para controlar la inestabilidad local de miembros en flexión incluidas en las especificaciones del AISC (refs. 2 y 3) están basadas en que en la mayoría de las estructuras propias de la ingeniería civil es suficiente contar con capacidades de rotación no menores de tres (lo que equivale a admitir deformaciones unitarias cuatro veces mayores que las correspondientes a la terminación del comportamiento elástico), para que puedan tener lugar las redistribuciones de momentos necesarias para la formación del mecanismo de colapso.

Se ha obtenido una relación experimental entre el cociente $b/2t$, donde b es el ancho y t el grueso del patín, y la capacidad de rotación R , regida por el pandeo local del patín comprimido, de vigas bajo momentos que disminuyen con rapidez a los lados de la sección crítica. (Las condiciones son muy parecidas cuando el momento flexionante es aproximadamente constante en la zona en que se forma la articulación plástica). Para $R = 3$, se tiene

$$\frac{b}{2t} \sqrt{\frac{F_y}{3100} \frac{E}{E_{ed}}} \leq 8.0$$

El valor medio del módulo de endurecimiento por deformación E_{ed} es 42 200 kg/cm², con una desviación estándar de 10 550 Kg/cm²; tomando $E_{ed} = 31650$ Kg/cm², es decir, una desviación estándar debajo del valor medio, debido a la poca confiabilidad de estas cifras, y haciendo $E = 2039000$ Kg/cm², se llega a

$$\frac{b}{2t} \leq \frac{555}{\sqrt{F_y}}$$

que es casi igual a la relación indicada en las especificaciones AISC de 1989 (ref. 2) para que una sección I en flexión sea considerada compacta, desde el punto de vista del cociente de ancho/grueso de sus patines, y en AISC/LRFD (ref. 3) para que el perfil pueda utilizarse en estructuras diseñadas plásticamente.

En las regiones en las que se formarán, eventualmente, las articulaciones plásticas asociadas con el mecanismo de colapso de muchas estructuras construidas en zonas de alta sismicidad, se requieren capacidades de rotación muy superiores a las mencionadas arriba. Se ha sugerido que para que una estructura desarrolle una ductilidad de conjunto de 3 a 5 los factores de ductilidad de entrepiso pueden estar comprendidos entre 3 y 8 ó 10; y los de los miembros individuales estarán, probablemente, en el intervalo de 5 a 15, o aún más. En estos casos es prudente dimensionar los miembros estructurales de manera que, al menos en las zonas de formación de articulaciones plásticas, tengan capacidades de rotación de 9 ó 10.

Utilizando los resultados experimentales mencionados arriba, se encuentra que para que R sea igual a 10 se requiere que el patín comprimido de las secciones I y H satisfaga la condición

$$\frac{b}{2t} \leq \frac{437}{\sqrt{F_y}}$$

Este es el valor especificado en las recomendaciones del AISC para diseño sísmico de edificios con estructura de acero (ref. 4).

Los dos límites que se acaban de determinar coinciden, muy aceptablemente, con los especificados en la Tabla 2.3.1 de la ref. 1 para patines de secciones I, H o T, y de canales, en flexión, de los tipos 1 y 2. Desde el punto de vista de la relación ancho/grueso de los patines, las secciones tipo 2 tienen capacidades de rotación comprendidas entre 2 y 3, y las tipo 1 pueden emplearse en estructuras en las que se necesite un factor de ductilidad elevado, como en los edificios de varios pisos construidos en zonas sísmicas.

Los límites superiores de las secciones tipo 3 se obtienen utilizando la teoría del pandeo elástico de placas, y ajustando las relaciones ancho/grueso

los patines para que no se pandeen localmente antes de alcanzar el esfuerzo de fluencia F_y . Estas secciones no pueden utilizarse en zonas en las que deban formarse articulaciones plásticas, pero sí se emplean en regiones de la estructura que se mantienen en el intervalo elástico durante todo el proceso de carga.

Los límites de las relaciones ancho/grueso de los patines de secciones I, H o T, y de canales, en compresión pura, son los mismos para las secciones tipo 1 a 3; ésto se debe a que en elementos comprimidos axialmente no se requiere capacidad de rotación, por lo que basta dimensionarlos para que se alcance el esfuerzo de fluencia, F_y , sin pandeo local prematuro. En columnas esbeltas, que fallan por pandeo de conjunto bajo esfuerzos menores que F_y , puede incrementarse la relación ancho/grueso de los elementos planos, pues no tiene objeto posponer el pandeo local hasta que el esfuerzo de compresión llegue al límite de fluencia si el miembro completo falla bajo esfuerzos menores.

Otros elementos comprimidos.

Las relaciones ancho/grueso que aparecen en la Tabla 2.3.1 de la ref. 1 para elementos planos comprimidos de otros tipos, se han obtenido siguiendo caminos semejantes a los descritos para patines de secciones H e I; teniendo en cuenta sus condiciones de apoyo en los bordes longitudinales. Como los patines de las secciones en cajón están apoyados en los dos bordes longitudinales, su resistencia al pandeo local es mayor que la de los patines de vigas, y las relaciones ancho/grueso que separan los diversos tipos de sección son considerablemente más grandes.

Las almas de columnas de secciones I o H del tipo 3, comprimidas axialmente, se encuentran en condiciones semejantes a las de los patines en compresión de vigas de sección transversal rectangular hueca del mismo tipo, por lo que se especifica la misma relación ancho/grueso: la que corresponde a la aparición del esfuerzo F_y , sin pandeo prematuro. En las columnas en compresión pura se conserva el mismo límite para los otros dos tipos de sección, dado que no requieren capacidad de rotación.

Pandeo local de almas en flexión.

Los límites impuestos a la relación peralte/grueso de las almas tienen el mismo objeto que los prescritos para los patines: lograr que el comporta-

miento de los elementos planos individuales sea el que corresponde al tipo de sección transversal considerado.

En vigas de proporciones normales el pandeo local del alma no suele ser crítico, pues el estado de esfuerzos al que está sometida es mucho menos severo que el del patín comprimido, y sus condiciones de apoyo son más favorables.

El límite de la relación ancho/grueso del alma de barras en flexión del tipo 1 proviene de estudios teóricos y experimentales, y el de las secciones tipo 2 es principalmente de carácter experimental.

Pandeo local de patines y almas de barras flexocomprimidas.

Los elementos planos que componen las columnas flexocomprimidas de sección tipo 1 ó 2 tienen robustez suficiente para que la columna resista el momento plástico reducido por fuerza axial, M_{pc} .

Los requisitos que han de cumplir los patines comprimidos son los mismos que en las vigas, por lo que se utilizan límites iguales de las relaciones ancho/grueso.

El comportamiento de las placas de alma, sometidas a flexocompresión, es más complicado; depende, en buena medida, de los valores relativos de la fuerza axial y del momento flexionante. Los límites de las relaciones ancho/grueso de almas flexocomprimidas de secciones I o H que formarán parte de estructuras construidas en zonas sísmicas se han determinado por medio de estudios de carácter principalmente experimental.

4. ELEMENTOS ESTRUCTURALES.

Las estructuras reticulares están formadas, en todos los casos, por vigas, columnas y uniones; puede haber, además, contraventeos verticales o muros de rigidez, pero éstos, aunque convenientes en ocasiones, no son indispensables (Fig. 4.1).

Las vigas soportan el sistema de piso; reciben, a través de él, las cargas verticales, y las transmiten a las columnas; además, hacen que las columnas de marcos sin contraventeo puedan adoptar la configuración necesaria para resistir fuerzas horizontales, y contribuyen a la rigidez lateral del conjunto; en marcos contraventeados forman parte del sistema que resiste las fuerzas horizontales.

Como la operación de los edificios exige que los pisos sean horizontales, las vigas de las construcciones urbanas tienen siempre esa posición; ^{por eso las vigas} ~~ésta es la~~ ~~son uno de los elementos estructurales más importantes, porque aunque son poco~~ ~~razón de ser de las vigas, que son poco~~ ~~eficientemente~~ ~~para~~ permiten crear los espacios necesarios para el desarrollo de las actividades de los ocupantes de las edificaciones.

Obran sobre ellas fuerzas transversales y momentos aplicados en los extremos, que aparecen por la continuidad con el resto de la estructura; deben diseñarse para que resistan momentos flexionantes y fuerzas cortantes; las fuerzas normales ^{significativas,} ~~no~~ ~~suelen ser despreciables,~~ excepto en crujeas contraventeadas.

Las columnas, de eje casi siempre vertical, soportan las cargas que reciben de los tramos superiores y de las vigas que se apoyan directamente en ellas, llevándolas eventualmente a la cimentación, así como los momentos producidos por la continuidad con las vigas. Además, deben ayudar a soportar las fuerzas horizontales en marcos contraventeados y resistirlas, por sí solas, en los que no tienen contraventeos ni muros de rigidez; también contribuyen a darle a la estructura la rigidez lateral necesaria para evitar problemas de inestabilidad de conjunto y para mantener los desplazamientos, en condiciones de servicio, dentro de límites admisibles. Trabajan en flexocompresión (la compresión axial es una condición poco frecuente), y los efectos de las fuerzas cortantes suelen ser insignificantes. La flexocompresión es casi siempre biaxial, pues cada

columna suele formar parte de dos marcos, frecuentemente ortogonales, que se cruzan en ella.

Las uniones transmiten los elementos mecánicos, momentos flexionantes, fuerzas cortantes y normales, de las vigas a las columnas y viceversa, así como las fuerzas de las diagonales de contraventeo al marco, ~~propioamente dicho~~, para que todos los elementos de la estructura trabajen en conjunto.

Hasta hace poco tiempo las uniones se trataban como simples puntos de intersección de varias barras; en la actualidad se reconoce su importante papel en el trabajo de conjunto de las estructuras, por lo que el diseño no se limita, como antes, al de los ángulos, placas, y sujetadores que unen a las vigas con las columnas, sino abarca también la revisión de la junta propiamente dicha, es decir, de la zona común a todas las barras.

La importancia de las conexiones en la respuesta de estructuras sometidas a sismos intensos, y el gran número de fenómenos especiales que deben considerarse en su diseño, hacen aconsejable tratarlas por separado, después de estudiar el comportamiento de vigas, columnas y contravientos.

Los contravientos y los muros de rigidez son elementos situados en planos verticales que contribuyen a resistir las fuerzas horizontales, a evitar fenómenos de inestabilidad de conjunto y a mejorar la rigidez lateral. En marcos de varios pisos se emplean muros de rigidez de tabique o de concreto reforzado, o contravientos compuestos por elementos de acero estructural colocados en diagonal, en V, o con ~~alguna~~ otra configuración adecuada.

Las fuerzas horizontales pueden ser resistidas en su totalidad por muros de rigidez de concreto o por armaduras verticales formadas por vigas, columnas y diagonales, unidas entre sí por medio de conexiones flexibles; sin embargo, estos sistemas son poco dúctiles por lo que, aunque se emplean con frecuencia en estructuras que sólo deben resistir fuerzas de viento, en zonas sísmicas suelen usarse combinados con marcos rígidos.

En las últimas décadas se han efectuado numerosos estudios, teóricos y experimentales, para determinar si las normas que se utilizan en el diseño de

estructuras con carga estática son aplicables a las construidas en áreas sísmicas y, de no serlo; de qué manera deben modificarse. Se ha encontrado que las normas mencionadas son válidas en sus aspectos principales; en lo que sigue se discuten ~~las~~ modificaciones y adiciones necesarias para obtener estructuras que trabajen adecuadamente bajo sollicitaciones sísmicas severas. No se mencionan los aspectos relativos a las relaciones ancho/grueso de los elementos planos de las secciones transversales porque se tratan en otro apartado.

Los requisitos ^{siguientes} ~~que se indican a continuación~~ deben ser satisfechos para que un marco rígido sea considerado marco dúctil; se aplican, de acuerdo con el Reglamento del D. F., a marcos rígidos diseñados con factores Q de comportamiento sísmico iguales a 3 ó 4.

VIGAS. Para que un elemento estructural sea considerado una viga debe trabajar predominantemente en flexión; pueden actuar en ella fuerzas axiales de diseño nulas o pequeñas, que no excedan de $P_y/10$, donde $P_y = A F_y$.

Conviene asegurarse de que las vigas tienen características para las que se ha demostrado, experimentalmente y por su comportamiento durante temblores reales, que cumplen las condiciones necesarias para formar parte de estructuras dúctiles; entre las más importantes están las siguientes:

El claro libre no debe ser menor que cinco veces el peralte de la sección transversal, ni el ancho de los patines mayor que el ancho del patín o el peralte del alma de la columna en la que se apoya la viga.

El eje de las vigas no debe separarse horizontalmente del de las columnas más de un décimo de la dimensión transversal de la columna normal a la viga; ~~este requisito tiene por objeto evitar~~ ^{se evitan así} momentos en las columnas que no suelen considerarse ni en el análisis ni en el diseño, y ~~reducen~~ ^{se reducen} a un mínimo las torsiones y otros efectos que es difícil incluir en el diseño de las juntas.

Las secciones transversales ~~deben~~ ^{han de} tener dos ejes de simetría, uno vertical, en el plano en que actúan las cargas gravitacionales, y otro horizontal; los dos ejes deben conservarse cuando se utilicen cubreplacas para aumentar la resistencia de la sección.

La soldadura entre el alma y los patines de vigas formadas por placas ~~soldadas~~ debe ser continua, para evitar problemas de pandeo local en el pat. comprimido entre segmentos de soldaduras y eliminar las concentraciones de esfuerzos en los extremos de los cordones interrumpidos, pero puede, en general, diseñarse para transmitir los esfuerzos cortantes horizontales que le corresponden, lo que suele llevar a cordones de tamaño mínimo. Sin embargo, en las zonas de formación de articulaciones plásticas las soldaduras han de desarrollar la resistencia total, en cortante, del alma o almas, para que cuando se formen y giren las articulaciones no haya fallas prematuras por cortante en los planos de unión de las placas que constituyen el perfil.

Siempre que sea posible deben evitarse los agujeros en las zonas de formación de articulaciones plásticas, pues las concentraciones de esfuerzos que se presentan en el material cercano pueden ocasionar, bajo carga cíclica, la aparición de grietas, que producirían disminuciones importantes en la capacidad de rotación del miembro. Cuando los agujeros sean inevitables, se harán con un proceso que elimine el material altamente deformado, y en ocasiones agrietado, que rodea a los agujeros punzonados.

En aceros que tengan un esfuerzo mínimo especificado de ruptura menor que 1.5 veces el esfuerzo de fluencia mínimo no se permite que se formen articulaciones plásticas en zonas en que se haya reducido el área de los patines, ya sea por agujeros para tornillos o por otra causa cualquiera; esto se debe a que en aceros con poco endurecimiento por deformación se reduce la amplitud de las articulaciones plásticas, aumentan las deformaciones inelásticas por unidad de longitud, y se acrecientan los problemas ocasionados por las discontinuidades geométricas.

No debe hacerse ningún tipo de empalme en la viga propiamente dicha, o en sus cubreplacas, en zonas de formación de articulaciones plásticas.

La fuerza cortante no suele ocasionar fallas de tipo frágil en vigas de acero de alma llena; sin embargo, si es demasiado elevada puede reducir la capacidad de la viga para resistir flexión (es decir, puede evitar que se ~~alcanze~~ ^{llegue al} momento plástico) y, además, ocasiona incrementos importantes en las deformaciones. Por las razones anteriores, no conviene que se alcance la resistencia

máxima en cortante antes de que se formen las articulaciones plásticas asociadas con el mecanismo de colapso; ^{para ello, se} ~~esto se evita diseñando~~ la viga para que resista la fuerza cortante máxima ^{posible} ~~que puede aparecer en ella~~, que ^{si se} ~~corresponde~~ a la formación de articulaciones plásticas en sus dos extremos, o en un extremo y en la zona central, dependiendo de los valores relativos de los momentos ocasionados por carga vertical y por sismo. Los momentos en las articulaciones plásticas se calculan sin factor de resistencia, con lo que se tiene una condición más desfavorable, pues aumentan las fuerzas cortantes, y se evalúan con un esfuerzo igual a $1.25 F_y$ (se consideran iguales a $1.25 F_y Z = 1.25 M_p$) para tener en cuenta el endurecimiento por deformación que se presenta durante las grandes rotaciones de las articulaciones plásticas.

En la Fig. 4.1 se muestran las condiciones en que se encontrará una viga al formarse el mecanismo de colapso del entrepiso, cuando los momentos por sismo son mayores que los de carga vertical, y se indican los valores de las fuerzas cortantes máximas en los extremos.

En los niveles superiores de los marcos es frecuente que el mecanismo sea el de la Fig. 4.2; ~~en ese caso~~ las fuerzas cortantes máximas se calculan con momentos $1.25 M_p$ en las dos articulaciones plásticas.

Conocidos esos momentos y ~~el~~ de carga vertical, el momento en el extremo izquierdo de la viga se determina sin dificultad.

Como una opción, en la ref. 1 se permite hacer el dimensionamiento con las fuerzas cortantes de diseño obtenidas en el análisis, pero utilizando un factor de resistencia reducido, igual a 0.70. ~~La fuerza cortante no suele ser crítica, en el diseño de las vigas de los marcos dúctiles, pero~~ ^{pequeños} ~~aunque puede llegar a serlo cuando los claros son muy reducidos.~~

Han de soportarse lateralmente todas las secciones en las que puedan formarse articulaciones plásticas y secciones suficientemente cercanas a ellas para evitar que las vigas fallen por pandeo lateral por flexotorsión, antes de que se forme el mecanismo de colapso.

La longitud no soportada lateralmente, $L_p = 1.250 r_y / \sqrt{F_y}$, permite capacidades de rotación en las articulaciones del orden de 10, suficientes para vigas de marcos dúctiles de sección transversal I o H.

do el factor de Resistencia de 0.9 a 0.7, con lo que ya no se requiere satisfacer la condición

Lo mismo que en las vigas, se busca que en las columnas no se presenten fallas por cortante. Para ello, la fuerza cortante de diseño se obtiene del equilibrio del miembro, considerando su longitud igual a la altura libre y suponiendo que obran en sus extremos momentos del mismo sentido (la columna se flexiona en curvatura doble), de magnitud igual al ~~los~~ momentos máximos resistentes ~~de las columnas~~ en el plano en estudio, que vale $Z_c (F_{yc} - F_a)$.

Aunque el criterio general de diseño está basado en la formación de articulaciones plásticas en las vigas, siempre hay la posibilidad de que se articulen los dos extremos de alguna columna, por lo que la fuerza cortante de diseño es la que corresponde a esa condición.

Los requisitos de esta sección ~~deben influir~~ ^{influyen} en el diseño de las columnas sólo en casos poco comunes.

Cuando las columnas se diseñen por flexocompresión con el procedimiento optativo indicado arriba, la revisión por fuerza cortante se realizará con la fuerza de diseño obtenida en el análisis, pero utilizando un factor de resistencia de 0.7.

Cuando $P_u / F_R P_n > 0.5$, donde P_u es la fuerza axial de diseño en la columna y P_n su resistencia nominal en compresión, en la ref. 4 se recomienda que además de las condiciones de carga usuales se consideren las dos siguientes, en el diseño de columnas:

Compresión axial. - $1.2 CM + 0.5 CV + 0.4 Q CS \leq FRP_n$
donde el producto 0.4Q se tomará, como mínimo, igual a 1.0.

En garages, áreas destinadas a reuniones públicas, y ~~siempre~~ ^{en todos los casos} que la carga viva sea mayor de 500 Kg/m^2 , el factor que multiplica a CV se hará igual a 1.0

Tensión axial. - $0.90 CM - 0.4 QCS \leq FR P_n$

El producto $0.6Q$ se tomará, como mínimo, igual a 1.0.

CM, CV y CS indican efectos producidos por carga muerta, carga viva y sismo, y Q es el factor de comportamiento sísmico especificado en el Reglamento.

Pueden tomarse como límite superior de las cargas obtenidas como se indica los valores siguientes:

La carga máxima transmitida a la columna, considerada igual a 1.25 veces la suma de las resistencias de las vigas y elementos de contraventeo que lleguen a ella.

El valor determinado por la capacidad de la cimentación para resistir fuerzas hacia arriba producidas por el volteo de la estructura.

Las ~~estas~~ dos condiciones, la primera para compresión con carga viva reducida, y la segunda para tensión con carga muerta reducida y sin carga viva, deben satisfacerse sin incluir efectos de flexión.

Tienen por objeto ~~incluir~~ ^{considerar} en el diseño los efectos de fuerzas axiales que, durante un sismo intenso, pueden exceder los obtenidos en el análisis, como un resultado de la reducción de las fuerzas laterales por comportamiento inelástico, de la estimación de fuerzas de volteo menores que las reales y de las aceleraciones verticales, que no se incluyen específicamente como acciones de diseño.

CONTRAVENTEOS:
Los contraventeos de acero son elementos estructurales muy efectivos para resistir fuerzas laterales. No solamente ayudan a resistir las acciones producidas por sismos de gran intensidad, sino también reducen a un mínimo los desplazamientos de entrepiso ocasionados por temblores menores o vientos intensos. Los contraventeos se usan con frecuencia en edificios altos, plantas industriales y, en general, estructuras de todos los tipos.

media. Estos requisitos se han obtenido del estudio experimental de miembros compuestos por dos ángulos o canales, por lo que pueden no ser adecuados para perfiles muy diferentes.

La separación entre uniones será tal que no sea crítico el pandeo individual de ninguno de los perfiles. En la sección media del contraventeo deben evitarse las uniones con tornillos, ya que en esas zonas se formarán articulaciones plásticas.