



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**NOTAS SOBRE REVISIÓN Y COMPORTAMIENTO DE  
ESTRUCTURAS DE MAMPOSTERÍA.**

**DR. OSCAR HERNANDEZ BASILIO**



## D I S E Ñ O

## 1. INTRODUCCION.

La mampostería es el elemento estructural resultante de la unión de piezas formadas por distintos materiales, naturales o artificiales, con un mortero que contribuye a la ligazón entre éstas y que influye en las características del elemento estructural que se forma. La capacidad de la mampostería ante distintos elementos mecánicos no será directamente proporcional a las propiedades individuales de sus componentes; sin embargo, es conveniente conocer las características de las distintas piezas y morteros que pueden llegar a formar una mampostería y la influencia cualitativa que pueden tener en la misma.

APUNTE 149

FACULTAD DE INGENIERIA UNAM.



604031

G.- 604031

AUTOR: DR. OSCAR HERNANDEZ BASILIO

## 2.0 MATERIALES COMPONENTES

### 2.1 Piezas naturales y artificiales

#### 2.1.1 Piezas naturales

Las mamposterías de piedras naturales se conocen como mamposterías de 2a. ó 3a. clase según la regularidad de las piedras que las componen. Una mampostería de 2a se forma con sillares de -- piedra labrada de forma más o menos regulares; a este tipo de -- mampostería, reforzada o no, también son aplicables los crite-- rios de diseño que se verán más adelante. Las mamposterías de 3a clase son las formadas con piedras naturales, irregulares, su di-- seño se realizará en la forma como lo especifica el capítulo 6 - de las Normas Técnicas Complementarias, Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería, del Reglamento de Construcciones pa-- ra el Distrito Federal.

#### 2.1.2 Piezas artificiales

Las piezas artificiales con las que se puede construir una mam-- postería pueden agruparse en 3 grandes variedades: 1) de barro, 2) de cemento y 3) de materiales varios.

##### Piezas de barro

A su vez las piezas de barro pueden clasificarse en: a) estado - natural, b) cocidas y c) industrializadas.

Las piezas de barro en estado natural toman comúnmente el nombre de adobe, el cual si es protegido del intemperismo y reforzado - convenientemente, ver ref. 1, constituye un sistema constructivo que resulta económico y seguro. Estas piezas de adobe tienen ge-- neralmente dimensiones de 10\*30-40\*40-60 cm (peralte, ancho, lar-- go) y aparte del barro se les agrega usualmente arena y/o paja pa-- ra mejorar ligeramente algunas de sus propiedades (resistencia a tensión, agrietamiento por secado, etc.). Obviamente las propie-- dades mecánicas de los adobes son muy variables pues dependen bá-- sicamente de la calidad de la tierra con la que se fabrican. En

la tabla 2.1 se muestra una muestra no muy representativa de las propiedades de los adobes; sin embargo, nos dan una idea del orden de variación de dichas propiedades. Se observa de la tabla que la resistencia a tensión por flexión varía entre 2 y 4.4 --- kg/cm<sup>2</sup>; mientras que la resistencia a compresión lo hace entre 5 y 16 kg/cm<sup>2</sup>. En la ref 1 se hizo un estudio estadístico de las propiedades de los distintos adobes, estableciéndose como valores nominales de diseño (valores máximos de diseño a considerar) ante distintas acciones, los que se muestran en la tabla 2.2. - Con estos valores se puede calcular la resistencia de estructuras de adobe. En los anteriores valores se supone que la mampostería de adobe está en estado seco; de no observarse esta condición la capacidad disminuye drásticamente como se observa en la fig. 1.1, de ahí la conveniencia de proteger el adobe del intemperismo.

#### Piezas de barro cocidas

La mampostería construida con piezas de barro cocidas es la más común en nuestro medio; las dimensiones nominales con las que se fabrican son 7\*14\*28 cm, pero comúnmente son 6\*12\*24 cm. El proceso de fabricación consiste en formar adobes mediante un amasijo de barro con arena, y en algunas ocasiones desperdicios industriales, para después someterlos a un proceso de cocción que tiene por principal resultado mejorar las propiedades mecánicas.

Estas propiedades dependen mucho de la calidad del barro utilizado, como se puede ver en la tabla 2.3 para piezas de distintas -

procedencia. Se observa en dicha tabla que la resistencia, en este caso a compresión, es muy variable.

#### Piezas de barro industrializadas

Estas piezas resultan de aplicar al barro un proceso de intrusión que permite que las piezas sean de calidad más o menos uniforme. Existen una gran variedad de formas de presentación y de tamaños que las que se fabrican. Las más comunes son las que tienen huecos circulares o cuadrados y los que forman secciones tipo panel, los tamaños más comunes son de 6\*12\*24, --- 6\*10\*20 ó 10\*10\*20 cm. Las propiedades dependen del barro que lo compone pero, ahora tiene también una influencia significativa el proceso de industrialización. En la tabla 2.3 se muestran las propiedades de distintas piezas de barro industrializadas. Se observa que pueden tener gran resistencia, por lo que en muchas ocasiones no son completamente exigidas; también se observa que este tipo de piezas no tienen una resistencia menor de 120 kg/cm<sup>2</sup>.

#### Piezas de cemento

Las piezas que contienen agregados pétreos y cemento constituyen una parte importante de las que se emplean para la construcción de muros. Son principalmente dos los tipos de piezas: -- bloques y tabiques.



### Bloques de concreto

Existen por lo general tres tipos de bloques: ligero, intermedio y pesado. Se clasifican así por el peso de las piezas. Los bloques ligeros están fabricados con agregados de bajo peso volumétrico por lo que se recomienda su empleo solo en interiores; los de tipo intermedio y pesados contienen por lo general arenas, y en ocasiones gravas andesíticas, sufriendo el último tipo un proceso de compactación por vibrado o por presión que hace que aumente su peso volumétrico y que mejoren sus características de resistencia.

### Tabiques de concreto

A estos se les denomina generalmente como tabicones y existe una gran variedad según el tipo de agregado que se emplee, por lo mismo, existe una gran variabilidad en sus propiedades.

En la tabla 2.4 se presentan valores de resistencia a compresión de bloques y tabicones producidos en el área del Valle de México, se observa que existe gran variación de resistencias.

### 2.2 Morteros

Como se mencionó con anterioridad, la resistencia de la mampostería no solo depende de las propiedades de las piezas sino también de las del mortero que las une. De distintos estudios se ha observado que la resistencia a compresión de un mortero no es el índice más representativo de la resistencia que tendrá una mampostería; parece ser que es mejor indicador el proporcionamiento del mortero. Este proporcionamiento usualmente es por volumen y se representa mediante tres identificadores (A:B:C); el primero indica la cantidad de cemento de la mezcla, el segundo las proporciones de cal que se emplean respecto al cemento y el tercero la cantidad de arena de la mezcla, ejemplo 1:0:3; 1: 1/2 : 4 1/2, etc.

En la tabla 2.5 se presenta valores promedio de diversos proporcionamientos obtenidos después de una amplia investigación.

Estos morteros se emplearán para la construcción de mamposterías de bloques y tabiques tradicionales (barro, cemento o sílico-calceos), en caso de piezas de materiales distintos, deberán emplearse los tipos de mortero recomendados por el fabricante.

### PIEZAS DE MATERIALES VARIOS.

Actualmente se están empleando materiales diferentes a los tradicionales para la elaboración de piezas; algunos de los cuales han dado resultados satisfactorios, como lo son tabiques sílico-calcáreos, y otros que de mejorarse su tecnología de fabricación podrán hacerlo en un futuro, como los tabiques asfálticos, bloques de yeso, tabiques de desperdicios industriales, etc.

En general con cualquier tipo de pieza puede construirse una mampostería; será por tanto importante conocer las propiedades de los mismos ante diversos estados de carga. Para ello es necesario realizar ensayos índice que nos permita determinar las características de las piezas cuando se emplean con cierto mortero que los unen.

### 3.0 PROPIEDADES INDICE

Puede intuirse en este momento la gran variedad de mamposterías que se podrían construir y de la dificultad que se tendría para que algún reglamento pudiera imponer valores de resistencia representativos de las distintas combinaciones de piezas y morteros; esto sin embargo es posible agrupando los materiales por algunas características particulares, tal como lo hace el actual Reglamento de Construcciones del Distrito Federal y los Reglamentos Estatales. En estos, se proponen valores de resistencia para grupos de piezas: tabique recocido, tabique extruido, bloque de concreto tipo pesado y tabicón; para estos materiales se proporciona un valor mínimo alcanzable si se emplea el proporcionamiento de mortero especificado. Lo anterior se verá en detalle más adelante.

Las propiedades que más nos interesarán para determinar la capacidad de muros de mampostería son su resistencia a compresión y a cortante, la primera nos servirá para calcular -

la capacidad a carga axial y la segunda la resistencia a fuerzas laterales, como las producidas por un sismo.

### 3.1 Resistencia a carga axial.

Los reglamentos mexicanos establecen como procedimiento estándar para calcular el esfuerzo axial resistente de una mampostería, el del ensaye de pilas; las cuales se forman de una pieza en su base por un número tal de hiladas que hacen que su relación lado corto de la pieza a altura de la pila sea -- aproximadamente de cuatro, ver fig. 3.1. Las piezas extremas de estas pilas deberán estar capeadas con azufre para que tengan superficies niveladas para la correcta aplicación de la carga axial en la máquina de ensaye. El procedimiento de ensaye establece que se ensayarán cuando menos nueve especímenes para que de esos resultados pueda calcularse el valor nominal de diseño a compresión de la siguiente forma

$$f_m^* = \frac{\bar{F}_m}{1 + 2.5 \text{ C.V.}}$$

donde  $\bar{F}_m$  es el esfuerzo promedio de todos los ensayos y C.V. el coeficiente de variación de la muestra.

De este ensaye también puede calcularse el módulo de elasticidad de la mampostería si se miden las deformaciones de los especímenes. En el Reglamento del D.D.F. se especifica que si no se mide de un ensaye, el módulo elástico vale:

Para mamposterías de bloques y tabiques de concreto

$$E = 600 f_m^* \text{ para cargas de corta duración}$$

$$E = 250 f_m^* \text{ para cargas sostenidas}$$

Para mamposterías de tabiques de barro

$$E = 400 f_m^* \text{ para cargas de corta duración}$$

$$E = 250 f_m^* \text{ para cargas sostenidas}$$

Estos ensayos en carga axial no se pretende que se ejecuten de manera rutinaria tal como se hace con los cilindros de concreto, sino que resulta conveniente realizarlos cuando se trabaje con piezas de procedencia muy diferente a la normalmente empleada, o cuando se pretenda hacer un diseño más refinado de la capacidad de carga de una estructura.

En muchos proyectos no es económicamente posible, ni importante, llevar a cabo un control estricto de la calidad de la mampostería, sino que sólo es necesario tener una idea cercana de los valores mínimos probables que se puede alcanzar -- con ciertos tipos de piezas y morteros; para ello, los reglamentos mexicanos cuentan con tablas, como las número 3.1 y 3.2 para el del Distrito Federal, donde para distintos tipos de piezas y calidades de mortero se pueden tomar valores nominales de diseño, que como es obvio de entender, resultarían conservadores de los obtenidos si se hiciera el ensaye respectivo. Valores aún más conservadores se tiene si se usa la tabla 3.3 (del Reglamento del Departamento del Distrito Federal), donde con solo conocer el tipo de pieza se da un -

valor de la resistencia nominal a compresión de la mampostería.

### 3.2 Resistencia a cortante

Para determinar la capacidad a cortante se recomienda se efectúe el ensaye denominado de compresión diagonal en muretes. El espécimen se toma cuando menos con una pieza y media en su base y un número tal de hiladas que hagan que tenga forma aproximadamente cuadrada, este espécimen se ensayará bajo una carga cuya dirección será la de una de sus diagonales ver fig. 3.2 el esfuerzo resistente se calculará como el valor de la fuerza que produce la falla, entre el área de la diagonal. Finalmente, la resistencia nominal de diseño se calculará con la expresión:

$$v^* = \frac{\bar{v}}{1 + 2.5 C.V.}$$

donde  $\bar{v}$  y C.V. son la resistencia media y el coeficiente de variación de los especímenes ensayados a cortante, respectivamente.

Como en el caso de carga axial, este ensaye se deberá realizar cuando se quiera determinar con precisión las características de resistencia a cortante; de no ser así, puede hacerse uso de las tablas que presentan los distintos reglamentos mexicanos, por ejemplo la tabla 3.4 (Reglamento del Distrito Federal), donde se proporcionan valores nominales de diseño -

para distintos tipos de piezas y morteros, que al igual que para el caso de carga axial, representan valores conservadores.

De este ensaye en cortante se puede determinar el módulo de rigidez al cortante si se miden las deformaciones unitarias de los diagonales del espécimen, ver ref. 2. Si no se realiza el ensaye, el Reglamento del D.D.F. especifica que se tome el módulo de rigidez como

$$G = 0.3 E$$

Faltó solamente mencionar que las pilas y muretes deben curarse bajo condiciones normales de utilización y que deberán ensayarse cuando menos tres semanas después de construidas. También se recomienda que se ensayen cuando menos nueve especímenes para calcular un valor confiable de la resistencia nominal de diseño.

Con estos parámetros puede pasarse a diseñar las mamposterías, las que deberán cumplir con ciertos requisitos mínimos de estructuración con la finalidad de no presentar un comportamiento frágil que es característico de las mismas cuando no cuentan con refuerzo suficiente, principalmente ante los efectos de sismo y hundimientos del terreno.



#### 4. REQUISITOS MÍNIMOS DE ESTRUCTURACION

Los requisitos mínimos de refuerzo que se mencionarán más adelante tienen como finalidad asegurar un comportamiento adecuado de la mampostería ante los efectos de sismos y de hundimiento diferenciales. Se consideran distintas modalidades de refuerzo y de estructuración.

##### 4.1 Muros diafragma

En construcciones cuya estructura principal es a base de marcos de concreto o acero, existen frecuentemente muros de mampostería que llenan claros entre columnas formando un diafragma que incrementa notablemente la rigidez del conjunto ante cargas laterales. Si se desprecia en el análisis el efecto de estos muros pueden cometerse errores muy serios en la estimación de las fuerzas que actúan en los distintos elementos. Se tienen en estos casos dos opciones: desligar los muros para que los movimientos de la estructura no les afecte (aspecto muy difícil de lograr),

o no desligarlos y revisar que los esfuerzos y deformaciones -- que se inducen en la estructura puedan ser resistidos por la mampostería. En caso de desligar los muros hay que procurar -- que la holgura entre marco y muro sea suficientemente amplia para permitir los desplazamientos laterales sin que se llegue a -- tener contacto con los muros y proporcionar a los mismos resistencia a los empujes normales a su plano por medio de refuerzo, o de apoyos deslizantes sobre la estructura principal. Los muros no desligados de una estructura a base de marcos reciben el nombre de muros-diafragma y su función es rigidizar a la estructura para el efecto de fuerzas laterales. En este caso las columnas y vigas, en una zona igual a una cuarta parte de su longitud libre medida a partir de cada esquina, deberán ser capaces de resistir, cada una, una fuerza cortante igual a la cuarta parte de la que actúa sobre el tablero.

##### 4.2 Muros confinados

El refuerzo de muros con dadas y castillos en México es práctica común que ha demostrado dar lugar a un comportamiento sísmico muy aceptable para construcciones de varios niveles estructuradas a base de muros de carga. Los requisitos de refuerzo especificados para esta modalidad de refuerzo en el Reglamento -- del D.D.F. y en los Estatales, son los que a continuación se -- mencionarán; a muros reforzados en esa forma se les conoce con el nombre genérico de muros confinados.

Las dadas o castillos de muros confinados deberán tener como dimensión mínima el espesor del muro; el concreto tendrá una resistencia a compresión,  $f'_c$  no menor de 150 kg/cm<sup>2</sup>, y el refuerzo longitudinal estará formado por lo menos de tres barras, cuya área total no deberá ser inferior a  $0.2 f'_c/f_y$  por el área de castillo, y estará anclado en los elementos que limitan al muro de manera que pueda desarrollar su esfuerzo de fluencia.

El área del refuerzo transversal, estribos, no será inferior a  $\frac{1000^s}{f_y d_c}$ , siendo  $s$  la separación de los estribos y  $d_c$  el peralte del castillo,  $s$  no debe ser mayor que  $1.5 d_c$  ni 20 cm.

Para que el confinamiento sea adecuado, deberán existir castillos por lo menos en los extremos de los muros y en puntos intermedios del muro a una separación no mayor que vez y media su altura, ni 4m. Además se debe colocar una dala en todo extremo horizontal de muro, a menos que éste último esté ligado a un elemento de concreto reforzado. En muros altos deberán existir dadas en el interior del muro a una separación no mayor de 3m; también se colocarán elementos de refuerzo en el perímetro del todo hueco cuya dimensión exceda de la cuarta parte de la del muro en la misma dirección.

Si la relación altura a espesor del muro excede de 30, éste debe de contar con elementos rigidizantes que eviten la posibilidad de pandeo por cargas laterales.

#### 4.3 Muros con refuerzo interior

El refuerzo de muros de piezas huecas colocando barras verticales en los huecos de las piezas y barras horizontales en piezas especiales o en las juntas entre hiladas, es un procedimiento que se está empleando cada vez con mayor frecuencia en diversos países en zonas sísmicas, aún en edificios relativamente altos. En México su difusión ha sido limitada principalmente por la dificultad de supervisar la construcción para asegurar que el refuerzo esté colocado de acuerdo con lo dispuesto en planos. -- Los requisitos de refuerzo que se mencionan más adelante reflejan la práctica usual especialmente en Nueva Zelanda y en California, con la cual se ha observado un comportamiento muy aceptable ante sismos. En estructuras importantes de esos países es usual llenar todos los huecos de las piezas con un concreto o mortero muy fluido, obteniendo así un elemento prácticamente monolítico similar a un muro de concreto y en el que se pueden emplear para el cálculo del refuerzo criterios semejantes a los especificados para muros de concreto. En el Reglamento del Departamento del Distrito Federal y en los Estatales se conocen como muros reforzados interiormente a aquellos reforzados con malla o barras corrugadas de acero, horizontales y verticales, colocadas en los huecos de las piezas, en ductos o en las juntas. Para que un muro pueda considerarse como reforzado interiormente deberá cumplir los siguientes requisitos mínimos.

La suma de la cuantía de refuerzo horizontal,  $P_h$ , y vertical, -

$P_v$ , no debe ser menor que 0.002 y ninguna de las dos cuantías -- será menor que 0.0007. La cuantía de refuerzo horizontal se -- calcula como  $P_h = A_{sh}/st$ , donde  $A_{sh}$  es el refuerzo horizontal -- que se colocará en el espesor  $t$  del muro a una separación  $s$ ; --  $P_v = A_{sv}/tL$ , en que  $A_{sv}$  es el área total de refuerzo que se co-- locará verticalmente en la longitud  $L$  del muro.

Todo espacio que contenga una barra de refuerzo deberá tener -- una distancia libre mínima entre el refuerzo y las paredes de -- la pieza igual a la mitad del diámetro de la barra y se llenará a todo lo largo con mortero o concreto. La distancia libre mí-- nima entre una barra de refuerzo y el exterior del muro será de 1.5 cm o una vez el diámetro de la barra, la que resulte mayor.

Para el colado de los huecos donde se aloje el refuerzo podrá -- emplearse el mismo mortero que se usa para pegar las piezas, o un concreto de alto revenimiento, con agregado máximo de 1 cm y resistencia a compresión no menor de 75 kg/cm<sup>2</sup>. Para lograr un adecuado confinamiento del refuerzo vertical el hueco de las -- piezas deberá tener una dimensión mínima mayor de 5 cm y un área mayor de 30 cm<sup>2</sup>.

En los extremos del muro se debe colocar por lo menos una vari-- lla N°3 en dos huecos consecutivos; así como también en las in-- tersecciones entre muros o a cada 3m. El refuerzo vertical y -- horizontal en el interior del muro se colocará a una separación no mayor de 6 veces el espesor del mismo ni 90 cm, la menor de -- ellas.

Cuando los muros transversales lleguen a tope, sin traslape de -- piezas, será necesario unirlos mediante dispositivos que asegu-- ren la continuidad de la estructura.

El refuerzo horizontal debe ser continuo en la longitud del muro y anclado en sus extremos. Se deberán cumplir los mismos requi-- sitos de anclaje que para concreto reforzado. Además deberá ha-- ber refuerzo consistente en una barra No. 4 ó su equivalente, a l -- rededor de toda abertura cuya dimensión exceda de 60 cm en cual-- quier dirección.

La relación altura/espesor de estos muros no será superior a 30, a menos que se provean elementos rigidizantes que eviten la posi-- bilidad de pandeo del muro.

Cuando se emplea refuerzo interior deberá tenerse especial cuida -- do mediante una supervisión continua para asegurar que el refuer -- zo esté colocado de acuerdo a lo indicado en planos y que los -- huecos en que se aloja el refuerzo sean colados completamente.

#### 4.4 Muros no reforzados.

Los muros de mampostería no reforzada deben evitarse en zonas de alta sismicidad. En los reglamentos nacionales no se prohíbe su empleo, pero se especifican factores de reducción de resistencia muy drásticos de manera que solo en sado de estructuras secunda-- rias pequeñas pueda resultar económico estructurar a base de mu--

ros no reforzados. Se considerarán como muros no reforzados a -  
aquellos que no se puedan incluir en algún grupo de los antes --  
mencionados.

## 5.0 DISEÑO DE MUROS DE MAMPOSTERIA

### 5.1 Análisis

El análisis elástico riguroso de sistemas de muros de mampostería y losas es sumamente complejo por tratarse de estructuras que no se prestan fácilmente a la descomposición en sistemas bidimensionales, como es el caso de estructuras con columnas. El análisis elástico, suponiendo que las uniones entre losa y muro son nudos rígidos, no se justifica debido a las rotaciones locales que ocurren en dichas uniones. Por lo contrario, se puede suponer que la junta que se forma entre el muro y la losa tiene suficiente capacidad de rotación para liberar al muro de los momentos que le pueden transmitir la losa y considerar en el diseño que el muro está sujeto a carga vertical únicamente. En pruebas de laboratorio de uniones muro-losta a flexión se ha comprobado que la rotación de los extremos de la losa produce aplastamientos locales del mortero permitiendo la libre rotación de la losa y que por tanto los momentos flexionantes que se transmiten a los muros son

mínimos. Sin embargo, deben tomarse en cuenta en el diseño los momentos en el muro que no pueden ser redistribuidos por la rotación de unión con la losa, como los debidos a flexiones en el plano del muro, o a voladizos empotrados en el mismo; también hay que considerar los momentos debido a la excentricidad con que se aplica la carga vertical. El que los muros permitan el libre giro de la losa que confinan, implica que la carga que ésta le transmite a los muros no será axial; la fórmula que propone el Reglamento del Departamento del Distrito Federal para tomar en cuenta este efecto supone que la distribución de esfuerzos producidos por la carga es lineal, siendo el esfuerzo nulo en el punto donde comienza la losa ver fig. 5.1 . Solo hay que considerar esta excentricidad para la carga transmitida por la losa que descansa directamente sobre el muro; para la carga que baja de los niveles superiores puede considerarse que la excentricidad es nula excepto cuando estos se encuentren fuera de eje, ver fig. 5.2 .

Para efectuar el análisis por cargas laterales, se considera conveniente que la rigidez de los muros se calcule tomando en cuenta que se incluyan tanto deformaciones por flexión como por cortante, que se tome el módulo de elasticidad correspondiente a cargas de corta duración, y que para el cálculo del momento de inercia se considere que se forman secciones, T, L, C o I en las intersecciones entre muros; más adelante se proporcionan lineamientos a seguir para determinar el ancho de los patines. Para el cálculo de la resistencia al cortante, el área del muro será

la correspondiente al alma, sin considerar los patines.

## 5.2 Dimensionamiento

Para el dimensionamiento de muros de mampostería los reglamentos nacionales proponen el empleo de dos métodos: uno denominado "simplificado" que se utilizará cuando se cumplen ciertos requisitos de estructuración, y otro denominado "método detallado" que se empleará cuando se requiera de mayor precisión en los cálculos o cuando no se cumplan los requisitos para aplicar el método simplificado.

### 5.2.1 Método simplificado

Los muros a los que se aplique el método simplificado deberán cumplir las siguientes condiciones:

- a) Los materiales cumplen las normas de calidades establecidos por la Dirección General de Normas.
- b) Las deformaciones en los extremos superior e inferior del muro en la dirección normal al plano de éste, están restringidas por el sistema de piso o por otros elementos.
- c) No hay excentricidades importantes en la carga axial aplicada, como las que pueden ser debidas a falta de alineamientos de muros de pisos superiores o a la existencia de voladizos que transmitan su momento al muro.
- d) La relación altura a espesor del muro no excede de 20.

e) Se cumplen las condiciones de armado mínimo mencionadas anteriormente

Estos requisitos que se imponen para aplicar el método simplificado tienden a evitar situaciones que puedan dar lugar a la presencia de momentos flexionantes importantes o a efectos de esbeltez en los muros. Por tanto, si se cumplen las condiciones a -- que este párrafo se refiere, no es necesario hacer un análisis -- tomando en cuenta los momentos y excentricidades; basta simple-- mente con determinar las cargas verticales sobre cada muro a par-- tir de su área tributaria.

Para el análisis por sismo de estas estructuras, en general será aplicable el método simplificado de diseño sísmico que presentan los Reglamentos Nacionales, por ejemplo ver ref. 3, según el -- cual tampoco se requiere de un análisis por carga lateral de la estructura cuando se cumplen ciertas condiciones de altura y dis-- tribución de los muros.

#### Resistencia de muros a cargas verticales

El diseño por cargas verticales se basa en la comprobación de -- que la carga actuante sobre cada muro sea menor o igual a la car-- ga resistente, obtenida al multiplicar el esfuerzo resistente en compresión de la mampostería por el área de la sección transversal del muro y por un coeficiente reductivo que toma en cuenta -- la esbeltez y excentricidad en el muro. Este coeficiente se de-

terminó considerando la esbeltez máxima permitida para el muro -- (20) y una excentricidad accidental para los muros interiores -- más una excentricidad debida a la asimetría de la carga para mu-- ros extremos. La expresión aplicable es

$$P_R = F_R F_E f_m^* A_\tau$$

donde:

$A_\tau$  área transversal bruta del muro

$f_m^*$  resistencia de diseño en compresión de la mampostería

$F_R$  factor de reducción de la resistencia; se tomará como 0.6

$F_E$  factor reductivo por excentricidad y esbeltez que se tomará como 0.7 para muros interiores que soporten claros aproximadamente simétricos en ambos lados y como 0.6 para muros ex-- tremos o con claros asimétricos, y para casos en que la rela-- ción carga viva a carga muerta de diseño excede de uno. Pa-- ra muros que estén ligados a muros transversales con una se-- paración no mayor de 3 m, los valores de  $c$  se tomarán como -- 0.8 y 0.7, respectivamente.

La carga actuante con la cual deberá compararse la resistencia -- del muro será la debida a las cargas verticales multiplicada por el factor de carga especificado por el Reglamento (1.4 en gene-- ral).

La fórmula para el cálculo de la resistencia a compresión está --

afectada por el factor de reducción de resistencia,  $F_R$ , que toma en cuenta las incertidumbres en la predicción del índice de resistencia de la mampostería, así como la aproximación de la fórmula. Este factor ha sido determinado con el criterio de que la confiabilidad de estas estructuras sea similar a la que se obtiene en el diseño de estructuras de concreto y acero. Se ha fijado para este factor un valor de 0.6 válido únicamente para muros reforzados con castillos y dadas o con refuerzo interior.

#### Resistencia de muros a cargas laterales

Hay que recordar que el empleo del método simplificado se restringe a muros que tengan una cantidad mínima de refuerzo interior, o de castillos y dadas, para asegurar una ductilidad razonable cuando se llegue al agrietamiento ante efectos sísmicos. Para muros que no cumplan esos requisitos será necesario el empleo del método detallado de diseño.

La fuerza cortante resistente se calculará como

$$V_V = F_R (0.7 v^* A_T)$$

El significado de cada término ya se ha mencionado con anterioridad. Si el muro tiene refuerzo interior, o dadas y castillos que cumplen con los requisitos de refuerzo antes establecidos,  $v^*$  se tomará de la tabla 3.4. Para muros con refuerzo interior se podrá tomar como valor de diseño a cortante de la mampostería

1.5 veces el establecido en dicha tabla.

La fuerza cortante resistente así calculada se deberá comparar con la fuerza actuante, ver ref. 3.

En el diseño por cargas laterales deberá revisarse no solo el efecto de las fuerzas cortantes sino también el de los momentos flexionantes que producen dichas cargas laterales. Puede requerirse refuerzo adicional en los extremos del muro para resistir dichos momentos; el cálculo se basará en los criterios generales de flexocompresión que se especificarán cuando se vea el método detallado de diseño.

#### 5.2.2 Método detallado de diseño

Este método se utilizará cuando se desea hacer un análisis más refinado o cuando no se cumplen los requisitos para aplicar el método simplificado.

Aquí se plantea un criterio general para llevar a cabo un diseño racional de elementos de mampostería ante diferentes estados de carga. Este procedimiento de diseño no solo es aplicable a muros reforzados con castillos y dadas o con refuerzo interior, como en el método simplificado, sino también para muros diafragma y muros no reforzados.

## Resistencia a cargas verticales

La carga vertical que resiste un muro dependerá de la relación de esbeltez del mismo, de la excentricidad con que se aplica la carga y de las restricciones a sus deformaciones laterales. El valor de diseño de la carga axial resistente se calcula como:

$$P_R = F_R F_E f_m^* A_T$$

donde

- $F_R$  se tomará como 0.6 para muros confinados o reforzados interiormente y como 0.3 para muros no reforzados.  
 $P_R$  es la carga vertical total resistente de diseño.  
 $A_T$  el área de la sección transversal del muro.  
 $f_m^*$  la resistencia nominal de diseño en compresión de la mampostería  
 $F_E$  un factor de reducción por excentricidad y esbeltez

La diferencia con respecto al método simplificado es que ahora el coeficiente  $F_E$ , que toma en cuenta la excentricidad y la esbeltez en el muro, debe calcularse para cada caso. Además, se incluye el caso de muros no reforzados para los cuales el factor de reducción se tomará de la mitad que para muros reforzados, esto por el carácter totalmente frágil de la falla en este caso y al hecho de que la resistencia de estos muros es mucho más sensible a excentricidades accidentales y defectos constructivos.

El factor  $F_E$  se calculará como

$$F_E = 1 - 2 e'/t$$

siendo  $t$  el espesor del muro y

$$e' = F_a (e_c + e_a)$$

$e_c$  y  $e_a$  son las excentricidades calculada y accidental, respectivamente,  $F_a$  es un factor de incremento de la excentricidad por efecto de esbeltez. Estos parámetros se calculan en la forma como se verá más adelante.

El procedimiento propuesto para el cálculo del parámetro  $F_E$  se basa en el empleo de una excentricidad de la carga axial corregida por efectos de excentricidades accidentales y por efectos de esbeltez. La expresión propuesta supone un comportamiento rígido-plástico para la mampostería en compresión, con lo cual se predice en cargas resistentes cercanas a las obtenidas experimentalmente.

## Cálculo de la excentricidad de la carga vertical

La excentricidad total se determinará tomando en cuenta la excentricidad calculada,  $e_c$ , más una accidental,  $e_a$ . La excentricidad calculada es la que resulta de las cargas actuantes; mientras que la excentricidad accidental dependerá de la uniformidad de las di



mensiones de las piezas y se calculará con la fórmula

$$e_a = K(t + \frac{H}{10})$$

El coeficiente K se tomará como 1/50 para piezas cuyas dimensiones no difieren en más de un 3% de los nominales y 1/30 cuando no se cumpla lo anterior.

Las recomendaciones para la excentricidad accidental se basan en algunas mediciones poco significativas y en la suposición de que la excentricidad accidental de un muro debe incrementarse con su espesor y altura.

En la fórmula propuesta se supone que la excentricidad aumenta linealmente con estas dos variables de acuerdo con un coeficiente de proporcionalidad que depende de la regularidad de las medidas de las piezas.

Incremento de la excentricidad por el efecto de esbeltez

El factor de incremento,  $F_a$ , se obtendrá como

$$F_a = \frac{C_m}{1 - \frac{u}{c}} \geq 1$$

siendo

$P_u$  la carga vertical actuante de diseño y

$$C_m = 0.6 + 0.4 \frac{e_{c1}}{e_{c2}} \geq 0.4$$

donde

$e_{c1}$  y  $e_{c2}$ , respectivamente, la menor y mayor de las excentricidades calculadas en los extremos del muro; el cociente  $e_{c1}/e_{c2}$  se considera positivo cuando el muro se flexiona en curvatura simple y negativo cuando lo hace en curvatura doble; al considerar la excentricidad accidental únicamente ante el efecto de cargas laterales uniformemente distribuidas,  $C_m$  se tomará igual a 1.

$P_c$  es la carga crítica de pandeo que se obtendrá como

$$P_c = \frac{\pi^2 EI}{H'^2}$$

siendo

I el momento de inercia de la sección bruta dividido entre 2.5

$H'$  la altura efectiva del muro que se determinará a partir de la altura no restringida, H, según el criterio siguiente:

$H' = 2H$ , para muros libres en uno de sus extremos

$H' = 0.75 H$  para muros limitados por dos losas continuas

$H' = H$  para muros extremos en que se apoyan losas

El cálculo del factor  $F_a$  implica que la altura real no soportada del muro debe transformarse en sus extremos; el cálculo del factor mencionado se efectúa de manera similar que para elementos - de concreto o acero. Este criterio ha sido comprobado por un número considerable de pruebas de laboratorio, donde se ha llegado a predecir con buena aproximación la resistencia de muros con carga excéntrica.

Cuando existan muros transversales que intersectan al considerado, podrá considerarse, para el cálculo de las propiedades del muro, que se forman secciones T o I para las que el ancho efectivo de los patines no excederá de una sexta parte de la altura -- del muro arriba del nivel que ese está analizando, ni de doce veces el espesor del muro. Cuando se formen en las intersecciones secciones L o C, el ancho del patín será de 1/16 de la altura de muro arriba del nivel que se está analizando o seis veces el espesor del muro. Se toma en cuenta la sección agrietada reduciendo el momento de inercia de la sección bruta.

Efecto de las restricciones a las deformaciones laterales.

En caso de que los extremos del muro en consideración estén ligados a muros transversales, o a contrafuertes que restrinjan su deformación lateral, el efecto de esbeltez en el muro se reducirá y la resistencia se calculará como sigue:

$$P_R = P_L + (P_C - P_L)B$$

donde:

$P_C$  resistencia de diseño calculada sin tomar en cuenta los efectos de esbeltez ( $F_a = 1.0$ )

$P_L$  resistencia calculada considerando efectos de esbeltez  
( $P_L = F_R F_E F_m A_T$ )

B coeficiente correctivo que depende de la separación de los elementos rigidizantes,  $L'$ , y que se obtiene de la tabla siguiente

$L'/h$	1.5	1.75	2.0	2.5	3.0	4.0	5.0
B	0.7	0.6	0.5	0.4	0.33	0.25	0.20

Los muros transversales se considerarán efectivos para restringir el desplazamiento lateral solo cuando su longitud sea seis o más veces el espesor del muro que rigidizan.

El procedimiento de cálculo supone que el muro tiene libertad de deformarse lateralmente en toda su longitud; sin embargo, la presencia de muros transversales restringe dichas deformaciones laterales del muro, haciendo que éste aumente su resistencia.

Contribución del refuerzo ante cargas verticales

La contribución de los castillos a la resistencia de muros a carga axial es relativamente pequeña a menos que su espaciamiento sea muy reducido porque la función principal de los castillos es proporcionar confinamiento y liga a los muros; sin embargo, el Regla-

mento del D.D.F. permite incrementar en 4 kg/cm<sup>2</sup> el esfuerzo a -- carga axial si el refuerzo cumple con lo antes establecido. En -- lo que respecta al refuerzo interior, su contribución a la resistencia a carga axial se toma en cuenta incrementando en 50 por -- ciento, pero no más de 15 kg/cm<sup>2</sup>, el esfuerzo resistente de la -- mampostería sin refuerzo; siempre que la cantidad de refuerzo cumpla con los requisitos mínimos.

Para la capacidad ante carga vertical excéntrica, se considerará el efecto del refuerzo interior si este tiene una separación máxima no mayor que seis veces el espesor del muro. El cálculo se -- realizará con el criterio de resistencia en flexocompresión que -- se especifica para concreto reforzado, y con base en la hipótesis siguientes:

- a) La distribución de deformaciones unitarias longitudinales en la sección transversal de un elemento es plana
- b) Los esfuerzos de tensión son resistidos por el refuerzo
- c) Existe adherencia perfecta entre el refuerzo y el concreto o mortero que lo rodea
- d) La sección falla cuando se alcanza, en la mampostería, la deformación unitaria máxima a compresión que se tomará igual a 0.003
- e) A menos que ensayos en pilas permitan obtener mejor determinación de la curva esfuerzo-deformación de la mampostería, -- ésta se supondrá lineal hasta la falla.

Los efectos de esbeltez se tomarán en cuenta incrementando la excentricidad de la carga en la misma forma que para muros no reforzados.

#### Resistencia a cargas laterales

La resistencia a cargas laterales de un muro deberá revisarse para el efecto de la fuerza cortante, del momento flexionante en su plano y eventualmente también de momentos flexionantes debidos a empujes normales a su plano.

#### Fuerza cortante resistida por la mampostería

La fuerza cortante resistente de diseño se determinará como:

- a) Para muros diafragma

$$V_R = F_R(0.85v \cdot A_T)$$

- b) Para otros muros

$$V_R = F_R(0.5v \cdot A_T + 0.3P) \geq 1.5 F_R v \cdot A_T$$

donde

P es la carga vertical que actúa sobre el muro, sin multipli-

car por el factor de carga.

Para muros con refuerzo interior  $v^*$  se tomará como 1.5 veces el valor medido en los ensayos para mampostería sin refuerzo o el --consignado en la tabla 3.4 .

El factor de reducción de resistencia,  $F_R$ , valdrá

- 0.6 para muros diafragma, muros confinados y muros con refuerzo interior que cumplan con los requisitos establecidos
- 0.3 para muros no reforzados

Los coeficientes que afectan al esfuerzo cortante de diseño en -- las fórmulas presentadas en este párrafo (0.85 para muros diafragma y 0.5 para otros muros), se han obtenido de la relación entre la resistencia medida en los ensayos de muretes y la de los ensayos de muros a escala natural que reproducen las formas de estructuración mencionadas.

El incremento de la resistencia al corte por la acción de la carga vertical actuante se ha valuado teóricamente y comprobado experimentalmente, siendo el valor 0.3 P una aproximación conservadora de los resultados obtenidos.

Otra forma de calcular la capacidad a cortante considerando la -- carga axial es

$$V_R = F_R 0.5v^*A_T \sqrt{1 + \frac{P/A_T}{(0.5v^*)}} < 1.5 F_R v^*A_T; P/A_T < 5$$

el valor del radical es lo que aumenta la resistencia a cortante debido a la carga axial. Esta forma de calcular el incremento a cortante debido a la carga axial ha sido empleada con buenos resultados para mampostería; expresiones similares se han utilizado con éxito para calcular la capacidad a cortante en muros de concreto reforzado.

Contribución del refuerzo a la resistencia a cortante

Se ha comprobado que las dalas y castillos que confinan los muros no contribuyen significativamente a la resistencia ya que su función es proporcionar ductilidad al muro. En cuanto al efecto del refuerzo colado en el interior de los huecos de las piezas, éste se toma en cuenta permitiendo, para muros con refuerzo que cumplen con los requisitos mínimos estipulados, un aumento del 50 por --- ciento en el esfuerzo cortante de diseño dado en la tabla 3.4. - No se ha incluido en el 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, ya 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:

$$V_R = K_1 (V_h + V_{cast}) + v_f A_m$$

donde  $v_f$  es el esfuerzo promedio que puede desarrollarse por fricción y  $A_m$  el área transversal bruta del muro; la constante  $K$  toma en cuenta lo expresado en el párrafo anterior. La contribución de la fricción en la resistencia se supondrá independientemente del tipo de material, mortero y refuerzo que forman

al muro.

La constante  $K$  y el esfuerzo debido a la fricción  $v_f$  se determinan a partir de los datos experimentales, resultando

$$V_R = 0.34 (V_h + V_{cast}) + A_T \quad (1)$$

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  $A_c \sqrt{f'_c}$  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

se observa que la fricción contribuye a la resistencia con un esfuerzo promedio de  $1 \text{ kg/cm}^2$ , 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 alteraciones 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  $2.3 \text{ kg/cm}^2$ , y el muro tenga un área de  $2290 \text{ cm}^2$ , 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  $12 \times 14 \text{ cm}$ ; se utilizará para los estribos alambra<sup>o</sup> N° 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  $5/32 \text{ pulg.}$  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

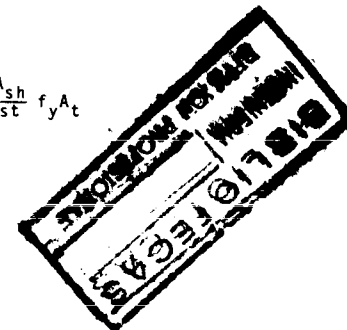
$$s = \frac{2 \times 0.32 \times 2500 \times 12}{4382} = 4.4 \text{ cm}$$

$$s = 10 \text{ cm si } f_y = 6000 \text{ kg/cm}^2$$

Estos estribos se colocarán en las partes extremas de los castillos en una longitud de  $40 \text{ cm}$  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

$$V_h = 8760 \text{ kg} = \frac{A_s h}{s t} f_y A_t$$



$$A_{sh} = 8760 \frac{st}{f_y A_t}$$

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, que los estribos N°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 alambón N° 2 espaciados a cada 2.5 cm, 7 cm en caso de usar alambón 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 re-

sistencia) 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 párrafo 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  $3.4 \text{ kg/cm}^2$ , 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 anteriormente.

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.

Para flexión simple, el momento resistente se calculará como

$$M_0 = F_R A_s f_y d'$$

donde

$A_s$  es el área de acero colocada en el extremo 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.

$$M_R = M_0 + 0.30 P_u d' ; \text{ si } P_u \leq \frac{P_R}{3}$$

$$M_R = (1.5M_0 + 0.15 P_R d') \left(1 - \frac{P_u}{P_R}\right) ; \text{ si } P_u > \frac{P_R}{3}$$

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.



## REFERENCIAS.

1. Hernández O., Meli R., y Padilla M, "Refuerzo de Vivienda - Rural en Zonas Sísmicas", Reporte de Investigación, Instituto de Ingeniería UNAM, (1979).
2. Meli R., Hernández O. "Efectos de Hundimientos Diferenciales en Construcciones a Base de Muros de Mampostería", Informe No. 350, Instituto de Ingeniería UNAM (1975).
3. "Diseño por Sismo" Versión Preliminar Elaborada por el Instituto de Investigaciones Eléctricas para Comisión Federal de Electricidad, México (1979).
4. Hernández O., Meli R., "Modalidades de Refuerzo para Mejorar el Comportamiento Sísmico de Muros de Mampostería", Informe No. 382, Instituto de Ingeniería UNAM. (1976).

TABLA 2.1. Resistencia a compresión y a tensión por flexión de adobes

PROCEDENCIA	COMPRESION kg/cm <sup>2</sup>	TENSION kg/cm <sup>2</sup>
Chiapas	16	2.0
Chiapas	9.9	-
Chiapas	7.9	4.0
Guatemala	9.1	-
Guerrero	8.1	3.0
Guerrero	5.2	4.4
Oaxaca	9.3	-
Oaxaca	13.5	2.0
Valor medio	9.9	3.1
Coef. de Var.	0.34	0.36

TABLA 2.2. VALORES DE DISEÑO PARA ADOBES

Resistencia a compresión	6 Kg/cm <sup>2</sup>
Resistencia a tensión por flexión	2 Kg/cm <sup>2</sup>
Resistencia a cortante	0.8 Kg/cm <sup>2</sup>

TABLA 2.3 RESULTADOS DE ENSAYES EN PIEZAS

Material	Geometría *	Procedencia	Clasificación	An/Ab	f <sub>p</sub> , en kg/cm <sup>2</sup> (1)				C, en porcentaje				Abs. en porcentaje	(2) γ <sub>s</sub> , 3 <sup>o</sup> ton/m <sup>3</sup>	
					Etapa I	Etapa II	Etapa III	Etapa IV	Etapa I	Etapa II	Etapa III	Etapa IV			
Tabique rojo recocido		T 1	B	1.00	52	64	56	58	26	23	24	19	20	1.45	
		T 2	C	1.00	52				29					24	1.37
		T 3	C	1.00	51				34					25	1.37
		T 4	B	1.00	114	112	109		34	25	23			21	1.55
		T 5	C	1.00	80				21	17				25	1.38
		T 6	C	1.00	85	109			23	52				21	1.50
		T 7	C	1.00	93	76	66	88	58	19	24	11		25	1.45
		T 8	C	1.00	33				32					26	1.34
		T 9	C	1.00	53				45					26	1.40
		T 10	C	1.00	45	43	47	55	28	22	10	21		26	1.40
		T 11	C	1.00	36	45	51	45	32	28	20	28		27	1.31
tabique extruido perforado verticalmente		TE1	A	0.57	215	226			8	11			16	1.79	
		TE2	A	0.63	428	361	394	295	14	25	20	15	10	1.98	
		TE3	B	0.69	225				17					19	1.65
		TE4	B	0.59	181	156			16	15				17	1.75
		TE2	A	0.67	376	308	365	329	11	15	16	15	12	1.85	
		TE3	B	0.59	169				24					20	1.61
		TE5	A	0.65	486	473	575	540	21	19	15	20	4	2.06	
		TE1	A	0.57	129	143			15	15				17	1.66
		TE5	A	0.59	426	400			26	11				6	2.20
		TE4	B	0.65	417	417			12	12				7	2.02
		TE5	A	0.61	489	466	572	519	22	16	18	15	5	2.13	
Tabique extruido macizo		TE1	A	1.00	454	375			13	15			16	1.73	
		TE5	A	1.00	890	905			14	8			5	2.05	

f<sub>p</sub> resistencia promedio de la pieza

C coeficiente de variación

γ<sub>s</sub> peso volumétrico seco

\* Medidas nominales

(1) sobre área bruta medida

(2) sobre volumen neto

25

TABLA 2.4 RESULTADOS DE ENSAYES EN PIEZAS

Material	Geometría *	Procedencia	Clasificación	An/Ab	f <sub>p</sub> , en kg/cm <sup>2</sup> (1)				C, en porcentaje				Abs. en porcentaje	(2) γ <sub>s</sub> , en ton/m <sup>3</sup>
					Etapa I	Etapa II	Etapa III	Etapa IV	Etapa I	Etapa II	Etapa III	Etapa IV		
Tabique extruido, huecos horizontales		TE 1	A	1.00	77				13				17	1.32
		TE 4	B	1.00	75				18				15	1.25
		TE 1	A	1.00		79				39			16	1.78
		TE 4	B	1.00	56	49			21	16			16	1.69
Bloque ligero		B	A	0.56	37	35			10	12			29	1.21
		B	A	0.59	42	49			16	12			35	1.09
		B	A	0.63	43	41			24	22			24	1.23
		B	B	0.54	17				23				33	1.01
		B **	A	1.00	44	42			17	26			40	0.95
Bloque intermedio		B	A	0.56	62	77			24	7			15	1.61
		B	A	0.59	41	74			14	14			21	1.50
		B	A	0.61	82	80			28	21			15	1.70
		B	B	0.54	21				20				27	1.32
		B	C	0.59	40				18				16	1.45
Bloque pesado		B	A	0.55	135	101			31	15			9	2.12
		B	A	0.59	146	143	132	108	23	10	28	7	11	2.15
		B	A	0.63	100	128	104	81	20	21	20	15	10	2.09
		B	B	0.54	74				13				14	1.79
Tabicón		TC 1	B	1.00	31	65	68	42	24	14	11	15	25	1.45
		TC 2	A	1.00	76	123		101	35	34			27	1.42
		TC 3	B	1.00	59	63			23	27			19	1.42
		TC 4	B	1.00	36				23				28	1.05
		TC 5	C	1.00	48	56			36	22			16	1.60
Sílico calcáreo	7x12x24	6	A	1.00	201	177			15	11			15	1.79

A Fábrica grande y adecuado control de calidad

B Fábrica mediana y nulo control de calidad

C Fábrica rudimentaria \*\* Bloque macizo

An/Ab Relación de área neta sobre área bruta

TABLA 2.5 PROPORCIONAMIENTOS RECOMENDADOS PARA MORTEROS EN ELEMENTOS ESTRUCTURALES

Tipo de mortero	Partes de cemento	Partes de cemento de alfafeileria	Partes de cal	Partes de arena	f <sub>E</sub> en kg/cm <sup>3</sup>
I	1	—	0 a 1/4	No menos de 2,25 ni más de 3 veces la suma de cementantes en volumen.	125
ii	1	0 a 1/2	—		
III	1	1/2 a 1	1/4 a 1/2		
IV	1	—	1/2 a 1 1/4		
IV	—	1	1 1/2 a 2		

No se admite en zona sísmica C y D.

TABLA 3.1 RESISTENCIA NOMINAL A COMPRESION PARA piezas de barro y otros materiales, excepto concreto, con relación altura a espesor mayor a un medio y para los morteros recomendados, se tendrán las siguientes resistencias de diseño de la mampostería (tabla 5)

TABLA 5

f* <sub>p</sub> en kg/cm <sup>2</sup>	f* <sub>m</sub> en kg/cm <sup>2</sup>			
	MORTERO			
	I	II	III	IV
25	10	10	10	10
50	20	20	20	15
75	30	30	25	20
100	40	40	30	25
150	60	60	40	30
200	80	70	50	35
300	120	90	70	55
400	140	110	90	75
500	160	130	110	95

Para valores intermedios se interpolará linealmente.

TABLA 3.2 RESISTENCIA NOMINAL A COMPRESION PARA bloques y tabiques de concreto con relación altura a espesor mayor que un medio, y donde f\*<sub>p</sub> ≤ 200 kg/cm<sup>2</sup> la resistencia de diseño a compresión de la mampostería será la que indica la tabla 4.

TABLA 4

f* <sub>p</sub> en kg/cm <sup>2</sup>	f* <sub>m</sub> en kg/cm <sup>2</sup>			
	MORTERO			
	I	II	III	IV
25	15	10	10	10
50	25	20	20	20
75	40	35	30	25
100	50	45	40	35
150	75	60	60	55
200	100	90	80	75

Para valores intermedios se interpolará linealmente.

TABLA 3.3 RESISTENCIA NOMINAL A COMPRESION PARA ALGUNOS TIPOS DE PIEZAS

MORTERO Tipo de pieza	f* <sub>m</sub> en kg/cm <sup>2</sup>			
	I	II	III	IV
Tabique de barro recocido	15	15	15	15
Bloque de concreto tipo pesado*	20	15	15	10
Tabicón de concreto con arena sílica	20	15	15	10
Tabique extruido + huecos verticales	40	40	30	20

Resistencia sobre área bruta + f\*<sub>p</sub> ≥ 120 kg/cm<sup>2</sup> la relación área neta a total será mayor de 0.5

TABLA 3.4 RESISTENCIA NOMINAL A CORTANTE PARA ALGUNOS TIPOS DE PIEZAS

Tipo de pieza	Mortero	v* en kg/cm <sup>2</sup>	
Tabique de barro recocido	I	3.5	
	II a IV	3.0	
Tabique extruido de barro	Rejilla	I	3.5
		II y III	3.0
	Perforado vertical	IV	2.5
		I	2.5
II a IV	1.5		
Bloque de concreto tipo pesado	I	3.5	
	II a IV	2.0	
Sílico-calcareo	I	4.0	
	II a IV	3.0	

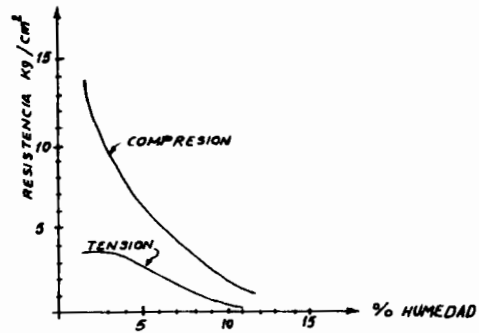


FIG. 1.1 Variación de la resistencia del adobe con el contenido de humedad.

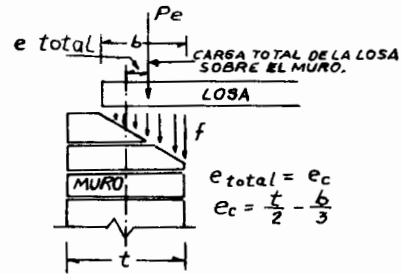


Fig. 5.1 Cálculo de la excentricidad de la carga.

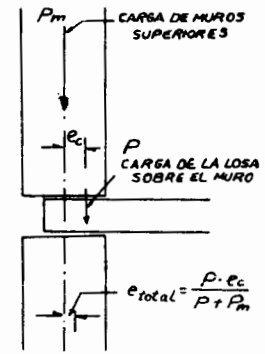


Fig. 5.2 Cálculo de la excentricidad en un entrepiso.

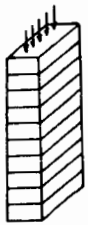


Fig. 3.1 Ensayo de compresión en pila.

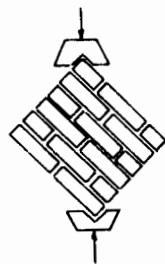


Fig. 3.2 Ensayo de cortante en murete.

1  
2  
3  
4  
5  
6  
7  
8  
9  
10  
11  
12  
13  
14  
15  
16  
17  
18  
19  
20  
21  
22  
23  
24  
25  
26  
27  
28  
29  
30  
31  
32  
33  
34  
35  
36  
37  
38  
39  
40  
41  
42  
43  
44  
45  
46  
47  
48  
49  
50  
51  
52  
53  
54  
55  
56  
57  
58  
59  
60  
61  
62  
63  
64  
65  
66  
67  
68  
69  
70  
71  
72  
73  
74  
75  
76  
77  
78  
79  
80  
81  
82  
83  
84  
85  
86  
87  
88  
89  
90  
91  
92  
93  
94  
95  
96  
97  
98  
99  
100

## COMPORTAMIENTO

## 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.....<sup>3</sup>Un 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.<sup>4</sup> 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.

\* Profesor, Facultad de Ingeniería, UNAM

Se fabrican comercialmente en México tabiques de barro extruido con resistencia de  $400 \text{ kg/cm}^2$  o superior y bloques de concreto en los que pueden lograrse resistencias sobre área bruta superiores a los  $200 \text{ kg/cm}^2$ . Con materiales semejantes en zonas 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-

tencia en torsión 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, de las construcciones de mampos.

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 leño 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 cuatraperío 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 de 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 dadas 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 dadas 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 MAMPOSTERÍA

El diseño de estructuras de mampostería había estado, hasta hace poco tiempo, basado en consideraciones empíricas sin aplicarle en forma racional los prin-

cipios ingenieriles. Ultimamente se han efectuado análisis razonables para predecir la resistencia de mamposterías bajo diferentes solicitaciones 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 ensayo en muretes, fig 3, se emplea para determinar el esfuerzo cortante resistente en esta prueba se aplica al espécimen una carga diagonal que le 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 solicitaciones

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 limitados 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; confi  
namiento; cuantía y disposición del refuerzo; relación altura a longitud; la carga vertical sobre el muro y en ciertos caso el aplanado que se colo  
ca en una o en ambas caras del muro.

Se puede alcanzar gran capacidad de deformación para valores altos de la relación altura a longitud, bajas cargas axiales y poca cantidad de re-  
fuerzo vertical en los extremos del muro. Reduciendo la relación de as-  
pecto 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 cortan-  
te es indicativo de la máxima capacidad de la mampostería, porque el prime  
ro solo indica que se tiene un mortero de baja calidad.

Tanto para flexión como por cortante el comportamiento observado ante alter-  
naciones 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 alterna-  
ciones de carga, siendo mayor para el casos de cortante; también se diferen-  
cia la forma de los ciclos histeréticos, ya que para cuando predomina la fle  
xión 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 mues  
tra 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 tie  
ne presente en la realidad durante un sismo.

En mbos tipos de fallas, flexión o cortante, se presentan aplastamientos  
y desprendimientos locales en los extremos de los muros para etapas cerca-  
nas a la falla, dichos aplastamientos son debidos a la gran expansión late-  
ral que tiene el mortero para altos niveles de esfuerzo, lo que produce

tensiones en las piezas. En diversos países se evita lo anterior co  
locando 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 re  
sultados, aún en mamposterías de piezas huecas, es colocar varilla corruga-  
da de pequeño diámetro (5/32") en las juntas de mortero, este refuerzo tam-  
bién 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 Scri-  
vener, 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 aque-  
llos ensayados bajo condiciones dinámicas; sin embargo, en aquellos que fa-  
llaron por flexión, los ensayados dinámicamente se comportaron menos satis-  
factoriamente que los estáticos equivalentes. Esto último es debido por el  
movimiento violento en el caso dinámico se pierde más rápidamente el mate-  
rial 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 bá-  
sicamente proporcionada por la mampostería.

También se ha observado que es más eficiente para soportar fuerzas cortantes el refuerzo horizontal colocado en las juntas y distribuida 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 ha hecho 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 críticas; y el ensaye de compresión diagonal, fig 7b donde solo se inducen deformaciones por cortante. El efecto de pisos superiores se

representa con 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 este el deterioro depende de la resistencia del marco confinante. El material hue

co es más 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.

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 cortante 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 dadas 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 dadas 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.

En la parte correspondiente a Diseño de Estructuras de Mampostería se verá con detalle distintos procedimientos para calcular la capacidad de las mamposterías, a continuación se proporciona un panorama general de como debe calcularse la resistencia.

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  $P_R = F_R F_E f_m^* A_T$ , 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 procedimiento 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 las notas 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 las notas sobre diseño de estructuras de mampostería.

## 5. OTROS TÓPICOS SOBRE MAMPOSTERÍA

### 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 con 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 las 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 ligadura 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 aplanoado 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 junteado 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 galinero) 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 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,

604031

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 reestructuración 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-

tillos y su anclaje con la cimentación y con los sistemas de techo y de piso.

Aquí se tratarán únicamente los procedimientos para reparar o reforzar los muros de mampostería.

La forma más común de reparar un muro grietado diagonalmente es abriendo una franja en correspondencia con la grieta y rellenándola con mortero. Si se emplea un mortero de cemento, los ensayos demuestran que este procedimiento no permite recuperar la resistencia y rigidez originales fig 16a. Si se emplea un mortero con un aditivo que produzca alta adherencia y estabilización de volumen, se logra restaurar prácticamente la resistencia original, como se demuestra en el ensayo mostrado en fig 16b. Para la reparación de castillos y dalas dañados se deben emplear los procedimientos usuales para estructuras de concreto: inyección de grietas si estas son pequeñas o remoción del concreto en la zona dañada y colado con un aditivo estabilizador de volumen.

Si se quiere incrementar la resistencia del muro, la forma más conveniente es la colocación de una malla de refuerzo en ambas caras cubierta con un reparado la grieta con mortero común o con aditivo. Una estimación del costo de este tipo de reparación indica que este es del orden de una tercera parte del costo que implicaría reconstruir el muro original. El mortero de fibra de vidrio descrito anteriormente también puede emplearse para reparar y reforzar muros agrietados; su eficiencia se aprecia en la fig 16c.

## 6. RESUMEN

Como resumen en los expuesto con anterioridad se puede decir que el esta-

do actual de conocimientos acerca del diseño de mampostería ante diversas solicitaciones 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 y 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 implica 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 poco dúctiles, deben diseñarse para fuerzas mucho mayores que las que corresponden, por ejemplo, a una estructura a base de muros 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 que se deteriora rápidamente con el tiempo. Se usan además procedimientos constructivos que no permiten una buena liga de los muros entre sí y con el techo. La opción de estas formas constructivas se debe, en la mayoría de los casos, a la falta de recursos económicos que hace que solo se puedan emplear materiales que se obtienen prácticamente sin costo en el lugar y solo permite el empleo de procedimientos que puedan ser realizados por los mismos habitantes. 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, M., Bridgemen, 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", Procc. 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)

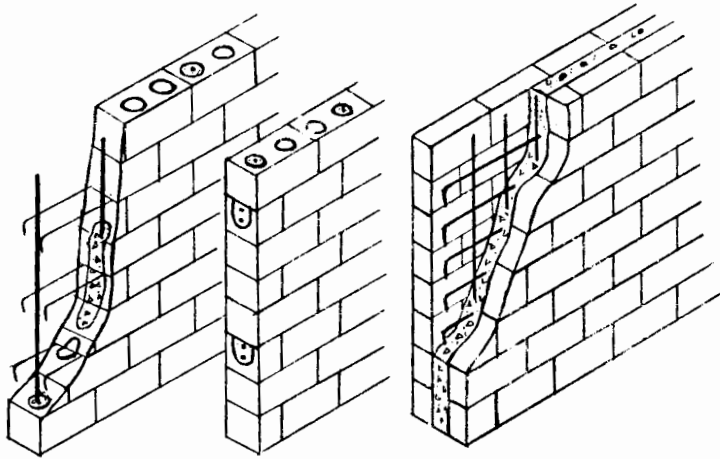


Fig 1 Diferentes formas de colocar refuerzo interior

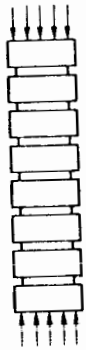


Fig 2 Ensayo de compresión en pila

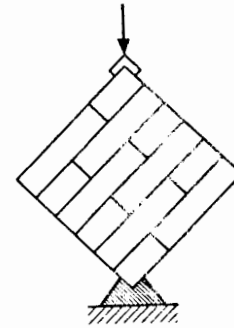


Fig 3 Ensayo de compresión diagonal

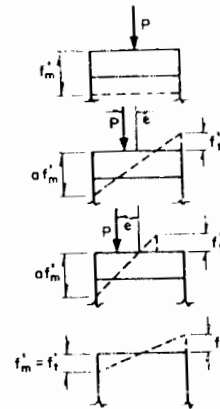


Fig 4 Distintas distribuciones de esfuerzos para carga axial y flexión

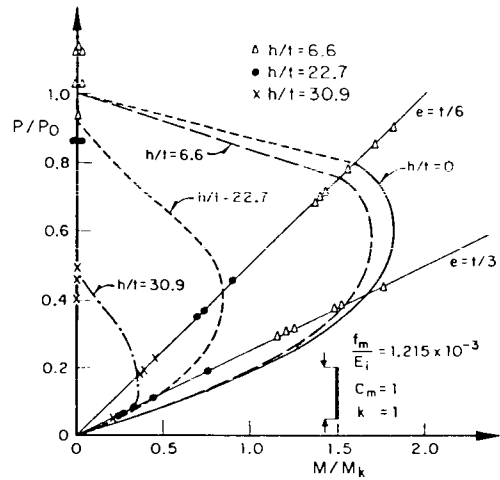


Fig 5 Diagrama de interacción en flexocompresión. Efecto de la relación de esbeltez

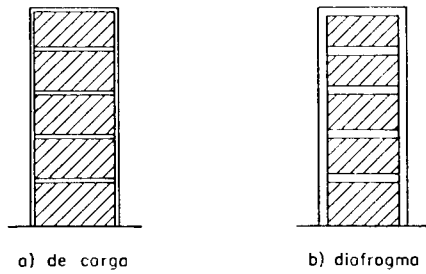


Fig 6 Estructuración a base de muros

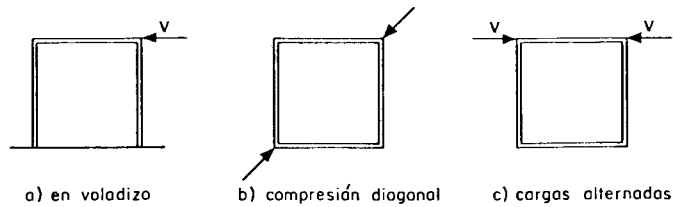


Fig 7 Diversas formas de ensayos de muros

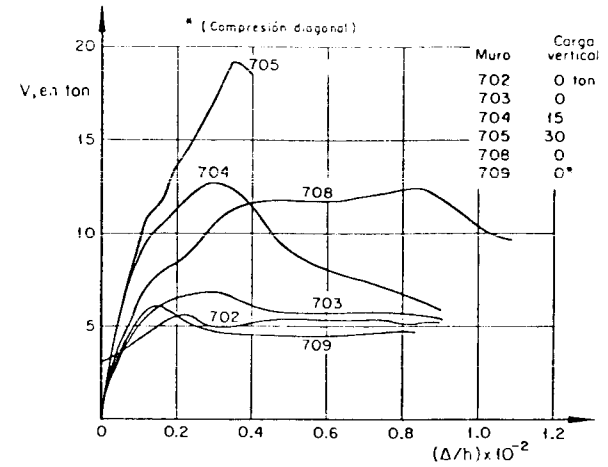


Fig 8 Ensayes a carga estática

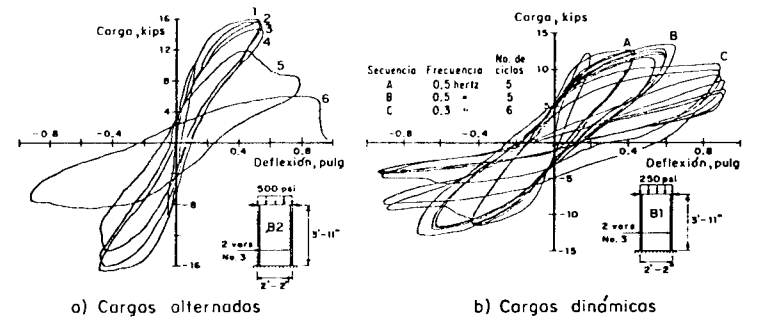


Fig 9 Curvas carga deformación

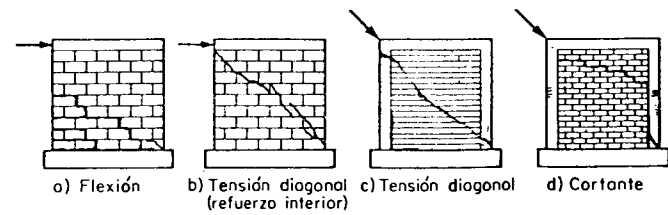


Fig 10 Fallas típicas de muros

46-A

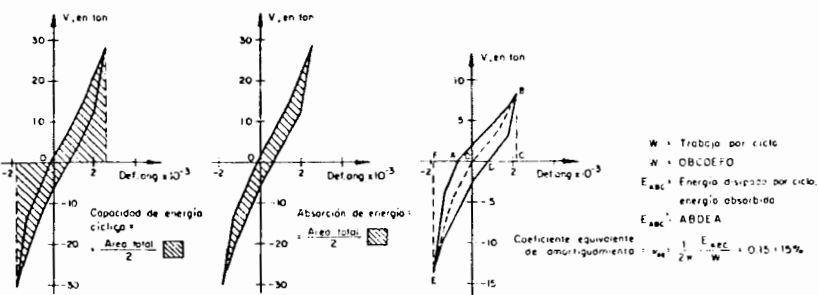


Fig 11 Propiedades de muros de mampostería ante alternación de cargas

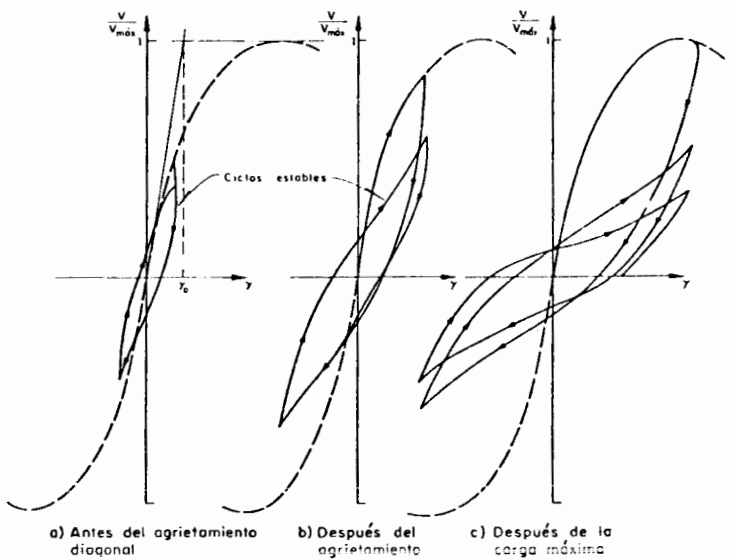
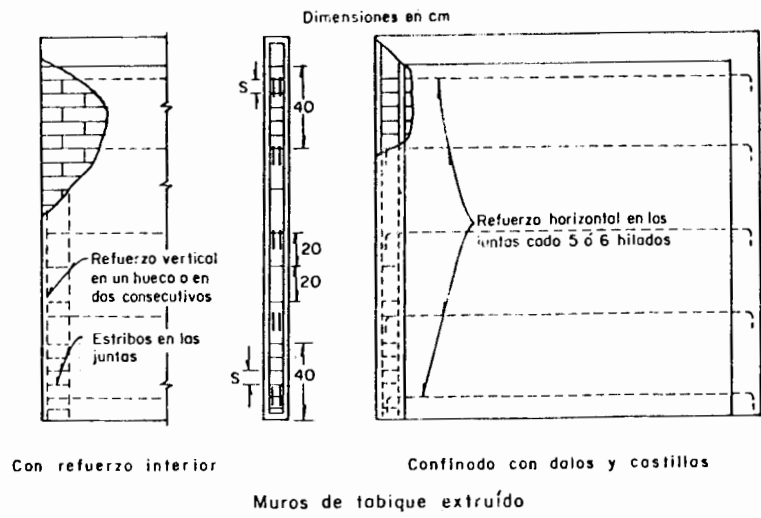
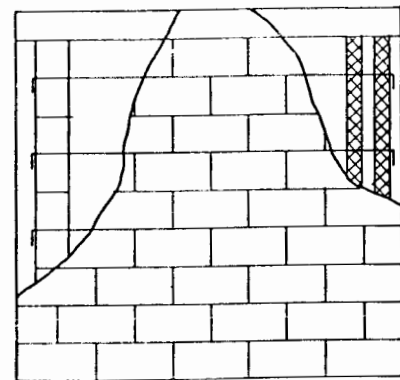


Fig 12 Deterioro del muro



Variantes:

- Con refuerzo horizontal cada 2 hilados o sin el
- Refuerzo vertical en un hueco o en dos consecutivos con estribos a cada hilada
- Dos huecos consecutivos confinados con malla de metal desplegado
- Castillo integral



Muros de bloques de concreto

Fig 13 Detalles generales de refuerzo



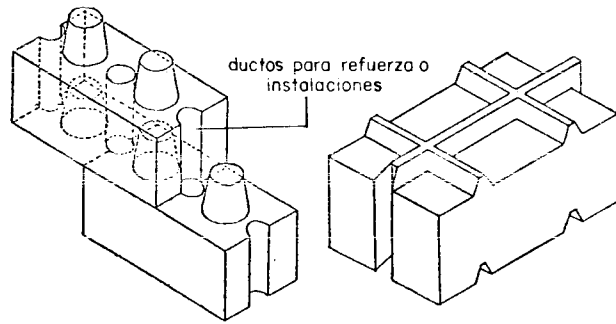


Fig 14 Piezas machiembradas

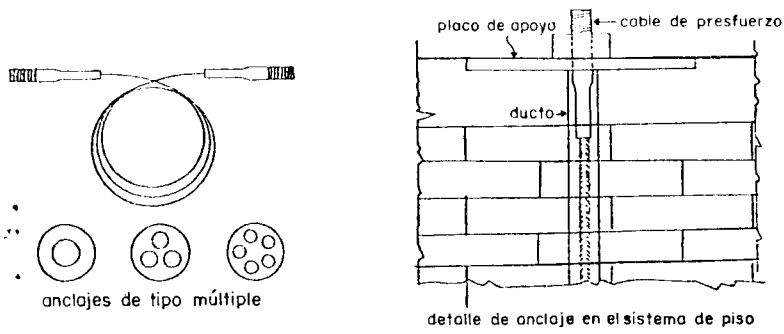


Fig.15 Aplicación del sistema de postensado RAMSA en mampostería.

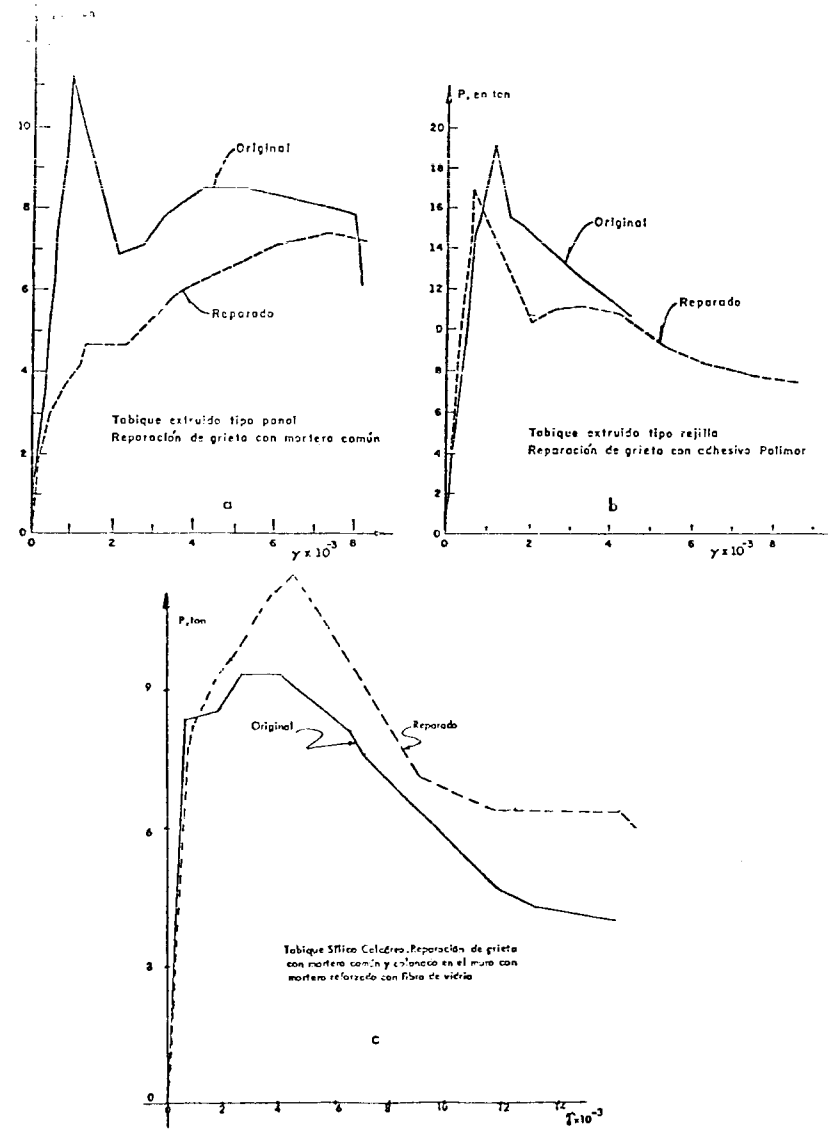


Fig 16 Eficiencia de diferentes formas de reparación de muros