



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERIA
DIVISIÓN DE INGENIERÍAS
CIVIL Y GEOMÁTICA

EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO
DINÁMICO DE UN EDIFICIO DE 20 NIVELES
CON BASE EN PROPIEDADES DINÁMICAS
OBTENIDAS ANALÍTICA Y
EXPERIMENTALMENTE.

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
I N G E N I E R O C I V I L
P R E S E N T A :

HÉCTOR LORENZO ANAYA CAJIGA

DIRECTOR DE TESIS:

M.I. OCTAVIO GARCÍA DOMÍNGUEZ



CIUDAD UNIVERSITARIA, MÉXICO. D.F.

MARZO 2007.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA
DIRECCIÓN
FING/DCTG/SEAC/UTIT/050/05

Señor
HÉCTOR LORENZO ANAYA CAJIGA
Presente

En atención a su solicitud me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor M.I. OCTAVIO GARCÍA DOMINGUEZ, que aprobó esta Dirección, para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de INGENIERO CIVIL.

**"EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE UN EDIFICIO DE 20 NIVELES,
CON BASE EN PROPIEDADES DINÁMICAS OBTENIDAS ANALÍTICA Y
EXPERIMENTALMENTE".**

- INTRODUCCIÓN
- I. ANTECEDENTES
- II. DESCRIPCIÓN DEL EDIFICIO
- III. ANÁLISIS DE SEÑALES PARA DETERMINAR LAS PROPIEDADES DINÁMICAS DE EDIFICIOS
- IV. MODELADO ESTRUCTURAL DEL EDIFICIO
- V. ESTUDIO DE VIBRACIÓN AMBIENTAL PARA LA DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES DINÁMICAS DEL EDIFICIO
- VI. COMPARACIÓN DE LAS PROPIEDADES DINÁMICAS OBTENIDAS ANALÍTICA Y EXPERIMENTALMENTE
- VII. ANÁLISIS DINÁMICO DEL EDIFICIO
- VIII. CONCLUSIONES
- ANEXOS
- BIBLIOGRAFÍA

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el Título de ésta.

Asimismo le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar Examen Profesional.

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"
Cd. Universitario a 12 de Mayo del 2005.
EL DIRECTOR

M.C. GERARDO FERRANDO BRAVO
GFB/AJP/CRC

Dedicatorias :

A :

Mis queridos Padres:

Sr. Lorenzo Anaya Rodríguez
Sra. Maria Salome Cajiga Rodríguez (+)

Por su apoyo, desvelos y esmero, ya que me impulsaron y facilitaron el camino para lograr esta meta, además han sido un ejemplo de superación en la vida.

A :

Mis hermanos y familiares:

En especial a:

Mi hermana:
Maria Cristina Anaya Cajiga
Mi hermano:
Juan Carlos Anaya Cajiga

Por que con ellos he convivido siempre en las buenas y en las malas y de alguna manera me han apoyado para que yo logre mis objetivos profesionales.

Mi Padrino:
Javier Cajiga Rodríguez

Por que fue una gran influencia en la elección de mi Carrera profesional y ha sido un ejemplo a seguir en cuestión de entrega como estudiante y en su profesión.

Mis primos:
Fernando Alberto Anaya Méndez
Juan Sebastián Anaya Ávila

Por su compañía y los momentos que pasamos juntos como estudiantes en la Facultad de Ingeniería

A :

Mi novia:

Claudia Contreras Pérez

Por que ella ha sido una gran motivación en mi carrera,
por sus consejos de superación, por su apoyo
incondicional, por su compañía durante estos
últimos seis años, su comprensión y sobre
todo por las alegrías y el amor que me
ha dado.

A :

M.I. Octavio García Domínguez

Gracias por sus consejos y por el tiempo que me dedico
en el aula y para realización de la presente Tesis,
gracias por su paciencia e interés que mostró
en la construcción de los cimientos de
mi formación profesional.

A :

Todos mis profesores

Por los valiosos conocimientos que adquirí en mi formación profesional.

A :

La Universidad Nacional Autónoma de México

Por haberme otorgado educación de primer nivel, me siento
orgulloso de haberme formado en esta Institución como
profesionista.

INTRODUCCIÓN -----	1
CAPÍTULO 1- ANTECEDENTES -----	4
CAPÍTULO 2- DESCRIPCIÓN DEL EDIFICIO -----	6
CAPÍTULO 3-ANÁLISIS DE SEÑALES PARA DETERMINAR LAS PROPIEDADES DINÁMICAS DE EDIFICIOS	
3.1 Comportamiento dinámico de los edificios ante eventos sísmicos-----	12
3.1.1 Sismos y placas tectónicas.-----	12
3.1.2 Edificios y los sismos.-----	14
3.2 Instrumentación en edificios-----	15
3.3 Análisis de Fourier-----	17
3.4 Funciones de Transferencia-----	22
3.5 Propiedades dinámicas-----	25
3.5.1 Determinación de frecuencias-----	25
3.5.2 Determinación del nivel de amortiguamiento-----	26
3.5.3 Instrumento virtual-----	28
CAPÍTULO 4- MODELADO ESTRUCTURAL DEL EDIFICIO	
4.1 Análisis sísmico de edificios-----	30
4.1.1 Análisis modal.-----	35
4.1.2 Ecuaciones de equilibrio dinámico para un sistema de varios grados de libertad-----	36
4.1.3 Métodos de Análisis Sísmico-----	39
4.2 Criterios de Análisis y Diseño Estructural.-----	41
CAPÍTULO 5- ESTUDIO DE VIBRACIÓN AMBIENTAL PARA LA DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES DINÁMICAS DEL EDIFICIO.	
5.1 Actividades-----	43
5.2 Instrumentación empleada-----	41
5.2.1 Dispositivo instrumental-----	41
5.2.2 Elección de los puntos de medición del inmueble-----	46
5.3 Procesamiento y Análisis de Señales.-----	48
5.3.1 Procesamiento de señales.-----	48

5.3.2	Análisis de señales.	49
5.4	Resultados experimentales.	53
5.4.1	Propiedades dinámicas del edificio reforma 116 en dirección transversal	53
5.4.2	Propiedades dinámicas del edificio reforma 116 en dirección longitudinal	55
5.4.3	Frecuencia y Periodo de vibrar en torsión del Edificio	56

**CAPÍTULO 6- COMPARACIÓN DE LAS PROPIEDADES DINÁMICAS
OBTENIDAS ANALÍTICA Y EXPERIMENTALMENTE-----57**

CAPÍTULO 7- ANÁLISIS DINÁMICO DEL EDIFICIO

7.1	Análisis Dinámico Modal Espectral	59
7.1.1	Espectro de diseño del Reglamento del Distrito Federal.	59
7.1.2	Revisión por cortante basal	62
7.1.3	Factor de comportamiento sísmico.	62
7.2	Análisis Dinámico Modal Espectral del edificio en estudio.	69

CAPÍTULO 8- CONCLUSIONES-----71

ANEXOS-----73

BIBLIOGRAFÍA-----117

INTRODUCCION

INTRODUCCIÓN

En nuestro país existen zonas urbanas como la Ciudad de México que poseen estructuras de gran importancia que, de acuerdo a su ubicación geográfica, históricamente han sufrido daños debido a temblores de gran magnitud generados principalmente en las costas del pacífico, cuya sismicidad es ocasionada por el fenómeno de subducción entre las placas de Cocos y de Norteamérica.

Por todo esto ingenieros especialistas en estructuras se han dado a la tarea de encontrar y aplicar nuevas técnicas que nos ayuden a conocer el estado actual de las edificaciones existentes y evaluar su seguridad, para poder tomar decisiones sobre su posible reforzamiento. En ocasiones y, si la estructura es de gran importancia, se requiere un monitoreo permanente que permita observar su comportamiento dinámico ante la acción de futuros sismos o alguna sollicitación dinámica.

La instrumentación sísmica de estructuras es una técnica relativamente nueva y económicamente factible, la cual es utilizada para recabar información sobre las propiedades dinámicas actuales de las edificaciones o de cualquier tipo de estructura que haya sufrido alteraciones en las características físicas de sus elementos estructurales debido al deterioro por el paso del tiempo. Para la realización de esta técnica es necesario instrumentar estratégicamente a la estructura con la ayuda de aparatos altamente sensibles llamados acelerógrafos digitales, recabar datos de estos y, posteriormente, apoyados en estudios basados en el Análisis de Fourier, poder interpretar estos datos y conocer el comportamiento dinámico actual de la estructura.

En este trabajo se presenta el estudio realizado para determinar las propiedades dinámicas de una estructura en particular, dadas por sus formas modales y correspondientes periodos de vibrar y relaciones de amortiguamiento. La estructura es un edificio de 20 niveles localizado en Avenida Paseo de la Reforma de esta Ciudad de México. Esta estructura fue modelada con detalle, atendiendo a la información contenida en planos existentes y memorias de cálculo, con ayuda del programa de análisis estructural SAP2000, considerado como uno de los más representativos del estado del arte para realizar el análisis y diseño de estructuras.

Conscientes de la presencia de incertidumbres entre el modelado de la estructura en estudio y el comportamiento real de la misma y de su verdadera respuesta ante sismos o cualquier sollicitación, los resultados que nos arrojan los modelos matemáticos son comparados con los resultados de los estudios realizados por medio de la instrumentación sísmica, con el propósito de garantizar que el modelo empleado es representativo del comportamiento de la estructura existente. Al momento de comparar el modelo y los resultados de mediciones, es lógico que se encuentren diferencias, ya que el modelo es

creado de acuerdo a las características que tenía la estructura recién construida y no con las condiciones actuales de la misma.

Para lograr una buena aproximación en nuestro modelo matemático, es necesario contar con un estimado realista de las cargas actuantes en la estructura, de las propiedades físicas del concreto y el acero empleado en la construcción del inmueble obtenidas, por ejemplo, a partir de pruebas de laboratorio sobre probetas extraídas directamente de la estructura, además de contar con datos geométricos y descriptivos precisos.

Finalmente se calibra el modelo matemático con los resultados de las mediciones reales para poder utilizarlo con la finalidad de realizar pruebas sobre él y tener la seguridad de que nuestra estructura se va a comportar tal y como se comporta la estructura modelada. Así el ingeniero puede evaluar y tomar decisiones, por ejemplo, sobre su posible reforzamiento y la efectividad del mismo, todo esto a través del modelo matemático y no sobre la estructura real.

Este trabajo se dividió en once capítulos los cuales se describen brevemente a continuación:

En el capítulo 1 se narra la problemática que posee la Ciudad de México en cuanto a los daños causados en gran número de sus edificaciones importantes por encontrarse en una zona altamente sísmica. También se exponen algunas bondades de la técnica de la instrumentación sísmica y se mencionan algunas aplicaciones en diferentes tipos de estructuras, empleando diferentes fuentes de excitación de vibración ambiental y forzada.

En el capítulo 2 se presenta la descripción del edificio en estudio, se menciona su estructuración, se proporcionan datos sobre su geometría y dimensiones, también se presentan algunos esquemas de diferentes vistas de la estructura para una mejor apreciación de la misma.

En el capítulo 3 se incluyen algunos aspectos fundamentales sobre sismología (origen y tipos de sismos, placas tectónicas, etc.), se menciona cómo se comportan las estructuras ante un sismo y los elementos mecánicos que producen en ellas y de una manera introductoria la instrumentación en edificios. Así mismo de manera sencilla se describen los conceptos fundamentales del Análisis de señales y el Análisis de Fourier con sus ecuaciones y aplicaciones. A manera de introducción se describe el programa llamado "instrumento", empleado en esta tesis para el análisis y proceso de señales.

En el capítulo 4 se presentan las bases para la modelación matemática de edificios y se describen los diferentes criterios y métodos de análisis sísmico que se establecen en las normatividad vigente.

En el capítulo 5 se describe la instrumentación empleada en el edificio en estudio para determinar sus propiedades dinámicas. Además se mencionan las actividades desarrolladas durante el estudio de vibración ambiental, sus características y la ubicación de los sensores en los diferentes niveles de la estructura. Finalmente se realiza el procesamiento de las señales y se emiten resultados sobre el mismo.

En el capítulo 6 se realiza una comparación de las propiedades dinámicas obtenidas a través de la modelación matemática por medio del programa de análisis estructural SAP2000 y las obtenidas del análisis que se llevó a cabo en el estudio de vibración ambiental.

En el capítulo 7 se realiza el análisis dinámico del edificio y con base en los resultados obtenidos y las combinaciones de carga requeridas por el Reglamento de Construcciones para el RCDF, se revisó el diseño de sus elementos estructurales críticos y el cumplimiento de los estados límite especificados.

En el capítulo 8 se presentan las conclusiones sobre el trabajo desarrollado.

CAPITULO 1
ANTECEDENTES

CAPÍTULO 1 ANTECEDENTES

El origen de los sismos en la Ciudad de México se debe principalmente al deslizamiento entre la placa de Cocos y la Norteamericana. La mayoría de los focos de los sismos registrados se localizan en los estados de Michoacán, Guerrero y Oaxaca afectando en gran medida a las edificaciones desplantadas sobre esta ciudad. Entre los sismos más relevantes se recuerda el de 1985 que sacudió la ciudad y derribó gran cantidad de edificaciones y muchas otras quedaron con daños mayores.

En los últimos cuarenta años se han recolectado un buen número de registros de movimientos telúricos fuertes en obras civiles tales como edificios, puentes y presas, en las cuáles se ha instalado algún tipo de instrumentación sísmica. La información que estos registros contienen es de mucho valor para los ingenieros estructurales, ya que permite entender de una mejor manera cómo se comportan los diferentes sistemas estructurales durante los terremotos y otras sollicitaciones dinámicas. En este tipo de obras civiles se han recolectado registros de terremotos de distintas intensidades, lo cual permite evaluar su comportamiento dinámico a diferentes niveles de excitación del suelo. Problemas tales como interacción suelo-estructura, comportamiento de pisos blandos y efectos de torsión, se pueden entender mejor al analizar los registros de estructuras con instrumentación sísmica.

Por todo esto y para garantizar la seguridad de las edificaciones de mayor importancia desplantadas en esta ciudad desde hace ya varios años, la instrumentación sísmica ha tomado una importancia relevante ya que mediante la instalación de acelerógrafos de gran sensibilidad, es posible registrar cada movimiento de la edificación, aún imperceptibles para el hombre. Esta técnica ha permitido identificar de manera confiable el estado actual del sistema estructural de un inmueble y observar su comportamiento ante diferentes sollicitaciones.

Con el apoyo de la instrumentación en estructuras, se ha logrado ejecutar estudios que han ayudado a calibrar modelos matemáticos y a verificar que estos modelos sean adecuados para representar o predecir el comportamiento de la estructura.

Los últimos avances en el desarrollo de programas de análisis dinámico tridimensional permiten hoy en día hacer este tipo de verificaciones a nivel bastante sofisticado.

Los estudios basados en la instrumentación sísmica son relativamente nuevos no sólo en México sino en el mundo; aunque debido a los adelantos tecnológicos actuales, los instrumentos electrónicos para realizar estos estudios han reducido

su valor económico, quedando más accesibles y justificables para algunas estructuras con cierta importancia.

En las estructuras instrumentadas se pueden registrar los eventos sísmicos o también movimientos ambientales como el paso de los vehículos, la acción del viento, acción de motores, cargas vivas, entre otros. A los estudios cuyos fines se realizan para estudiar estos últimos agentes externos, se les llama estudios de vibración ambiental. También existen otros medios para inducir solicitaciones a la estructura por ejemplo la vibración forzada, que es cuando se produce la excitación de la estructura por medio de masas excéntricas oscilando en ocasiones con ayuda de motores.

En este trabajo se contó con los resultados de un estudio de vibración ambiental, para obtener propiedades dinámicas de un edificio, pruebas de laboratorio e inspecciones en el sitio, lo que permitió realizar su modelación matemática en el programa de Análisis Estructural SAP2000 de acuerdo a planos. Con la información obtenida de análisis preliminares, se pudieron comparar los resultados experimentales y calibrar el modelo para realizar pruebas en el y finalmente realizar un análisis dinámico de la estructura para evaluar su comportamiento.

CAPITULO 2
DESCRIPCIÓN DEL EDIFICIO

CAPÍTULO 2 DESCRIPCIÓN DEL EDIFICIO

El edificio en estudio se localiza en Av. Paseo de la Reforma número 116, Colonia Juárez, Delegación Cuauhtémoc de esta ciudad. Es una estructura construida de acero que data de la década de los 50's, de planta rectangular formada por dos cuerpos independientes de 3 y 20 niveles separados por juntas constructivas, soportados por cajones de cimentación apoyados sobre pilotes de punta. En las figuras 2.1, 2.2 y 2.3 se ilustran respectivamente las configuraciones en planta del nivel tipo, sótano y planta baja de este edificio.

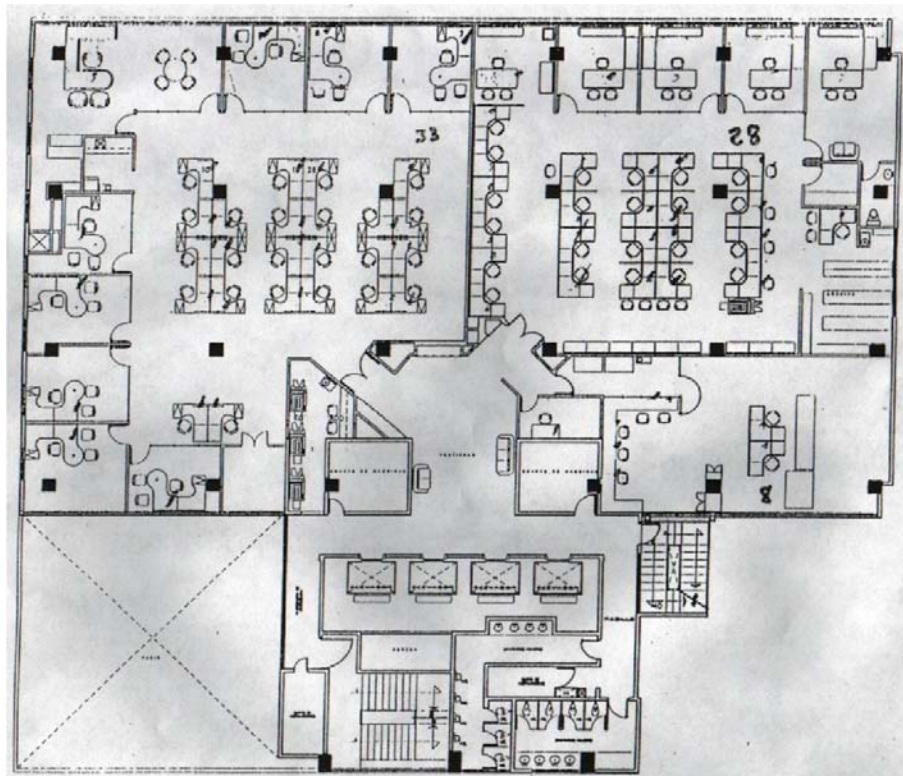


Fig. 2.1 Nivel Tipo, edificio Av Paseo de la Reforma 116

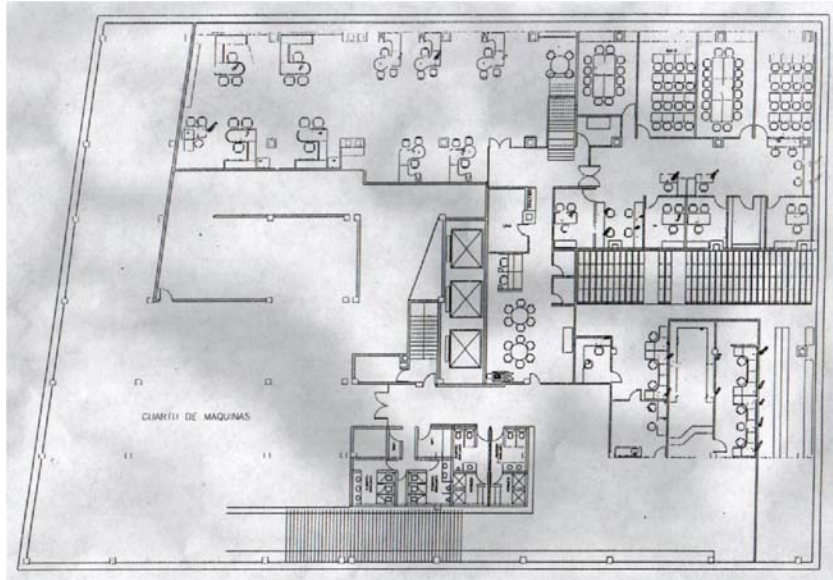


Fig. 2.2 Sótano, edificio Av Paseo de la Reforma 116

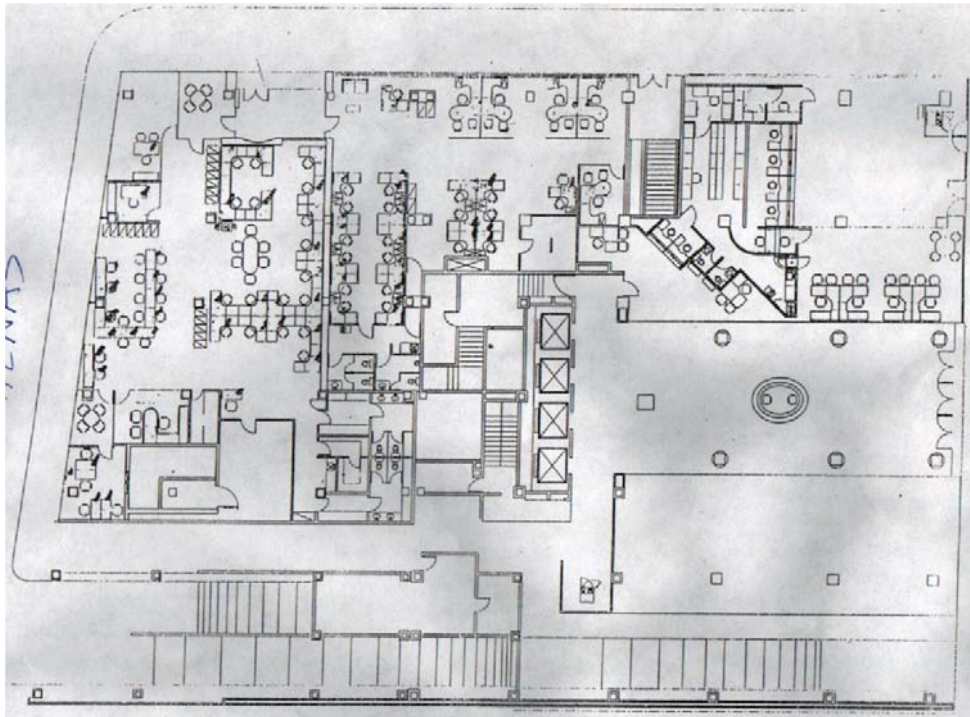
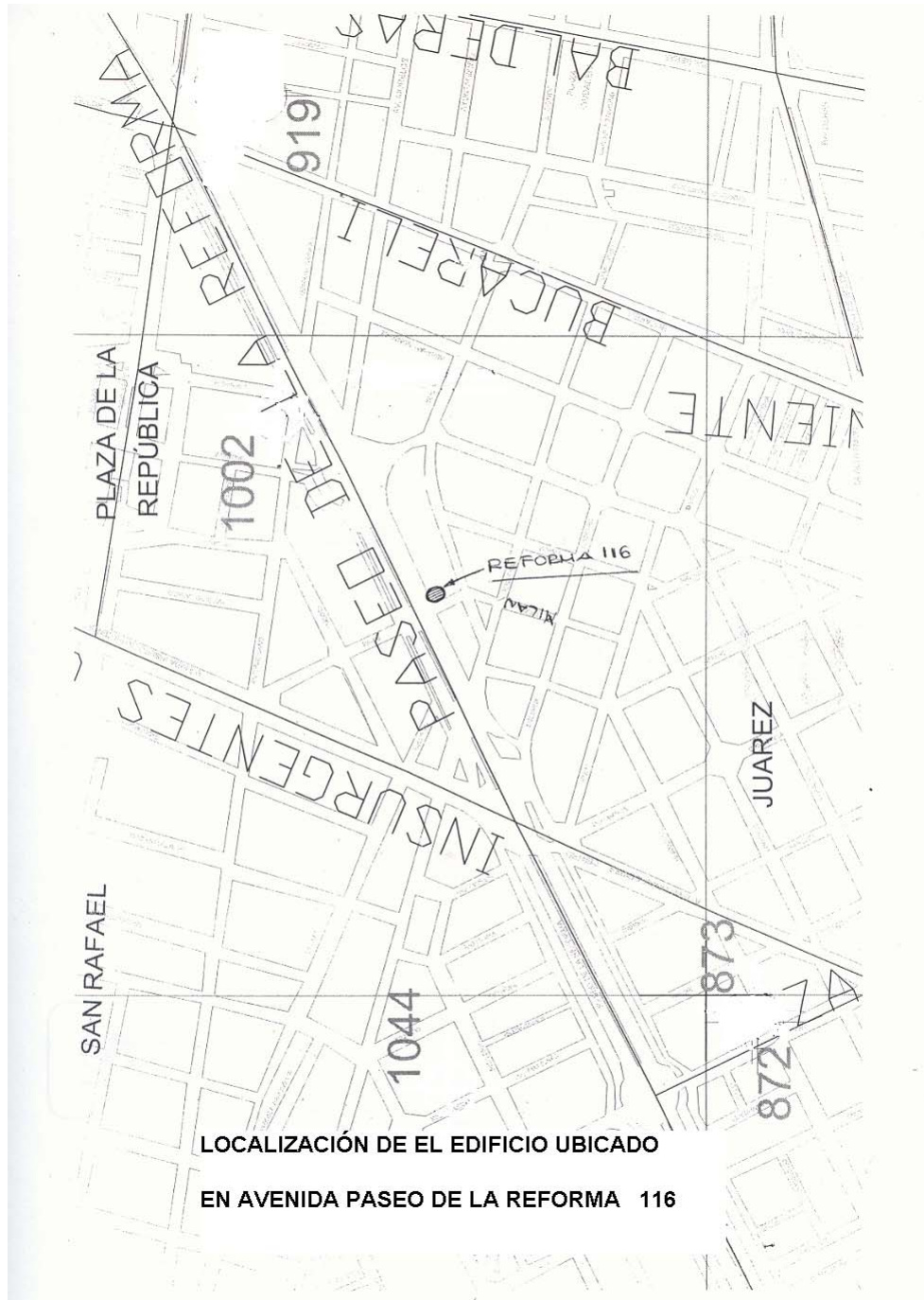


Fig. 2.3 Planta Baja, edificio Av Paseo de la Reforma 116

El inmueble esta desplantado sobre terreno blando en la zona del lago (zona III de acuerdo con la clasificación del RCDF), con un periodo dominante del suelo de aproximadamente 2 segundos. Su sistema estructural consiste de marcos flexibles de acero formados a base de columnas y vigas que soportan losas macizas de concreto, mismas que proporcionan una gran rigidez en su plano, característica deseable en estructuras de gran flexibilidad.

A continuación se muestra la localización del edificio:



Según los estudios de topografía el edificio presenta la siguiente verticalidad:

- Visto desde Av. Paseo de la Reforma, el edificio muestra desplome de 21.0 cm en promedio hacia el hotel Fiesta Americana.
- Visto desde la calle Millán, el edificio muestra desplome de 7.0 cm en promedio hacia Av. Paseo de la Reforma.

En las figuras 2.4 y 2.5 se presentan vistas representativas del edificio desde Av Paseo de la Reforma y desde Calle Millán y enseguida se presentan las fotografías 2.1 y 2.2 tomadas sobre Av. Paseo de la Reforma.

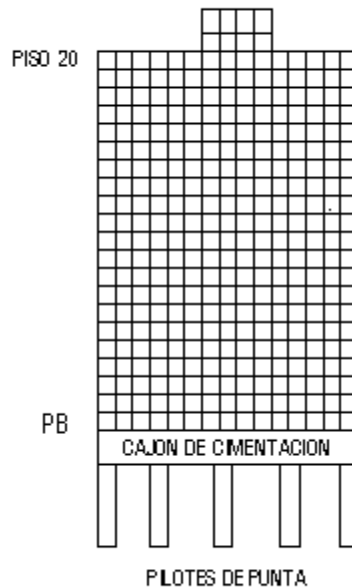


Fig. 2.4 Vista lado Noroeste, Avenida Paseo de la Reforma

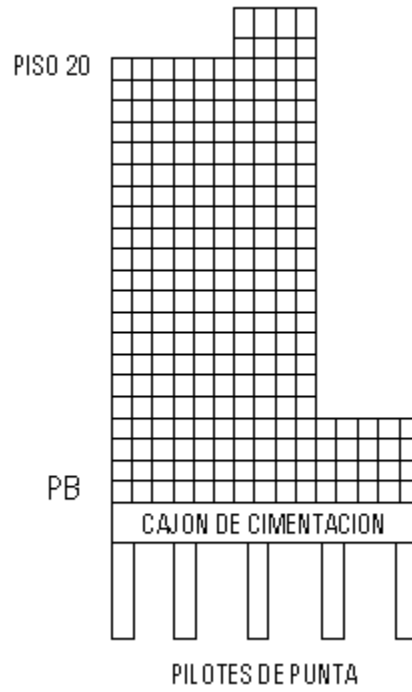


Fig. 2.5 Vista lado Sureste, Calle Millán.



Foto 2.1 Fotografía del edificio tomada sobre Av. Paseo de la Reforma



Foto 2.2 Fotografía del edificio tomada sobre Av. Paseo de la Reforma

CAPITULO 3
ANÁLISIS DE SEÑALES PARA DETERMINAR LAS PROPIEDADES
DINAMICAS DE EDIFICIOS

CAPÍTULO 3

ANÁLISIS DE SEÑALES PARA DETERMINAR LAS PROPIEDADES DINÁMICAS DE EDIFICIOS.

3.1 COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE LOS EDIFICIOS ANTE EVENTOS SÍSMICOS.

3.1.1 *Sismos y placas tectónicas.*

Los sismos (o temblores) son movimientos vibratorios más o menos violentos de la corteza terrestre. Se originan, por lo general, en las zonas de subducción que limitan a dos placas tectónicas (Fig 3.1), donde el choque de dos de esas placas produce el deslizamiento de una de ellas por debajo de la otra y el descenso de materiales hacia el manto.

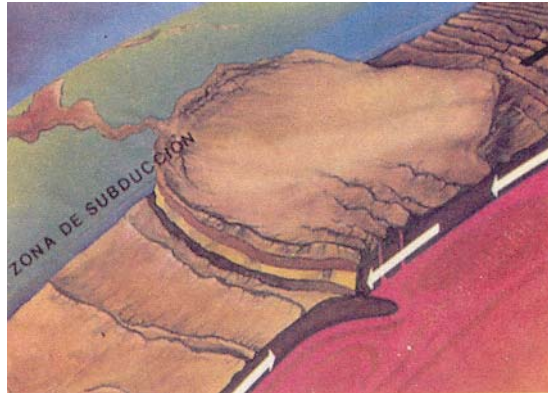


Fig. 3.1 Zona de subducción
(región por la que la corteza oceánica desciende hacia el manto)

Este tipo de sismos, llamados tectónicos han afectado varias veces a nuestro país, entre otras en 1985, cuando la placa de Cocos se deslizó por debajo de la Norteamericana (Fig. 3.2). Al mismo tipo pertenecen los que han causado extensos daños y pérdida de vida en Japón, Perú, Chile, Nicaragua, en la ciudad de San Francisco, EUA, y en numerosos lugares.

Otro tipo de sismos, los volcánicos, se originan debido a la presión ejercida por el magma, al atravesar la corteza y salir a la superficie. A diferencia de los sismos tectónicos, que pueden afectar extensas zonas, los volcánicos se sienten sólo en las comarcas vecinas al volcán.

Cuando los temblores afectan porciones de la corteza cubiertas por océanos originan con frecuencia movimientos violentos de las aguas, llamados maremotos,

que dan lugar a las olas gigantescas (sunamis) que al precipitarse sobre regiones cercanas al mar, ocasionan terribles catástrofes como la ocurrida muy recientemente en Asia a finales del 2004 que acabó con miles de vidas humanas y se tuvieron millonarias pérdidas humanas a lo largo de toda la costa de varios países de aquel continente.

Los sismos de acuerdo con su intensidad se clasifican en microsismos cuando son casi imperceptibles, y macrosismos cuando son intensos; por el sentido de su movimiento pueden ser horizontales o verticales. La duración de los sismos es corta.

Cada año se producen alrededor de 150 000 sismos, en su mayoría de poca intensidad y, en consecuencia, imperceptibles para el hombre; sabemos que se produjeron porque fueron registrados por el sismógrafo, en un sismograma.

Llamamos foco o hipocentro al punto donde se origina un sismo, y epicentro al punto de la superficie en el cuál alcanza mayor intensidad. Desde el foco, los temblores se transmiten en forma de ondas (como las del agua) primarias y secundarias, llamadas ondas sísmicas que han sido útiles para investigar el interior de la Tierra. Los focos de la mayoría de los sismos registrados en México se localizan en los estados de Michoacán, Guerrero y Oaxaca, vecinos a la Placa Tectónica de Cocos.

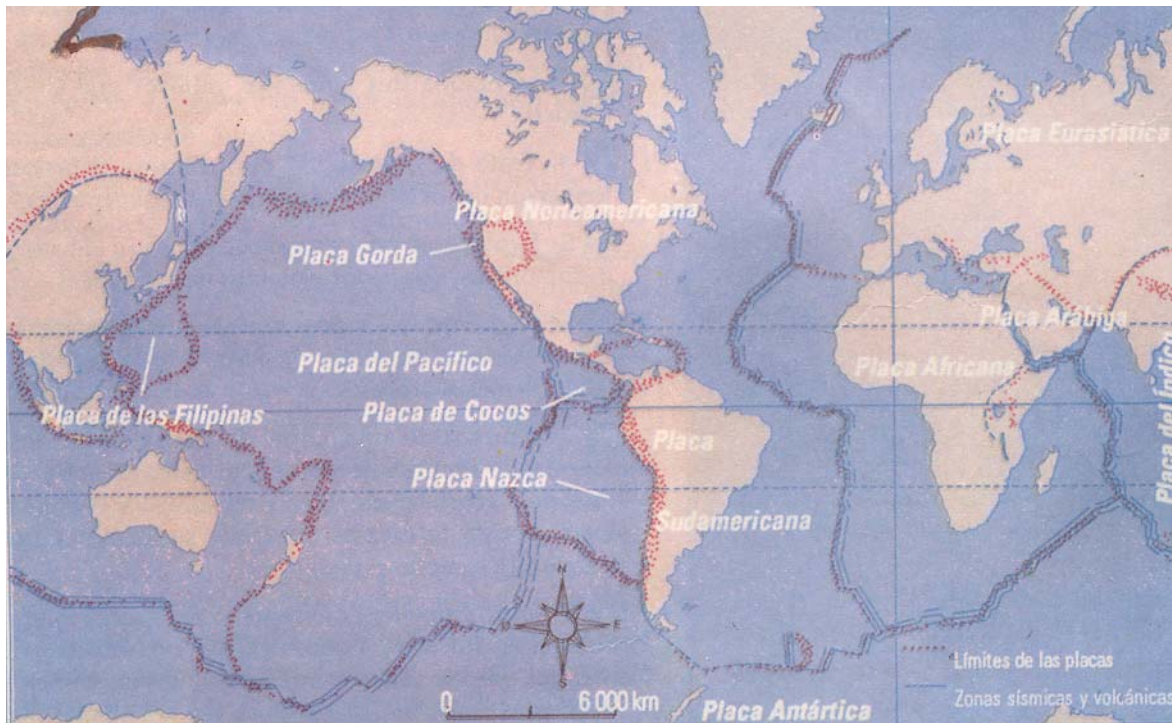


Fig. 3.2 Placas tectónicas del mundo

3.1.2 Edificios y los Sismos

El caso de estudio de este trabajo está acotado al de un edificio, ya que es de gran interés conocer el comportamiento de éstos ante movimientos telúricos o fenómenos naturales que afecten su funcionamiento o estabilidad, debido a que en la Ciudad de México cada vez se construyen muchas edificaciones de diversas alturas y existen otras que requieren ser monitoreadas debido a su importancia.

Cuando se produce un sismo, se transmiten desde el epicentro ondas sísmicas en todas direcciones por ejemplo hasta el Valle de México, y producen movimientos que afectan a la base de las estructuras, el terreno experimenta movimientos de traslación y rotación que afectan a la cimentación.

Estos movimientos generan traslaciones en tres direcciones ortogonales y rotaciones alrededor de tres ejes que varían continuamente durante el movimiento (Fig.3.3), haciendo que la superestructura genere también movimientos amplificados, debido a la existencia de efectos inerciales y a su flexibilidad, las cuales hacen aparecer fuerzas en tres direcciones, así como momentos flexionantes y torsionantes sobre la cimentación, que varían en el tiempo (elementos mecánicos).

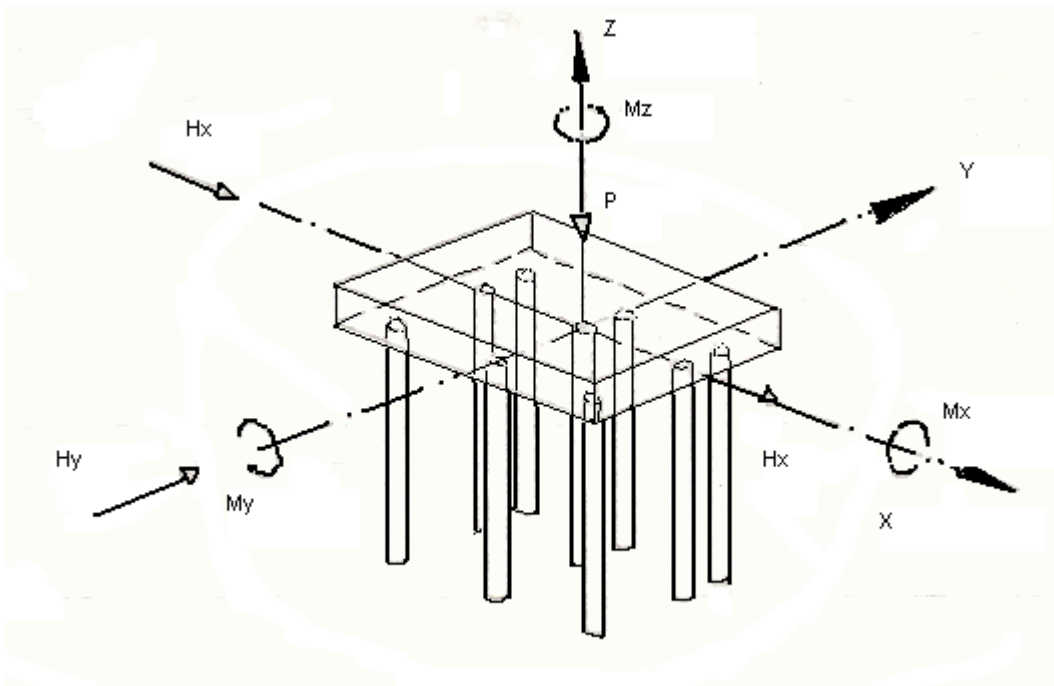


Fig. 3.3 Elementos mecánicos que actúan sobre la cimentación rígida

El movimiento de la cimentación induce desplazamientos, velocidades y aceleraciones en cada uno de los niveles de la superestructura, que producen movimientos relativos en columnas, trabes y losas del edificio, los que generan elementos mecánicos que pueden ocasionar daños cuando su diseño no es satisfactorio.

Existen variables que nos pueden explicar la respuesta de la verdadera cinemática de las edificaciones y sus causas, las cuales son:

- El movimiento espacial del terreno en lugares cercanos a la edificación, tanto en la superficie del terreno, como en estratos profundos.
- La transmisión de energía cinética medida en lugares cercanos, hacia la base de la construcción.
- El movimiento tridimensional de la base del edificio.
- La amplificación del movimiento de los pisos superiores
- Los niveles de amortiguamiento, tanto del suelo, como del sistema suelo-estructura.
- La distribución espacial de los movimientos medidos reales de la estructura, y su relación con resultados de modelos matemáticos que comúnmente se emplean en la práctica profesional.

3.2 INSTRUMENTACIÓN EN EDIFICIOS

Los sismos pasados de gran intensidad, como el ya mencionado sismo de Septiembre de 1985 en la Ciudad de México, han causado innumerables fallas en las edificaciones atribuibles a efectos que en ocasiones no se consideran explícitamente en el diseño de estos pues se carece de los métodos de análisis correspondientes, además de que las características estructurales van modificándose a lo largo del tiempo y la resistencia de los edificios con considerables años de construcción es muy diferente a la que tenían recién terminados y si no se cuenta con un monitoreo del comportamiento de este tipo de edificaciones ante sollicitaciones, las cuales se intuye puedan tener algún daño considerable en sus elementos estructurales, es posible que no resistan algún evento sísmico considerable.

Para ello se ha considerado necesario instrumentar algunos edificios con acelerógrafos de alta precisión y realizar estudios en las estructuras de interés poder hacer pruebas con ayuda de modelos calibrados en base a los resultados obtenidos del comportamiento en particular de la estructura sometida a diversas solicitaciones.

En la Ciudad de México se colocan cada vez con más frecuencia acelerógrafos digitales en las edificaciones de mayor importancia con el objeto de conocer sus propiedades dinámicas y evaluar la seguridad de los mismos ante eventos sísmicos.

En la actualidad esta aumentando el número de edificaciones a las cuales se les realizan estudios (vibración ambiental) para conocer sus propiedades dinámicas y su cinemática, con el objeto de desarrollar un modelo estructural de las mismas (como se mencionó anteriormente) y así poder someter este modelo a pruebas que nos arrojen resultados muy cercanos al comportamiento real de estructuras ante eventos en donde se induzcan diferentes tipos de solicitaciones que pudieran poner en peligro la estabilidad de las mismas.

Para instrumentar una edificación se debe seguir una técnica especial en la cuál sean colocados los instrumentos de medición en puntos estratégicos en los cuales vamos a obtener la información más clara e importante para poder analizarla y llegar a nuestro objetivo. En estos puntos se colocan estos equipos de medición sísmica que tienen un nivel de sensibilidad elevado y que registran los movimientos en dichos lugares debidos a la acción de los sismos o al paso de vehículos pesados y a la acción del viento (vibración ambiental).

Estos aparatos registran los movimientos de la estructura y los transforman internamente en **señales** eléctricas en función de niveles de voltaje directamente proporcionales a las señales de entrada(al movimiento) y los almacenan en dispositivos de memoria de estado sólido en una computadora (Fig 3.4).

Estos registros son recuperados por los especialistas y a la vez van realizando en el sitio pruebas preliminares y análisis de estas señales en el lugar para poder comprobar que los datos que se están registrando son correctos. Los registros que se obtienen se encuentran en archivos de acuerdo al tipo de equipo de medición y se pueden analizar en un programa de computo como por ejemplo el "All View" que realiza automáticamente ciertas operaciones basadas en el Análisis de Fourier y nos entrega gráficas muy útiles en el Análisis de estas Señales.



Fig. 3.4 Equipos de medición y computadora portátil

3.3 ANÁLISIS DE FOURIER

Los acelerógrafos se encuentran colocados en diferentes niveles de los edificios, con el objeto de conocer el comportamiento dinámico de los mismos, registran los movimientos durante un sismo o producidos como se mencionaba por vibraciones comunes como el paso de un vehículo de carga, por la acción del viento u otro fenómeno. De estos aparatos se obtienen lecturas de aceleración contra tiempo y se almacenan para su posterior análisis en una computadora.

Así una persona con experiencia en el análisis de señales las interpreta basándose en diferentes métodos aplicados a esta área de las estructuras.

Esto conduce directamente al estudio del **Análisis de Fourier** mediante el cuál los estructuristas se apoyan para analizar las señales que se obtienen de los acelerógrafos digitales.

Con los resultados de estas mediciones se pueden obtener tabulaciones de aceleración contra tiempo, debido a que se registran en éstos instrumentos determinado número de lecturas de aceleraciones por minuto.

En los estudios de vibración ambiental los cuales son llamados a si por la naturaleza de las solicitaciones inducidas a la estructura (vibraciones comunes como el paso de un vehículo de carga, etc. como ya se mencionaba), interesa

analizar señales en el dominio de las frecuencias, con objeto de obtener las propiedades dinámicas de las estructuras, para ello debemos realizar el análisis estudiando los resultados de las mediciones dentro del contexto de un análisis de frecuencias, técnica que se basa en el Análisis de Fourier, por lo que se debe tener conocimiento de los siguientes conceptos:

La **Transformada de Fourier** es un algoritmo que se utiliza para transformar las muestras(datos de las mediciones) a partir de datos en el dominio del tiempo al dominio de las frecuencias, al ser aplicada a éstos registros, realiza la descomposición de la señal en sus componentes de distintas frecuencias, las cuales se estudian por separado, así obtenemos lo que llamamos el Espectro de Fourier, que es simplemente la gráfica de la variación de la amplitud respecto a determinada frecuencia involucrada en la vibración.

En las ecuaciones 3.1 y 3.2 se presenta la Transformada de Fourier:

$$x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} X(f) e^{j2\pi ft} df \quad \text{ec. 3.1}$$

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-j2\pi ft} dt \quad \text{ec. 3.2}$$

Ecuación de la Transformada de Fourier

En donde j es el número imaginario raíz cuadrada de -1 , f es la frecuencia circular, t es el tiempo, $x(t)$ es una señal dada y $X(f)$ es su transformada de Fourier.

Para el caso de señales con un número finito de datos, se emplea la formulación matemática de la **Transformada Discreta de Fourier (DFT)**, la cuál esta dada por la ecuación 4.3 :

$$X_K = \sum_{i=0}^{N-1} x_i e^{-j2\pi ik / N} \quad \text{para } k = 0, 1, 2, 3, \dots, N-1 \quad \text{ec. 3.3}$$

En mediciones de sistemas estructurales, la señal $x(t)$ se obtiene a través de un instrumento analógico digital, por lo que la representación de la transformada de Fourier se realiza en forma discreta, en un lapso de tiempo T .

El proceso numérico involucrado en la obtención de la transformada discreta Fourier (DFT), es laborioso, ya que requiere del cálculo de numerosas operaciones complejas. Sin embargo cuando el número de datos N contenidos en una señal es de potencia 2, es decir, $N=2^k$; para $k=1, 2, 3, \dots$, etc. se puede realizar una simplificación y el cálculo de la DFT se puede obtener en aproximadamente $N \log_2(N)$ operaciones. En caso de que el número de datos contenidos en un registro sea diferente de una potencia de 2, es recomendable agregar al final de la señal, datos adicionales con un valor nulo. Esta adición de ceros en el registro no tiene ningún impacto en el cálculo del espectro. En procesamiento digital de señales se conoce a este caso particular como la Transformada Rápida de Fourier (FFT)

La Transformada Rápida de Fourier (FFT) es simplemente un algoritmo rápido para la evaluación numérica de integrales de Fourier desarrollado en los laboratorios de IBM, y su importancia radica en la rapidez de cálculo conseguida, es muy importante en aplicaciones como: ecualización y filtrado en equipos de audio/vídeo en tiempo real, comunicaciones, etc. .

La diferencia de velocidad de cálculo entre la tradicional transformada discreta y la FFT aumenta según aumenta el número de muestras a analizar, según se puede apreciar en la gráfica de la figura 3.5, ya que mientras una aumenta el número de operaciones necesarias para la resolución de forma exponencial, la otra lo hace de forma prácticamente lineal.

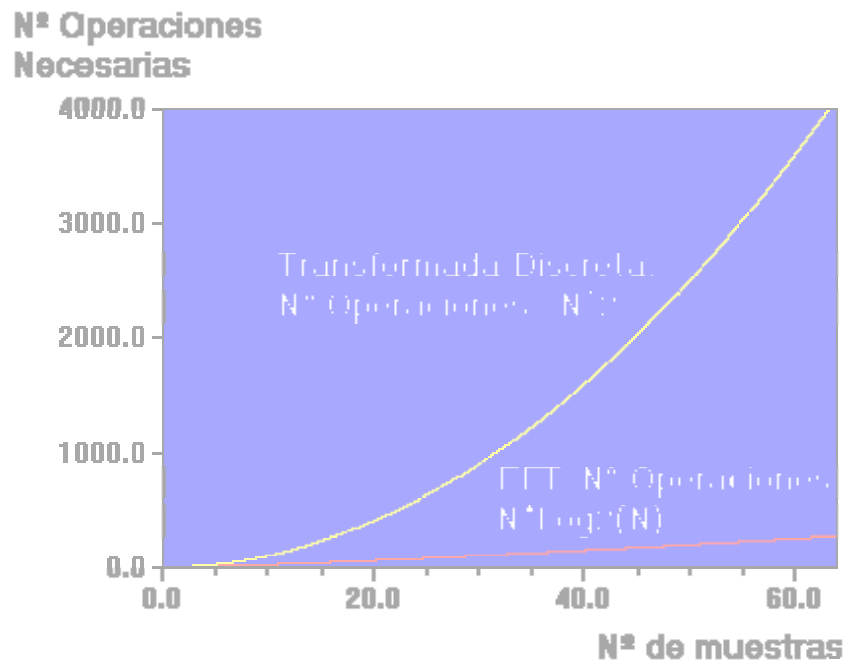


Fig. 3.5 Gráfica comparativa entre la TDF y TFF

Con el **Espectro de Fourier** nos podemos dar cuenta del comportamiento en el punto de referencia en donde estamos tomando nuestros registros y encontrar las frecuencias o periodos en los que la amplitud se “dispara” (picos en el eje de amplitud) y encontrar valores máximos (Fig. 3.6). Estos valores máximos dentro de un rango lógico, podríamos pensar que son los que tienen que ver con las formas modales y los periodos de vibrar de la estructura pero se requiere de un análisis mas detallado para poder afirmar que en realidad lo son, además de contar con conocimientos empíricos o modelos que nos puedan guiar al encontrar los valores reales.

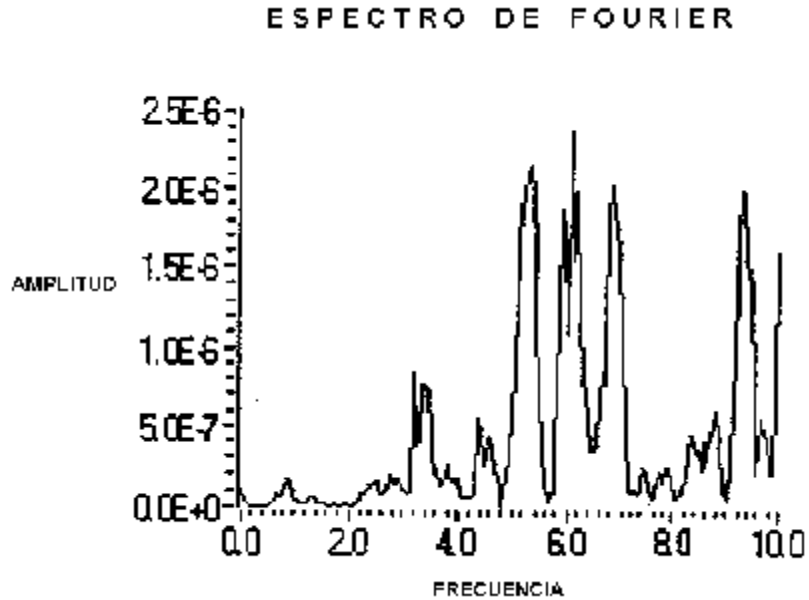


Fig. 3.6 Gráfica del Espectro de Fourier

Existen diferentes parámetros en los que nos podemos apoyar en el análisis de las señales, con el objetivo de detectar la información de los registros que nos sea de utilidad y rechazar la que no lo sea. Estos parámetros son el espectro de potencia, la coherencia, la fase, las funciones de transferencia, entre otros.

Espectro de Potencia.- El espectro de potencia definido según la ecuación 3.4, se obtiene al graficar el contenido de potencia en función de su frecuencia. El contenido de potencia nos indica la cantidad de energía que se libera en determinada frecuencia. Se puede mostrar que el contenido de potencia es el cuadrado de la amplitud del espectro de Fourier. La ventaja de este parámetro está, en que los valores de amplitud en los que encontramos “picos” se observan más claramente debido a que los valores mayores a la unidad aumentan al elevarlos al cuadrado y los valores menores aparecen casi insignificantes y esto deja a la vista los valores mayores de amplitud y minimiza los mas pequeños. Esto nos ayuda en la identificación de los valores de frecuencia en los que la amplitud se “dispara”.

$$S_{xx}(f) = X^*(f)X(f) = |X(f)|^2 \quad \text{ec. 3.4}$$

Coherencia.- La función de coherencia es otro parámetro de importancia dentro de las mediciones en un sistema; los valores de coherencia representan la fracción de la salida del sistema que se relaciona directamente con la entrada, y proporciona un indicador de la validez de la función de transferencia estimada, en otras palabras, nos indica si la señal de salida que se está analizando, es debida a la señal de entrada (ver ec. 3.5). El valor de la coherencia va de cero a uno y mientras más se acerque el valor de ésta a uno, existe una mayor seguridad de que la señal de salida es debida a la señal de entrada y viceversa. La coherencia es adimensional en el dominio de la frecuencia.

$$\gamma^2(f) = \frac{|S_{XY}(f)|^2}{S_{XX}(f)S_{YY}(f)} \quad \text{ec. 3.5}$$

El Espectro de Fase.- El espectro de fase nos indica el tiempo de retraso respecto al origen, que tienen cada una de las funciones armónicas que forman la señal. Para una señal dada, el espectro de fase sirve para determinar la dirección del movimiento de un instrumento respecto a la de otro. Por ejemplo, si se tienen instrumentos orientados paralelamente, estarán en fase o misma dirección (ángulo de fase = 0 grados), en caso contrario estarán fuera de fase o dirección opuesta (ángulo de fase = 180 grados)

3.4 FUNCIONES DE TRANSFERENCIA.

El movimiento de la cimentación en las edificaciones durante un evento sísmico, induce desplazamientos, velocidades y aceleraciones en cada uno de los niveles de la superestructura, que producen desplazamientos relativos en columnas, trabes y losas.

El conocimiento descriptivo del comportamiento del terreno en algún sitio de interés y de la transmisión de energía a través de los elementos estructurales en una edificación, debido a la acción de las ondas sísmicas transferidas sobre ellos, permite generar un modelo que represente este comportamiento, mediante el cual se pueda evaluar el movimiento de la cimentación y los diversos niveles que forman la estructura.

Este modelo está formado por funciones que representan la transmisión de energía desde el punto inicial de las ondas sísmicas llamado foco (cuando existe un sismo) hasta el punto final que en el caso de una edificación es la azotea. Para llegar a conocer como se transmiten las ondas sísmicas desde el foco hasta la azotea, debemos de colocar puntos de referencia en el camino de éstas donde se pueda tomar información concisa, real y de importancia.

Entonces podemos llegar a conocer como se transmiten estas ondas de un punto de referencia a otro y representarlo a través de funciones de acuerdo a las propiedades del suelo o de materiales sobre los cuales se transmitan éstas. A estas funciones les llamamos Funciones de Transferencia.

Si se toma como referencia la figura 3.7, cuando se origina un movimiento en la zona de falla, se generan ondas que se transmiten a través de las formaciones geológicas existentes, desde el foco hasta el sitio de Interés, este punto final podemos representarlo mediante el punto de referencia al cual llamamos “Campo libre” que es un sitio en la superficie cercano a la edificación en estudio y en donde podemos llamar a su función de transferencia con la letra D.

A partir del punto de referencia Campo libre podemos relacionar la transmisión de las ondas hacia la cimentación o a la base del edificio con las funciones de transferencia C y E en donde interviene el manto rocoso y donde existe lo que llamamos interacción suelo-estructura lugar en el cuál se modifican las características del movimiento de “campo libre” por la existencia de la cimentación y superestructura del edificio, debido a la radiación de la estructura hacia el subsuelo y por procesos de reflexión de ondas al alcanzar la superficie del terreno, así el movimiento en “campo libre” resulta diferente al de la cimentación y al de la base del edificio. Estas funciones son dependientes del tipo de subsuelo, de las características de la estructura, del movimiento general de la superestructura, así como de la rigidez de la cimentación.

Es preferible plantear la función de transferencia entre campo libre y la base de la superestructura, para englobar todos los efectos de interacción suelo-estructura.

También podemos plantear la función de transferencia que va desde la base de la superestructura a cualquier piso tipo del edificio, donde en el diagrama que a continuación se presenta le llamamos función de transferencia A y terminar planteando la función de la planta tipo a la azotea, con el nombre de función de transferencia S.

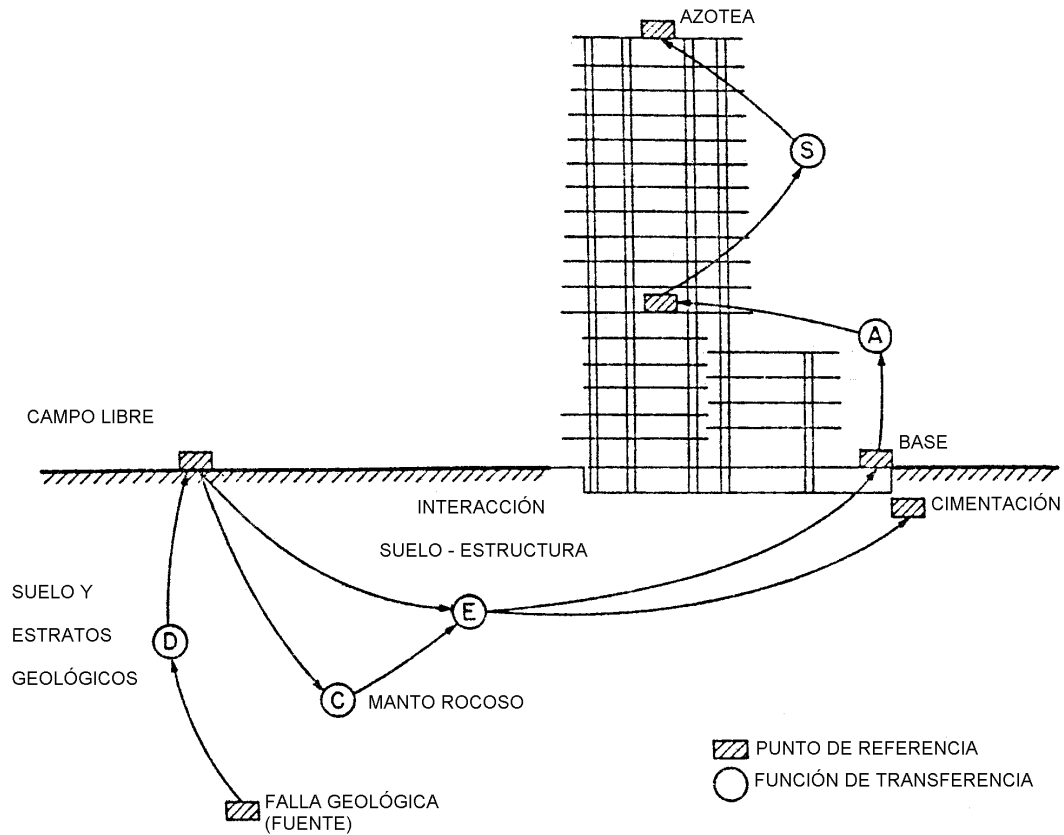


Fig. 3.7 Modelo representativo de las funciones de transferencia en el sistema estructural.

Podemos decir entonces que estimar la función de transferencia de un punto a otro sirve para reconocer las diferencias de la fuente de dos sismos registrados en una misma estación o la función de amplificación o deamplificación relativa entre dos sitios ocurrida durante un mismo temblor.

Entonces, podemos llamar al punto de referencia inicial del cual vamos a plantear la función de transferencia como señal de entrada, nombrándola con la letra I y al punto de referencia final al cual planteamos la función de transferencia le vamos a llamar señal de salida y lo nombramos con la letra O y finalmente a una función de transferencia cualquiera la llamamos H.

Todas estas son funciones del tiempo y se encuentran en el dominio de las frecuencias, entonces la función de transferencia la podemos calcular mediante una simple división de la salida entre la entrada, o si tenemos cualquier otra única incógnita, simplemente se realiza un simple despeje:

$$H = \frac{O}{I}$$

H . FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA

I . SEÑAL DE ENTRADA

O . SEÑAL DE SALIDA

3.5 PROPIEDADES DINÁMICAS

Con ayuda de las bases teóricas sobre el Análisis de Fourier y aplicándolas al estudio de las propiedades dinámicas de estructuras, al analizar los espectros de Fourier, espectros de potencia, funciones de transferencia, amplitud, fase y otros parámetros obtenidos por medio de la instrumentación y por programas computacionales especializados en estos temas, podemos determinar las características dinámicas de un sistema estructural, como son las frecuencias de vibración, las formas modales y los niveles de amortiguamiento.

3.5.1 Determinación de frecuencias

La determinación de las frecuencias propias de una estructura se realiza tomando como base al espectro de Fourier, obtenido al aplicar algún método como la FFT a las muestras registradas de los instrumentos de medición. Se puede pensar que las frecuencias asociadas a los “picos” que se identifican en este espectro, corresponden a las frecuencias propias de la estructura, pero pueden corresponder a las frecuencias características de la excitación y “ruido” .

Para poder realizar un análisis de estas señales más eficaz, se deben de tener conocimientos previos sobre el rango de valores en los que la estructura se puede encontrar en cuanto a sus correspondientes periodos de vibrar. Comúnmente se tienen valores previos aproximados sobre los posibles valores de las frecuencias de la estructura en estudio, como por ejemplo los resultados que obtenemos de la modelación matemática de la estructura y también por medio de conocimientos empíricos adquiridos sobre la práctica profesional, como la estimación del periodo de un edificio multiplicando el número de niveles por 0.1.

Como se vio, el espectro de potencia se obtiene al elevar al cuadrado los valores de amplitud del espectro de Fourier para cada correspondiente frecuencia, así los valores “altos” de amplitud crecen y los valores mas pequeños se reducen aún mas, esto ayuda en poder reconocer con mayor facilidad los “picos” que contienen los valores de frecuencia que nos interesa analizar. Por ello para el análisis de señales nos apoyamos más en este tipo de espectros.

El que exista “ruido” dentro de estos espectros de potencia, nos obliga a tomar en cuenta diferentes parámetros para poder estar seguros que determinadas frecuencias corresponden a las formas de vibrar de la estructura; estos parámetros son la función de coherencia, la fase y la función de transferencia.

La función de coherencia como ya se mencionó nos permite saber si una señal del sistema fue originada por una señal de entrada en su base. Tiene un valor de cero a uno, mientras mas cercano al valor de uno nos de cómo resultado ésta, mayor será la confiabilidad de que la señal se debe a la de entrada, este parámetro puede ser el primer indicativo de que la frecuencia este o no asociada al comportamiento del edificio.

La fase es un indicador del movimiento que experimenta un punto de medición respecto a otro. El rango de éste parámetro es de cero a 180, cuando el valor es muy próximo a cero, decimos que los dos puntos comparados se mueven en el mismo sentido y cuando se aproxima a 180 se mueven en sentido opuesto.

El comportamiento dinámico de una estructura puede no sólo depender de una frecuencia de vibrar, esto depende de la propiedad de rigidez con que cuente ésta. En estructuras poco rígidas o flexibles podemos encontrar un mayor número de formas modales que en las estructuras cuyas características las hacen contar con mayor rigidez.

La determinación de formas modales se puede apreciar en función de los desplazamientos de los niveles respecto a un nivel de referencia.

3.5.2 Determinación del nivel de amortiguamiento

Para calcular el nivel de amortiguamiento en una estructura existen diferentes formulaciones entre las cuales podemos mencionar el método de la amplificación en resonancia, el método de decremento logarítmico, el de la curva de resonancia, el método de Kawasumi y Shima (Fig. 3.8), entre otros.

De acuerdo a la calidad de la señales registradas en las estructuras se elige el método para el cálculo de su amortiguamiento, en este caso se describirá el método de Kawasumi y Shima.

El método de Kawasumi y Shima utiliza espectros de potencia definidos claramente y con buena resolución.

Las siguientes ecuaciones son las utilizadas en este método:

$$\xi = \frac{A}{2} \left(1 - \frac{3A^2}{8} \right)$$

$$A = \left(\frac{w_2^2 - w_1^2}{w_2^2 + w_1^2} \right) \div \sqrt{(\lambda - 1)}$$

Los valores de w_1 y w_2 se obtienen al trazar una línea horizontal a una altura de Y_{\max}/λ en el espectro de potencia. Comúnmente el valor de λ es utilizado con valor de 2.

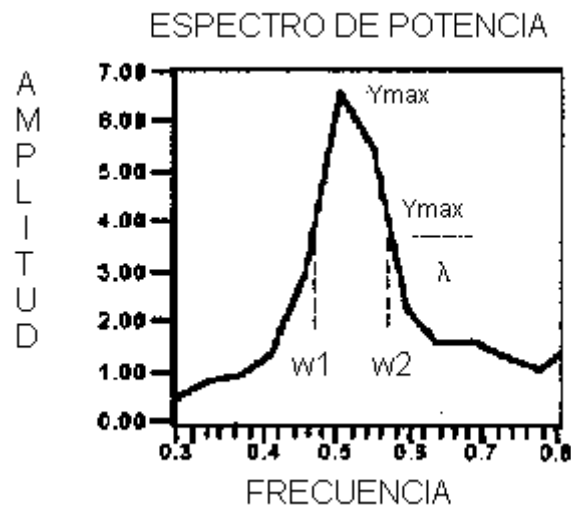


Fig. 3.8 Método de Kawasumi y Shima para el cálculo del amortiguamiento

3.5.3 *Instrumento virtual*

El análisis de señales obtenidas de los acelerógrafos colocados en el edificio en estudio, se realizó con ayuda de un programa de cómputo llamado "instrumento" desarrollado en el ambiente LabView, fig. 3.9, en el cuál se analiza una señal de entrada y otra de salida; la señal de entrada corresponde a los registros que tomó un acelerógrafo en cierto nivel inferior y la de salida al de un nivel superior. Para identificar las frecuencias de vibrar asociadas a la estructura se realiza una comparación sobre el comportamiento de estas dos señales, utilizando los espectros de Fourier y de Potencia que nos envía este programa en la pantalla, en donde comienza el verdadero análisis de señales en el que el ingeniero estructurista debe tener los conocimientos teóricos necesarios para identificar las frecuencias de interés.

El programa "instrumento" genera las gráficas de coherencia, fase y espectro cruzado, parámetros que como se mencionó permiten determinar si ciertos valores de frecuencia corresponden a los de las propiedades dinámicas de la estructura en estudio; además el programa nos muestra una gráfica de la correspondiente función de transferencia entre las dos señales comparadas. Para llevar a cabo estos análisis es recomendable que los ejes de las abcisas (frecuencias) en las gráficas se dispongan en los mismos intervalos. Así podemos analizar las señales y obtener la información que requiramos, comparando los puntos (señales) en donde se hayan colocado los acelerógrafos.

Se puede decir que con la instrumentación de las edificaciones se obtiene una descripción realista y en tiempo real de su comportamiento dinámico, mediante la aplicación del Análisis de Fourier sobre el registro de aceleraciones que se obtienen de equipos instalados en los diferentes niveles de este.

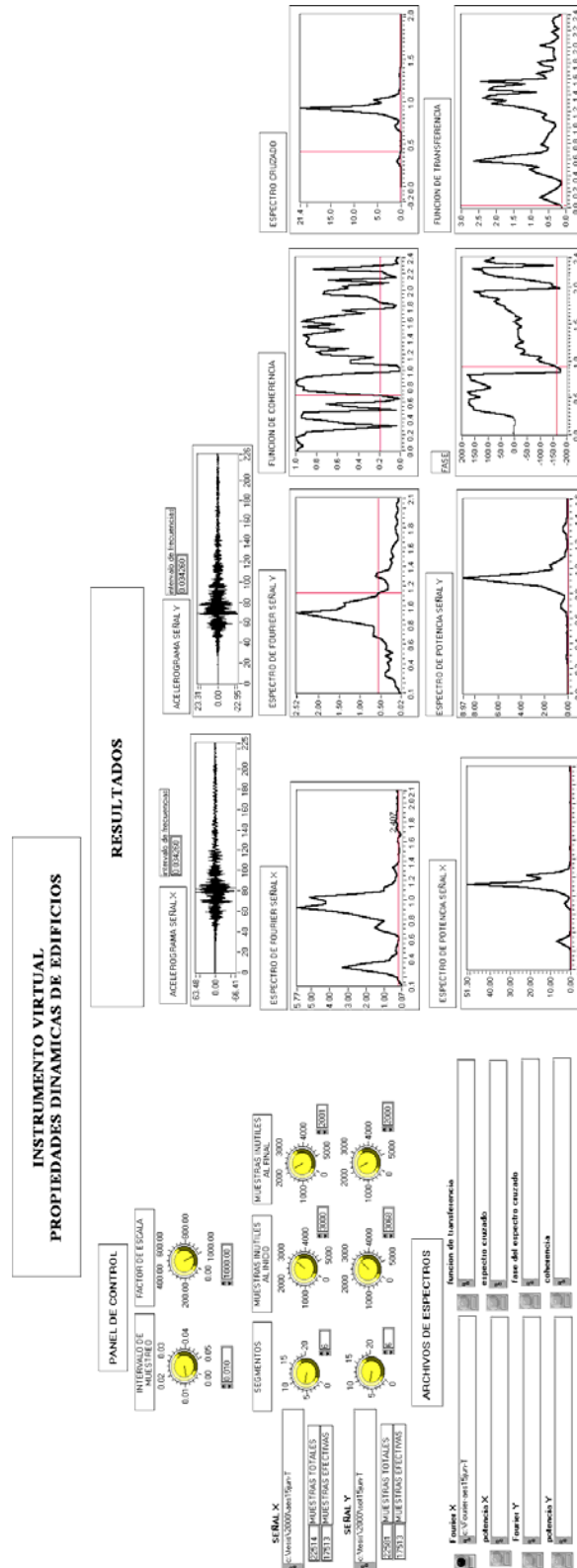


Fig 3.9. Panel del analizador de espectros virtual para el análisis de señales

CAPITULO 4
MODELADO ESTRUCTURAL DEL EDIFICIO

CAPÍTULO 4 MODELADO ESTRUCTURAL DEL EDIFICIO

4.1 ANÁLISIS SÍSMICO DE EDIFICIOS

Los métodos de análisis sísmico más populares prescritos por los reglamentos de diseño y empleados en la práctica son generalmente muy simplificados y recurren a idealizaciones de la acción sísmica mediante sistemas de fuerzas estáticas equivalentes.

Un edificio o cualquier estructura responde a una excitación sísmica descrita por una historia de aceleraciones (o de velocidades o de desplazamientos) que se presentan en el suelo sobre el que está desplantada, mediante una vibración a través de la cuál disipa la energía que es generada por dicho movimiento. La amplitud de la vibración necesaria para disipar esa energía depende de las características del sistema constituido por el conjunto subsuelo-cimentación-estructura-elementos no estructurales.

Las características de la respuesta de una estructura ante una sollicitación sísmica pueden ilustrarse bajo el principio de un sistema simple de un grado de libertad en donde, según la figura 4.1 el resorte se representa por una columna cuya rigidez lateral equivale a la constante del resorte. Cuando el sistema está sujeto a un movimiento de su base, definido por una historia de desplazamientos, u_0 , o de aceleraciones del suelo ' u' ', la masa entrará en oscilación y generando tres tipos de fuerzas:

- a) La fuerza de inercia que, de acuerdo con el principio de D'Alambert es proporcional a la masa y a la aceleración total que ésta sufre ' u'_T '; esta última es igual a la suma de la aceleración del terreno ' u'_0 ' mas la masa relativa al terreno, ' u' '.

$$F_I = m * \ddot{u}_T \quad 4.1$$

- b) La fuerza que se genera en la columna por su rigidez lateral al tratar de ser desplazada con respecto al terreno.

Suponiendo que la respuesta de la columna se mantiene dentro de un intervalo lineal, dicha fuerza será igual al producto del desplazamiento relativo de la masa con respecto al suelo, por la rigidez lateral de la columna.

$$F_R = ku \quad 4.2$$

- c) La fuerza de amortiguamiento que trata de reestablecer el equilibrio de la estructura en vibración. Esta fuerza puede considerarse proporcional a la velocidad de la masa con relación al suelo; al factor de proporcionalidad se le llama amortiguamiento.

$$F_A = c * \dot{u} \quad 4.3$$

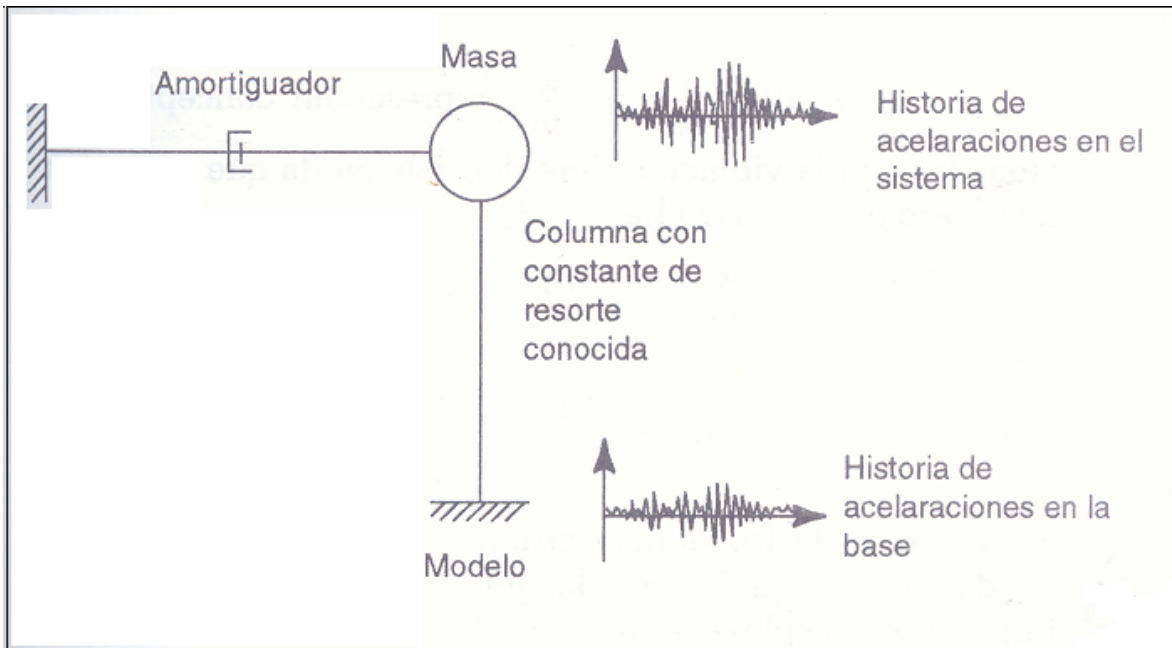


Figura 4.1 Modelo de un sistema de un grado de libertad

La ecuación de equilibrio dinámico para este sistema se escribe como:

$$F_I + F_A + F_R = 0 \quad 4.4$$

Sustituyendo

$$m\ddot{u}_T + c\ddot{u} + ku = 0 \quad 4.5$$

o, ya que,

$$\ddot{u}_T = \ddot{u}_0 + \ddot{u} \quad 4.6$$

$$m\ddot{u} + c\ddot{u} + ku = -m\ddot{u}_0 \quad 4.7$$

o, dividiendo entre m,

$$\ddot{u} + \frac{c}{m}\ddot{u} + \frac{k}{m}u = \ddot{u}_0 \quad 4.8$$

Las dos constantes, c/m y k/m , representan conceptos relacionados con la vibración libre del sistema (la que corresponde al caso ' $u'_0=0$ '). De ellas,

$$\frac{k}{m} = \omega^2 \quad 4.9$$

o,

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad 4.10$$

en que ω es la frecuencia circular del sistema no amortiguado, o sea aquella con la que oscila éste cuando se le impone un desplazamiento y se le suelta. Cuando el amortiguamiento es nulo el sistema describe un movimiento armónico simple (fig. 4.2), con la frecuencia mencionada y con un periodo igual a;

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}} \quad 4.11$$

El amortiguamiento representa la disipación de energía que la estructura realiza principalmente debido a fricción interna de los materiales y a rozamiento entre los componentes de la construcción; este amortiguamiento reduce las oscilaciones.

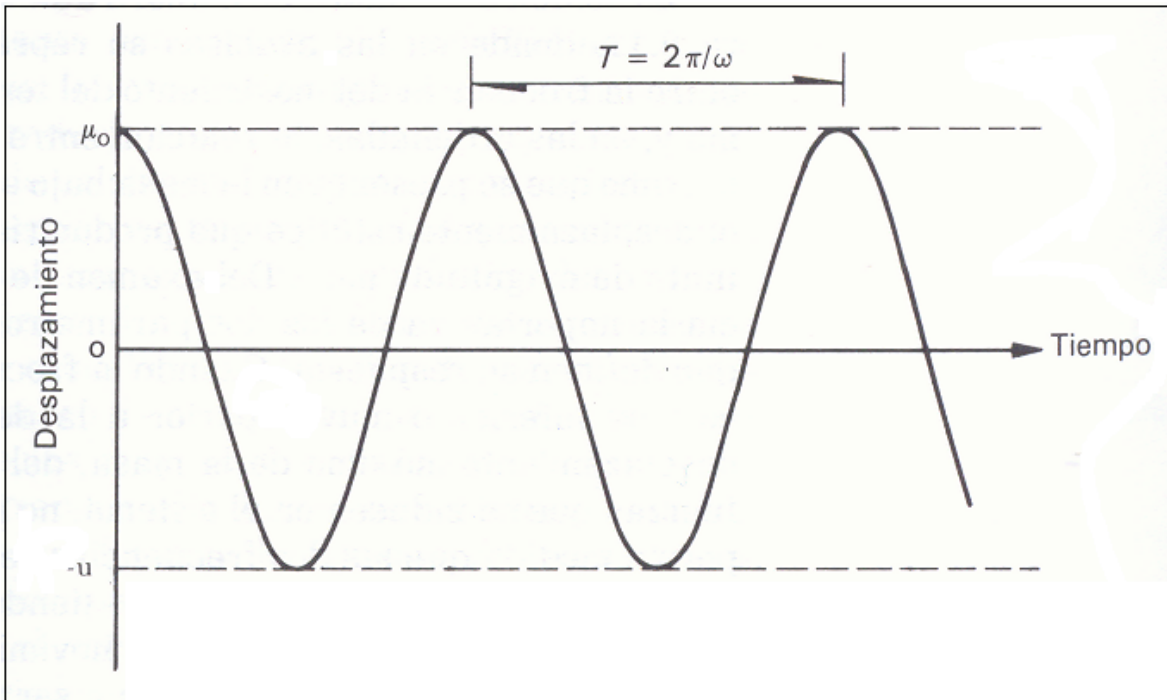


Fig. 4.2 Movimiento armónico simple

La expresión que representa el movimiento armónico según la figura 4.2 es:

$$\ddot{u}_0 = a \cdot \text{sen} \omega_0 t \quad 4.12$$

La solución se ilustra de manera adimensional en la figura 4.3, donde en las abscisas se representa la relación entre la frecuencia del movimiento del terreno y la del sistema y, en las ordenadas, la relación entre el desplazamiento máximo que se presenta en la masa bajo efectos dinámicos y el desplazamiento estático que produciría una fuerza constante de magnitud “ma”. De la fig. 4.3, se aprecia la importancia de los dos parámetros de la estructura que definen su respuesta. Cuando la frecuencia del sistema es muy inferior o muy superior a la excitación, el desplazamiento máximo de la masa, del que dependen las fuerzas que se inducen en el sistema, no excede al estático; pero a medida que las dos frecuencias se van aproximando entre sí (o sea cuando la relación tiende a uno), hay una amplificación cada vez mayor del movimiento del terreno y el desplazamiento en la masa llega a ser varias veces superior al del terreno y se inducen en el sistema fuerzas muy grandes.

De hecho, cuando la relación de frecuencias es igual a uno, el desplazamiento del sistema llega a infinito si el amortiguamiento es nulo y se presenta el fenómeno llamado de resonancia. El amortiguamiento desempeña también un papel muy importante, especialmente en condiciones cercanas a la resonancia; basta un amortiguamiento relativamente pequeño para reducir drásticamente la respuesta del edificio.

La respuesta de un sistema ante un movimiento irregular del terreno como el que ocurre en un sismo, en el caso de un edificio se puede analizar a partir de la solución del estudio del movimiento armónico. Un acelerograma de un sismo se puede considerar como la superposición de manera aleatoria de un gran número de ondas armónicas que cubren una gama de frecuencias muy amplia, pero que suelen tener amplitudes muy grandes sólo durante un intervalo de periodos dominantes que depende del tipo de sismo. Ante esa serie de ondas de diferente periodo, el sistema responde con mayor amplitud a las que tienen periodo similar al suyo, mientras que para el resto la respuesta es pequeña.

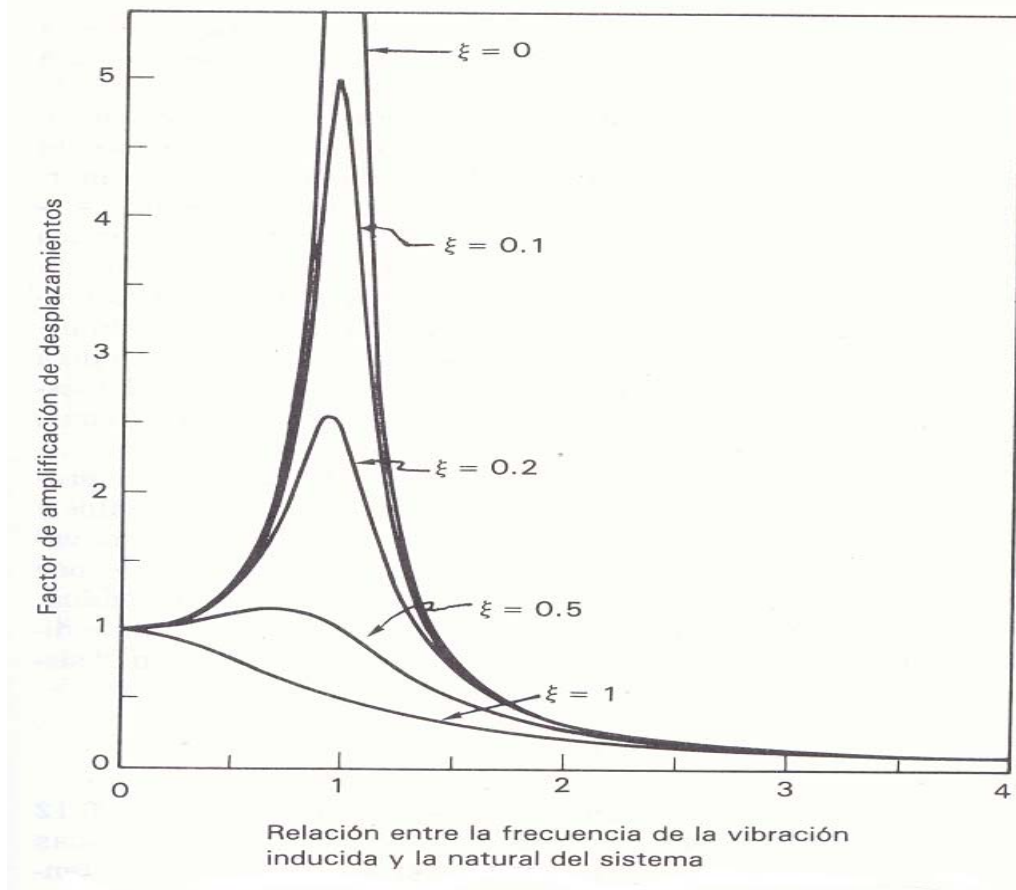


Fig. 4.3 Amplificación dinámica del movimiento de un sistema lineal de un grado de libertad sujeto a vibración armónica.

4.1.1 Análisis Modal

Ante la acción de un impulso y suponiendo que no existe amortiguamiento, la estructura vibrará libremente adoptando una configuración de desplazamientos que se denomina forma modal y con una frecuencia de vibración peculiar de cada modo. Existen tantos modos como número de grados de libertad tiene el sistema.

El primer modo, o modo fundamental, se caracteriza por no mostrar puntos de inflexión y por tener la frecuencia mas baja (el periodo mas largo). Al pasar a los modos superiores, la configuración presenta cada vez un nuevo punto de inflexión y el periodo natural va disminuyendo. Interesa conocer la respuesta del sistema de varios grados de libertad ante una excitación sísmica cualquiera impuesta en su base. Al excitar el sistema, cada modo responde como un sistema independiente de un grado de libertad y la respuesta total será la combinación de las respuestas independientes de cada modo, multiplicada cada una por un factor de participación.

El desplazamiento del piso i se obtendrá, por tanto, como la suma de las participaciones de cada modo a dicho desplazamiento

$$u_i = \sum_{n=1}^N \phi_{in} Y_{in}(t) \quad 4.13$$

en que $Y_{in}(t)$ es el desplazamiento en el nivel i del modo n en el instante t y ϕ_{in} es el factor que define la escala a que interviene el modo n en el movimiento del nivel i .

La mayoría de la energía en el sismo se absorbe por oscilaciones en los primeros modos de vibración, así en el caso de un edificio de muchos grados de libertad, el análisis se simplifica notablemente, ya que basta para las estructuras regulares, determinar la respuesta ante los tres primeros modos para tener una idea muy precisa de la respuesta total. Al igual que en un sistema de un grado de libertad, aquí también para fines de diseño estructural, lo que mas interesa es la máxima respuesta que tiene la estructura ante la excitación sísmica.

Este máximo se puede determinar de manera aproximada a partir de los máximos de las respuestas de cada modo; sin embargo, los máximos de cada modo no ocurrirán en un mismo instante ni tendrán un mismo signo, por tanto la respuesta máxima será menor que la suma de las respuestas espectrales de cada modo. Con base en un estudio probabilista de la respuesta, Rosenblueth ha propuesto (ver Ref. 2) que la máxima respuesta del sistema se determine como la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de las respuestas modales. Con este criterio, se calcula primero la respuesta del sistema en cada modo de vibración, R_i

(esta respuesta puede ser desplazamiento lateral de un nivel o la fuerza interna en una sección determinada). La respuesta máxima en cada modo puede determinarse directamente del espectro de aceleraciones o velocidades para la frecuencia natural del modo en cuestión, idealizando la estructura como una serie de sistemas de un grado de libertad. La respuesta total se calcula posteriormente como:

$$R_R = \left(\sum_{i=1}^N R_i^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad 4.14$$

4.1.2 Ecuaciones de Equilibrio Dinámico para un Sistema de Varios Grados de Libertad

En su mayoría las estructuras no se prestan para ser idealizadas como un sistema de un grado de libertad y las podemos suponer compuestas por una serie de masas concentradas (bajo el concepto de “diafragma rígido”) unidas por resortes, en el caso particular de un edificio, las masas se encuentran concentradas en cada piso y los resortes representan la rigidez lateral de cada entrepiso (Fig 4.4). En el equilibrio de cada entrepiso intervienen los mismos tipos de fuerzas que en el sistema de un grado de libertad pero en que las variables representan vectores y matrices.

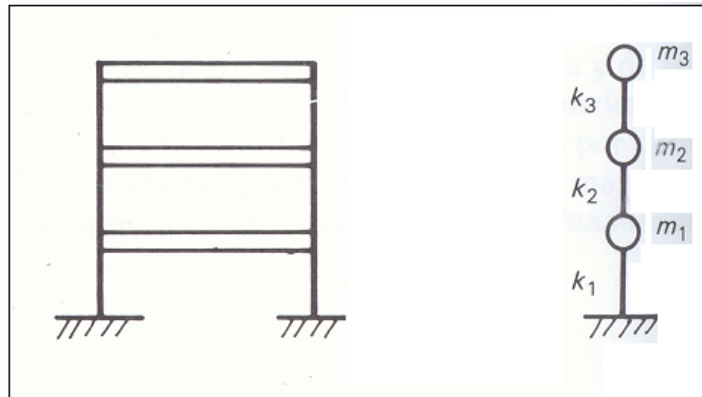


Fig. 4.4 Representación de un edificio por un sistema de varios grados de libertad.

El cuál es un sistema de tres grados de libertad cuyos apoyos tienen un movimiento $s(t)$ y cuyas masas m_1 , m_2 , y m_3 tienen desplazamientos u_1 , u_2 y u_3 respectivamente.

Las tres fuerzas que intervienen en el equilibrio de cada entrepiso son:

- Fuerza de Inercia.- Es proporcional a la matriz de masas M, y al vector de aceleraciones absolutas \ddot{u}_T , en donde las aceleraciones absolutas son iguales a la suma del vector de aceleración del terreno \ddot{u}_G , mas el de la aceleración relativa del terreno \ddot{u}_o tal que:

$$F_I = M \cdot \ddot{u}_T \quad 4.15$$

F_I .- Fuerza de Inercia
 M .- Matriz diagonal de masas
 \ddot{u}_T .- Vector de aceleraciones absolutas

- Las fuerzas que se generan en los elementos estructurales verticales debidas a su rigidez lateral, igual al producto del vector de desplazamiento relativo de la masa con respecto del suelo, por la matriz de rigideces laterales de dichos miembros:

$$F_R = K \cdot u \quad 4.16$$

F_R .- Fuerza de Rigidez
 K .- Matriz de Rigideces
 u .- Vector de desplazamientos relativos

- Fuerza de Amortiguamiento.- Trata de restablecer el equilibrio de la estructura en vibración, proporcional al vector de velocidad de la masa de la estructura con respecto del suelo y al amortiguamiento viscoso disponible, como una proporción del critico; a C se le conoce como matriz de amortiguamiento, que por ser igual en todos los entresijos se vuelve una constante, tal que:

$$F_A = C \cdot \dot{u} \quad 4.17$$

Así la ecuación de equilibrio dinámico se puede escribir como:

$$F_I + F_A + F_R = 0 \quad 4.18$$

:

La ecuación de equilibrio toma la misma forma que un sistema de un grado de libertad, aunque ahora se trata de una ecuación matricial:

$$M \dot{u} + Cu + Ku = -M \ddot{u}_G \quad 4.19$$

El primer paso para la solución de esta ecuación diferencial es resolver el caso de vibración libre con amortiguamiento nulo que permite determinar con buena aproximación los periodos de vibración y formas modales.

Por lo tanto la ecuación diferencial se reduce a :

$$M \dot{u} + Ku = 0 \quad 4.20$$

Suponiendo que no existe amortiguamiento, la estructura vibrara libremente adoptando una configuración de desplazamientos que se denomina forma modal y con una frecuencia peculiar de cada modo. Existen tantos modos como numero de grados de libertad tiene el sistema. En vibración libre, el movimiento es armónico simple:

$$u = a \cdot \text{sen}(\omega \cdot t) \quad 4.21$$

en que “a” representa la amplitud de vibración. Nuevamente la ecuación se expresa en forma matricial, u es un vector de desplazamientos y “a” un vector de constantes de amplitud.

Por lo tanto derivando se tiene :

$$\ddot{u} = -\omega^2 \cdot a \cdot \text{sen}(\omega \cdot t) \quad 4.22$$

y sustituyendo en la ecuación diferencial:

$$Ka - \omega^2 \cdot M \cdot a = 0 \quad 4.23$$

Para que “a” sea diferente de cero se requiere:

$$| K - \omega^2 \cdot M | = 0 \quad 4.24$$

Esta ecuación se resuelve con métodos numéricos estándar y permite encontrar los N valores de la frecuencia ω que corresponden a cada modo natural de vibración del sistema (uno por cada masa concentrada que compone el sistema). Conocidos los N valores de ω se pueden determinar los N valores de a_i que corresponden a cada frecuencia natural y que determinan la forma modal correspondiente.

Como se menciona en el capítulo 4 de este trabajo el desplazamiento del piso i se obtiene como la suma de las participaciones de cada modo de vibración a dicho desplazamiento:

$$u_i = \sum_{n=1}^N \phi_{in} Y_{in}(t) \quad 4.25$$

en que $Y_{in}(t)$ es el desplazamiento en el nivel i del modo n en el instante t y ϕ_{in} es el factor que define la escala a que interviene el modo n en el movimiento del nivel i.

4.1.3 Métodos de Análisis Sísmico

Existen diversos procedimientos para calcular las sollicitaciones que el sismo de diseño introduce en la estructura. Los métodos aceptados por las normas tienen distinto nivel de refinamiento y se subdividen en dos grupos: los de tipo estático y los dinámicos. En los primeros se aplica a la estructura un sistema de cargas laterales cuyo efecto estático se supone equivalente al de la acción sísmica. En los segundos se realiza un análisis de la respuesta dinámica de un modelo generalmente simplificado.

Desde hace algunos años se han venido poniendo a disposición de los proyectistas programas de cómputo muy poderosos para el análisis sísmico de estructuras. La lista de programas de dominio público es muy larga y, para mencionar sólo algunos de los más conocidos, citaremos el STRUDL, el ETABS y el SAP. Programas como los mencionados realizan el análisis sísmico tridimensional estático o dinámico de estructuras a base de barras, placas, cascarones y otros tipos de elementos, con lo cual es posible modelar de manera muy detallada la estructura y obtener una estimación precisa de su respuesta.

Métodos de análisis estático

Los métodos de este tipo se basan generalmente en la determinación de la fuerza lateral total (cortante en la base) a partir de la fuerza de inercia que se induce en un sistema equivalente de un grado de libertad, para después distribuir esta cortante en fuerzas concentradas a diferentes alturas de la estructura, obtenidas suponiendo que ésta va a vibrar esencialmente en su primer modo natural. El RCDF acepta el uso del método estático en estructuras de altura no mayor de 30 m. Debe, sin embargo, evitarse su empleo en estructuras que tengan geometrías muy irregulares en planta o elevación, o distribuciones no uniformes de masas y rigideces.

Métodos de análisis dinámico

En los métodos dinámicos se realiza una idealización de la estructura a base de masas y resortes como en el ejemplo de la figura 4.1. Nuevamente, si se emplean métodos automatizados de análisis, la modelación puede ser muy refinada, de lo contrario debe recurrirse a un modelo muy simplista.

El método dinámico más empleado en la práctica es el modal o, más propiamente, el análisis modal con técnicas de espectro de respuesta. El RCDF especifica este método, aceptando que se analice en forma independiente la vibración de traslación en dos direcciones ortogonales sin tomar en cuenta los efectos de torsión. Éstos deben determinarse independientemente con el procedimiento indicado para el método estático y después superponerse.

Se determinan los tres primeros modos de traslación, y todos aquellos adicionales que tengan un periodo mayor que 0.4 s. Para calcular la participación de cada modo natural en las fuerzas laterales que actúan sobre la estructura, se considera la aceleración correspondiente al espectro de diseño reducido por ductilidad y para el periodo particular del modo en cuestión. La superposición de las fuerzas modales se realiza con la expresión 4.14.

Otro método dinámico que se ha empleado para el análisis de estructuras muy importantes es el análisis paso a paso, o sea la integración directa de las ecuaciones de movimiento, para una excitación correspondiente a un acelerograma representativo del sismo de diseño. El procedimiento, además de su laboriosidad, presenta dificultades para tomar en cuenta el comportamiento inelástico y para definir el acelerograma de diseño.

4.2 Criterios de análisis y diseño estructural

En vista de que las solicitaciones que un sismo severo impone a las estructuras son muy elevadas y de carácter muy aleatorio, no es económicamente factible diseñar para que las construcciones resistan sin daño alguno un sismo con un periodo de recurrencia muy grande. El nivel de seguridad que se debe adoptar depende del costo de los daños esperados, relativo al que implica incrementar la seguridad de la estructura. En diseño sismorresistente debe aceptarse una probabilidad mayor de que ocurran daños ante las acciones convencionales, si se quiere evitar una inversión excesiva en la estructura.

Por esas razones los criterios de diseño sismorresistente especificados por los reglamentos modernos reconocen, implícita o explícitamente, que el objetivo de sus procedimientos es limitar la probabilidad de un colapso ante sismos intensos, aún a costa de daños severos y, sólo para sismos moderados, se pretende que la estructura permanezca intacta.

El primero y fundamental objetivo del diseño sismorresistente es proporcionar a la estructura la capacidad para disipar la energía que se induce en ella durante un sismo severo sin que esta sufra colapsos o daños irreparables. Esta capacidad puede lograrse proporcionando a la estructura una resistencia muy alta que le permita resistir el sismo manteniendo su comportamiento esencialmente dentro de límites elásticos, o puede obtenerse también diseñándola para que tenga una resistencia mucho menor, pero con propiedades de ductilidad que le permitan disipar la energía introducida por el sismo.

El sismo no puede inducir fuerzas mayores que la estructura misma puede soportar; lo importante es diseñar la estructura para que tenga propiedades tales que las fuerzas que en ella se pueden inducir estén limitadas por la capacidad de modos de falla dúctiles, de manera que no sea posible que las fuerzas alcancen valores que produzcan modos de falla indeseables de tipo frágil. En esta forma algunas secciones con gran capacidad de rotación actúan como “fusibles” e impiden el daño a elementos muy críticos y la ocurrencia de tipos de falla particularmente graves.

El segundo objetivo del diseño es evitar daños y pánico a los ocupantes durante sismos de intensidad moderada que pueden ocurrir varias veces durante la vida de la construcción. Este objetivo debería cumplirse revisando que la estructura permaneciera elástica y con deformaciones laterales pequeñas ante un sismo menor que el que se emplea para revisar los estados límite de falla, este sismo de menor intensidad se llamaría “sismo de servicio o de operación”.

Las normas de diseño no especifican en general dos análisis distintos para el sismo de diseño por resistencia y para el de servicio, sino que aceptan se realice sólo el análisis para el sismo de diseño y se hagan correcciones para tomar en

cuenta que la intensidad del sismo para el cual se quiere proteger contra deformaciones excesivas es menor que la del sismo de diseño.

Para cumplir este segundo objetivo, la estructura debe poseer esencialmente una adecuada rigidez ante cargas laterales. A este aspecto no suele prestársele la importancia que amerita, lo cuál redundaría en que muchas construcciones modernas, aunque resulten seguras ante el colapso, sufran con excesiva frecuencia daños cuantiosos por sismos de mediana intensidad, debido a su excesiva flexibilidad. Las tres propiedades esenciales que rigen el buen comportamiento sísmico son resistencia, rigidez y ductilidad ante cargas laterales. No es fácil cumplir simultáneamente con las tres, ya que en general las características que hacen a una estructura muy rígida y resistente, la hacen también poco dúctil.

La acción sísmica de diseño debería corresponder a una intensidad que tiene un periodo de retorno determinado con base en un procedimiento de optimización que tome en cuenta el costo de hacer más resistente la estructura y las consecuencias de la falla. Distintos códigos aducen que sus valores especificados están basados en intensidades sísmicas con periodos de recurrencia que van desde 50 hasta 500 años para las estructuras comunes. Parece que en la mayoría de los casos dichos valores se han derivado más de ajustes sucesivos con base en el comportamiento observado de las estructuras comunes que de un análisis racional de riesgo sísmico.

CAPITULO 5
ESTUDIO DE VIBRACIÓN AMBIENTAL PARA LA
DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES DINAMICAS DEL
EDIFICIO.

CAPITULO 5

ESTUDIO DE VIBRACIÓN AMBIENTAL PARA LA DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES DINÁMICAS DEL EDIFICIO.

En este capítulo se describen de manera muy resumida los resultados obtenidos del estudio de vibración ambiental para determinar las propiedades dinámicas del edificio en estudio.

5.1 ACTIVIDADES

Las actividades que fueron necesarias para llevar a cabo el estudio de vibración ambiental, fueron:

- Desarrollo de un modelo lineal preliminar de la estructura del edificio en el programa SAP2000 con fines de definir la estrategia de medición mas adecuada y los puntos en los que se instalaron los instrumentos para las pruebas de medición, bajo las cargas correspondientes a un flujo vehicular característico sobre las avenidas circundantes y al viento.
- Verificación y calibración de los equipos de medición de acuerdo con su ubicación en el edificio.

En esta actividad se revisó el funcionamiento y se calibraron los parámetros dinámicos en los equipos de medición para el registro de las señales sísmicas. Se determinaron los niveles de sensibilidad mínimos para los cuales se registrarán las señales en los puntos de medición (umbral de disparo) . La definición de estos niveles es dependiente del “ruido” o excitaciones locales existentes en el edificio, para evitar la saturación de la memoria de almacenamiento de los instrumentos por el disparo continuo de estos.

- Calibración de un sistema de medición de señales formado por dos o mas instrumentos de registro (acelerómetros) operando de manera síncrona y con un controlador de disparo simultáneo.

Para estudiar el comportamiento del edificio ante excitaciones producidas por ruido ambiental, fue de especial interés que las señales registradas en los equipos de medición tuvieran un tiempo común de inicio, ya que al ser la respuesta del edificio variable en el tiempo, esta característica de las señales es de vital importancia para identificar correctamente la estructura del edificio. Por ello, fue necesario interconectar los equipos a través de un dispositivo de control electrónico.

- Registro de señales en los puntos de medición seleccionados.

Para cada equipo el registro de señales se realizó en tres direcciones ortogonales (dos horizontales y una vertical), las cuales se almacenaron momentáneamente en la memoria de estado sólido del instrumento. Posteriormente las señales fueron extraídas mediante una computadora personal para su análisis y procesamiento.

- Identificación de las propiedades dinámicas de la estructura empleando técnicas basadas en el Análisis de Fourier.

Mediante el análisis en el dominio de la frecuencia de la información registrada, se determinaron las frecuencias propias de la estructura, los amortiguamientos y modos de vibrar correspondientes. En el proceso de la información se utilizó un programa de análisis de señales (instrumento virtual) desarrollado en el ambiente LabView.

5.2 INSTRUMENTACIÓN EMPLEADA

5.2.1 *Dispositivo instrumental*

El dispositivo instrumental que se utilizó consistió de instrumentos de registro marca Terra Technology (Foto 5.1). Cada instrumento tiene un servoacelerómetro (de alta sensibilidad), que registra directamente los movimientos vibratorios en tres direcciones ortogonales en los puntos de medición seleccionados. Estos movimientos se transforman internamente en señales eléctricas en función de niveles de voltaje directamente proporcionales a las señales de entrada y se almacenan en dispositivos de memoria de estado sólido que permite su recuperación vía puerto serial o módem, utilizando equipos de computo personales.

Entre las partes que componen cada instrumento se encuentra: un acondicionador de señales, los preamplificadores, los filtros y los amplificadores; los primeros son de utilidad en la amplificación de la señal obtenida del sensor, ya que generalmente en el caso de vibraciones ambientales es muy débil; los segundos se emplean para eliminar las señales producidas por distintas fuentes de “ruido” espúreas ajenas al experimento, mismas que dificultan las tareas de identificación de las señales de interés, y los terceros para amplificar las señales a niveles apropiados para su interpretación y procesamiento. Adicionalmente estos instrumentos tienen un convertidor analógico digital de los registros de voltaje. La siguiente tabla (Tabla 5.1) muestra las características de los equipos de medición utilizados:

Tabla 5.1 Características de los equipos de medición de señales

Medio de Registro	Memoria de estado sólido
Sensores	Servoacelerómetros Triaxiales internos
Frecuencia natural	30.0 Hz
Amortiguamiento	0.70 del crítico
Sensibilidad	(+-) 0.25 g. 0.50 g. y 1.00 g.
Memoria de preevento	4.0 s
Memoria de postevento	15.0 s
Tiempo total de registro	15.0 minutos
Velocidad de muestreo	100.0 muestras/s/canal
Longitud de palabra del conversor A/D	12 bits, 11 + signo
Rango dinámico	72 Db
Umbral de disparo	Ajustable
Referencia de tiempo	Reloj interno, 1×10^4 y marcas externas
Alimentación	12 VCD, cargador y batería automotriz en flotación



Foto 5.1 Instrumento de registro marca Terra Technology (acelerógrafo).

5.2.2 Elección de los puntos de medición del inmueble

Con base en la distribución de elementos estructurales y características del edificio principal, se seleccionaron diversos puntos de medición distribuidos en la planta y elevación para realizar el estudio de vibración ambiental.

Para llevar a cabo el registro de señales se seleccionaron puntos de medición distribuidos en el sótano, niveles 3, 8, 14 y 20 colocados estratégicamente en planta sobre dichos niveles, además incluyó mediciones de campo libre para obtener los espectros de sitio correspondientes e identificar la posible interacción suelo-estructura, como se muestra en las figuras 5.1 y 5.2

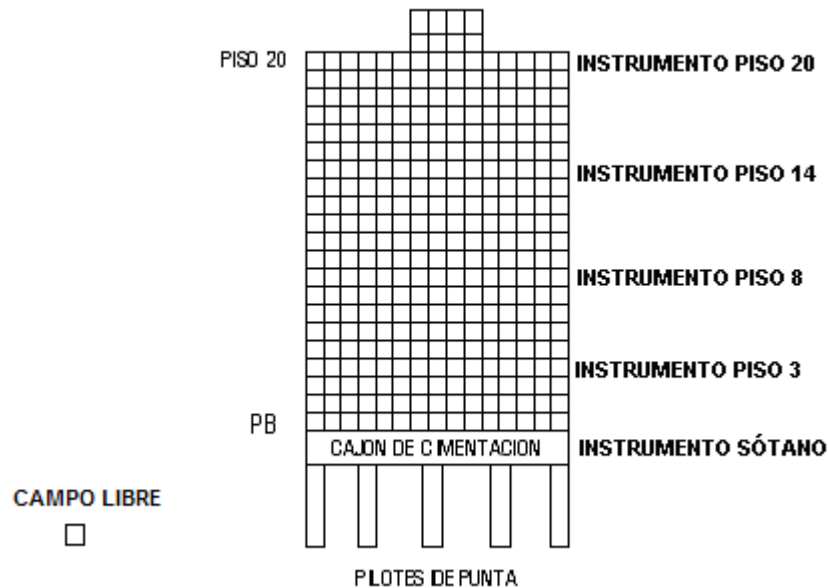


Fig. 5.1 Distribución de los niveles en el edificio de Reforma 116 para la medición.

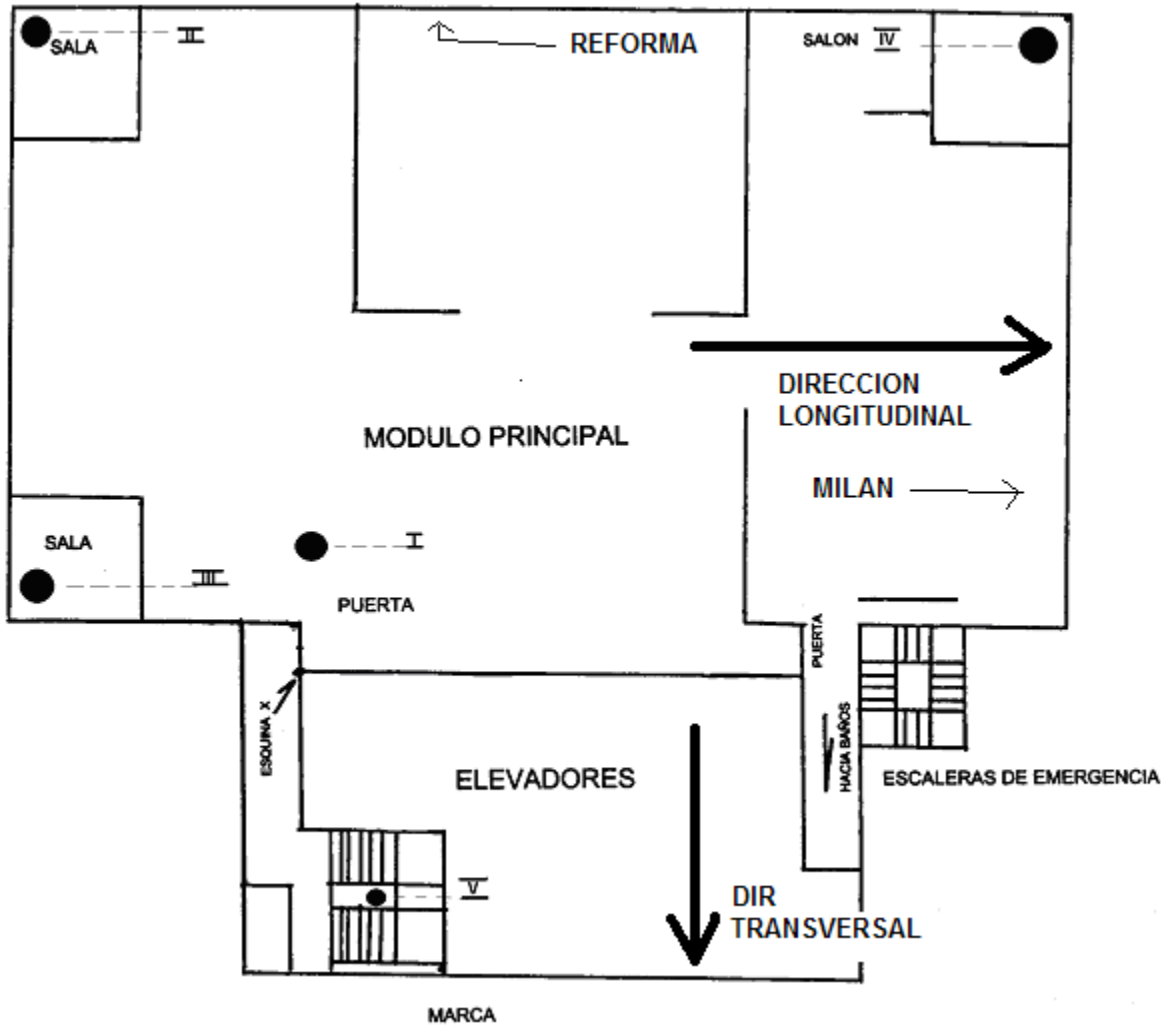


Fig. 5.2 Distribución en planta de los puntos de medición en el edificio de Reforma 116

5.3 PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE SEÑALES

5.3.1 Procesamiento de señales.

Al ser colocados los instrumentos en sus diferentes puntos de medición, se determinan los niveles de sensibilidad para la cual se registran las señales (umbral de disparo), dependiendo del ruido o excitaciones locales existentes en el edificio, después se calibra un sistema con el cual operen de manera síncrona los instrumentos con ayuda de un dispositivo de control electrónico (controlador de disparo). El acceso al sistema se logra a través de un equipo maestro del cual es posible comunicarse al resto de los equipos, es importante mencionar que estos equipos registran las señales en tres direcciones ortogonales y que estos toman muestras a cada determinado intervalo de tiempo, el intervalo de muestreo en este caso fue de 100 muestras/s/canal.

Las señales que nos registran los acelerógrafos se respaldan en una computadora portátil o vía modem por medio de una computadora distante, para ello cada instrumento cuenta con una memoria de estado sólido de donde son extraídos los datos por las computadoras. Estas computadoras registran las señales en sus diferentes direcciones en formato binario a través del programa AllView que es el que controla el funcionamiento de los equipos, donde es posible visualizar las señales registradas y hacer un análisis preliminar de las mismas.

El programa AllView utiliza una nomenclatura especial para identificar las señales registradas, en la cual los tres primeros caracteres corresponden al nombre de la estación en donde se encuentra ubicado el equipo, los siguientes tres indican la fecha del evento de medición con base en el calendario juliano y los dos últimos corresponden al número de evento registrado durante ese día.

Como se mencionó estas señales son procesadas por el programa AllView en formato binario, a las cuales se les puede realizar por medio del mismo una serie de operaciones con el objeto de realizar un análisis preliminar, utilizando espectros de Fourier y de potencia. Para realizar un análisis más detallado de las señales, los archivos binarios manejados en este programa pueden ser regrabados con una función del mismo en formato ASCII, el cual nos entrega las tres señales ortogonales de cada medición en un procesador de texto. Estas señales se separan en cada componente y están listas para ser analizadas en el programa llamado "instrumento virtual" que se programó empleando las herramientas del ambiente LabView (National Instruments, 1998).

5.3.2 Análisis de señales

Para realizar el análisis de las señales se toma como base el espectro de Fourier que es el resultado de haber aplicado la transformada discreta de Fourier a las señales obtenidas por los acelerógrafos en el dominio del tiempo y transformarlas al dominio de las frecuencias, que no es mas que una grafica de amplitud contra frecuencia. Estas frecuencias son el resultado de la descomposición de la señal en sus componentes de distintas frecuencias, así éstas componentes superpuestas y “sumadas” nos darían como resultado la señal original.

Con el objeto de observar con mayor claridad las frecuencias dominantes del espectro de Fourier, se obtiene el espectro de Potencia al elevar al cuadrado las amplitudes de este espectro, debido a esto las frecuencias dominantes se amplifican y las que no figuran se reducen aún mas. Del espectro de Potencia son identificadas las formas modales, además por medio de este espectro se calcula el porcentaje de amortiguamiento crítico de la estructura.

El programa instrumento virtual nos calcula y muestra la correspondiente gráfica de parámetros importantes en el análisis de señales como son la coherencia, la fase, el espectro cruzado y la función de transferencia que son útiles en la comparación de dos señales de diferente instrumento pero correspondientes al mismo momento de registro(de un punto de medición a otro), una de “entrada” y otra de “salida”. Estas señales se comparan debido a que en ocasiones no basta con analizar las amplitudes del espectro de potencia para el cálculo de las frecuencias de resonancia de la estructura.

La función de coherencia es útil para saber si la señal del sistema(salida) fue originada por una señal de entrada en su base, tiene un rango de valores de cero a uno, al acercarse mas al valor de cero nos indica que la frecuencia contiene una importante presencia de ruido y al valor de uno nos refleja una alta probabilidad de que la señal del sistema corresponde a la de entrada.

Con la parte compleja del espectro cruzado se puede encontrar el ángulo de fase entre los dos instrumentos, con esto se puede definir el orden de cada frecuencia identificada, debido a que la fase es un indicador del movimiento relativo que experimenta un punto de medición respecto a otro. El rango de este parámetro es de cero a ciento ochenta, cuando el valor es cercano a al valor de cero se dice que los puntos de medición van en la misma dirección, cerca del valor de ciento ochenta, se dirigen sentido contrario.

La función de transferencia se obtiene mediante el cociente de dos señales y es un indicador de la amplificación que se puede presentar entre un punto de medición y otro. Si se cuenta con un instrumento colocado en “campo libre” en el terreno circundante del edificio, haciendo uso de las funciones de transferencia, podemos obtener frecuencias y formas modales ignorando los efectos de

interacción suelo-estructura, realizando cocientes espectrales entre los pisos superiores y el terreno . En el capítulo 4 de este trabajo se explicó con detalle las funciones de transferencia.

En el manejo del espectro de Potencia en el análisis de señales se debe tomar en cuenta al iniciar esta etapa, que gran parte de las frecuencias dominantes no pertenecen a las propiedades dinámicas de la estructura, debido a que existen excitaciones locales y “ruidos” que son registrados por los instrumentos, por lo cual en determinados rangos de frecuencias estos predominan, generalmente en periodos muy cortos. Para iniciar el análisis de señales se deben conocer previamente los rangos aproximados de frecuencia en los que de acuerdo a las características propias de la estructura, encontremos probables valores reales.

El rango de valores aproximados de frecuencias propias de la estructura, se conoce previamente debido a conocimientos empíricos en la ingeniería, gracias a la práctica que se tiene en este tipo de estudios. También se tiene ya un valor aproximado por medio de los modelos estructurales que también con anterioridad se realizan.

Esta etapa termina con la identificación de los periodos fundamentales y formas modales de la estructura en estudio y demás características como el amortiguamiento crítico que nos definen las propiedades dinámicas de la misma.

En las figs 5.3 y 5.4 se presentan los espectros de potencia promedio obtenidos del análisis completo de las señales registradas en dos puntos diferentes de la azotea, donde se observan las frecuencias asociadas a los periodos de vibrar del edificio.

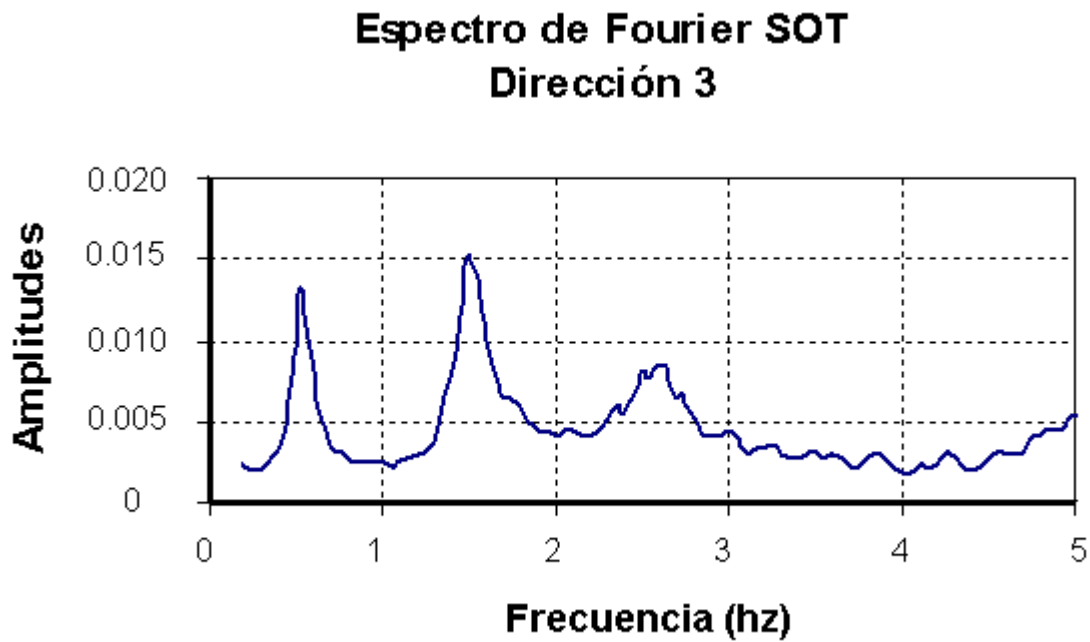
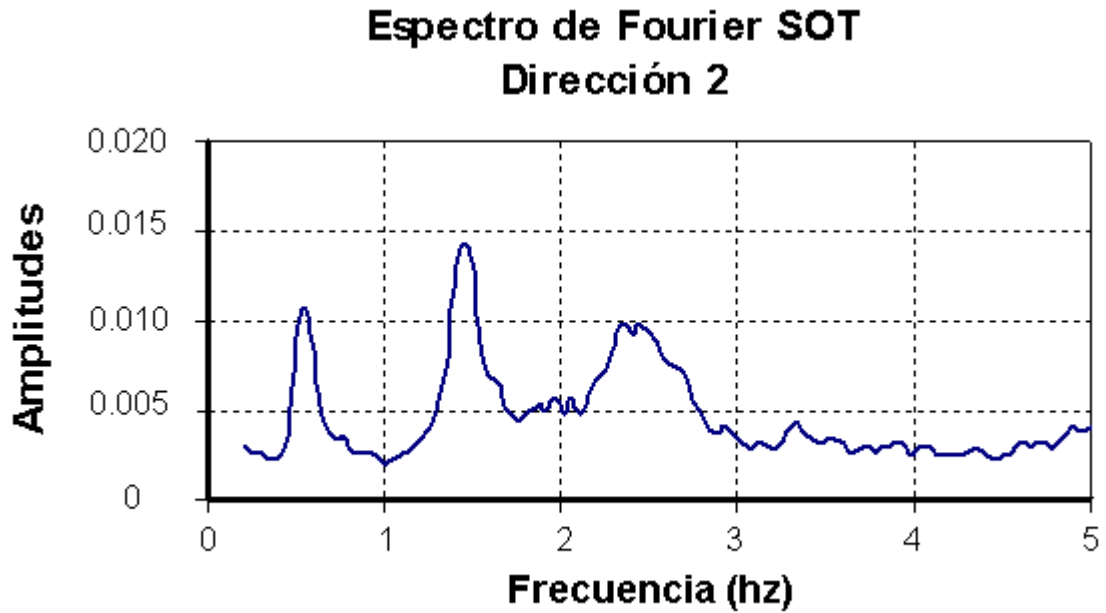


Figura 5.3 Espectros promedio de Fourier en las direcciones longitudinal (2) y transversal (3) del edificio ubicado en Av. Paseo de la Reforma 116, obtenidos de las señales registradas en la azotea.

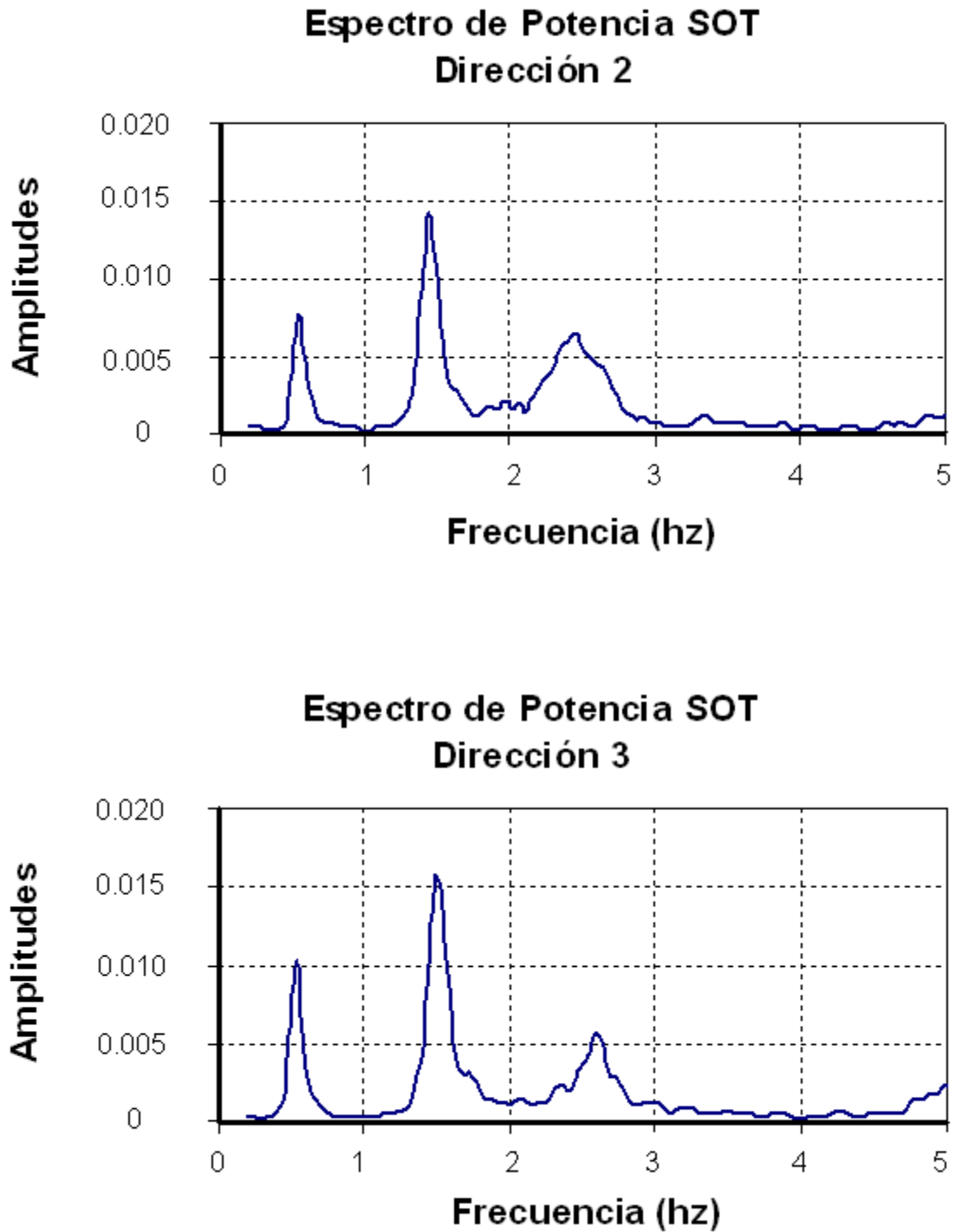


Figura 5.4. Espectros promedio de Potencia en las direcciones longitudinal (2) y transversal (3) del edificio ubicado en Av. Paseo de la Reforma 116, obtenidos de las señales registradas en la azotea.

5.4 RESULTADOS EXPERIMENTALES

5.4.1 *Propiedades dinámicas del edificio Reforma 116 en dirección transversal.*

De la figura 5.3 se identifican los siguientes valores de frecuencia y periodos de vibrar en la dirección longitudinal del edificio.

Frecuencias y periodos de vibrar.

Primer modo:

Frecuencia = 0.482 [ciclos/s]

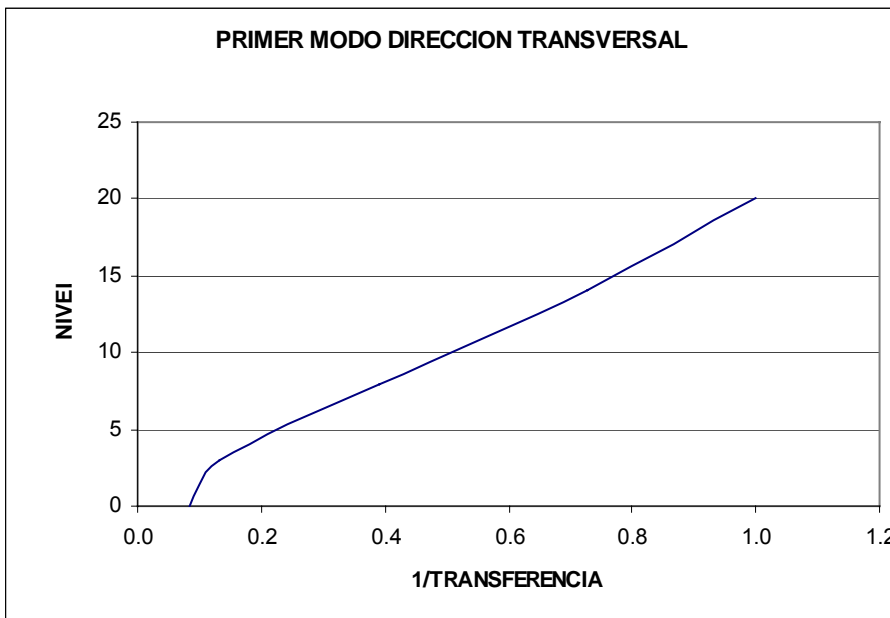
Periodo = 2.07 [s/ciclo]

Segundo modo:

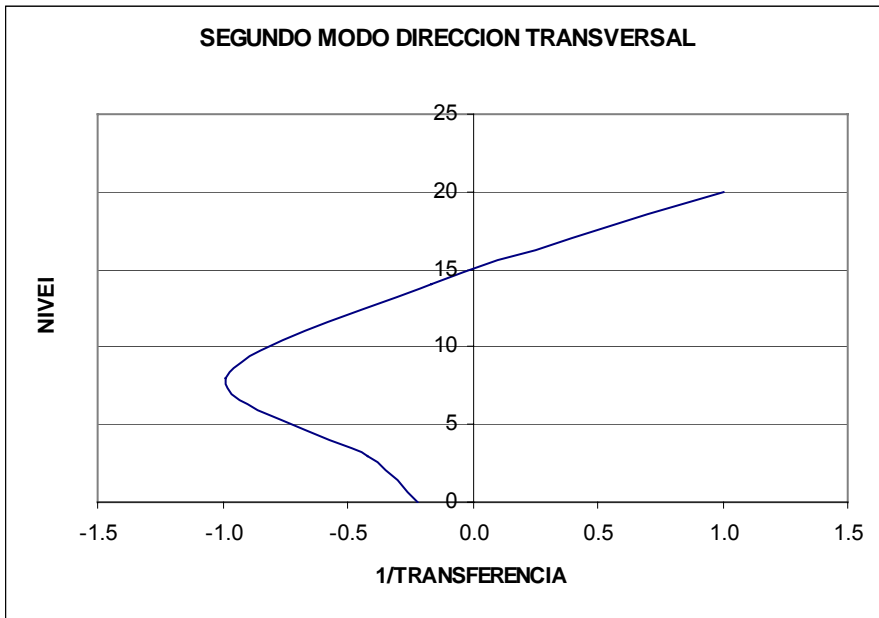
Frecuencia = 1.456 [ciclos/s]

Periodo = 0.687 [s/ciclo]

Formas modales:



PRIMER MODO	
1/transferencia	nivel
0.083	0
0.133	3
0.391	8
0.726	14
1.000	20



SEGUNDO MODO	
1/transferencia	nivel
-0.223	0
-0.421	3
-0.984	8
-0.163	14
1.000	20

Amortiguamiento

$$\xi = 7.29 \%$$

5.4.2 Propiedades dinámicas del edificio Reforma 116 en dirección longitudinal.

De la figura 5.4 se identifican los siguientes valores de frecuencia y periodos de vibrar en la dirección transversal del edificio.

Frecuencias y periodos de vibrar.

Primer modo:

Frecuencia = 0.475 [ciclos/s]

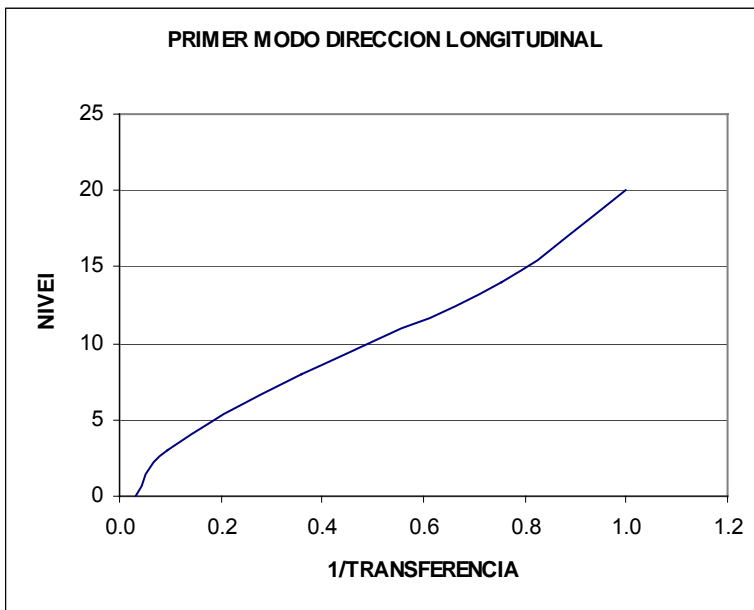
Periodo = 2.11 [s/ciclo]

Segundo modo:

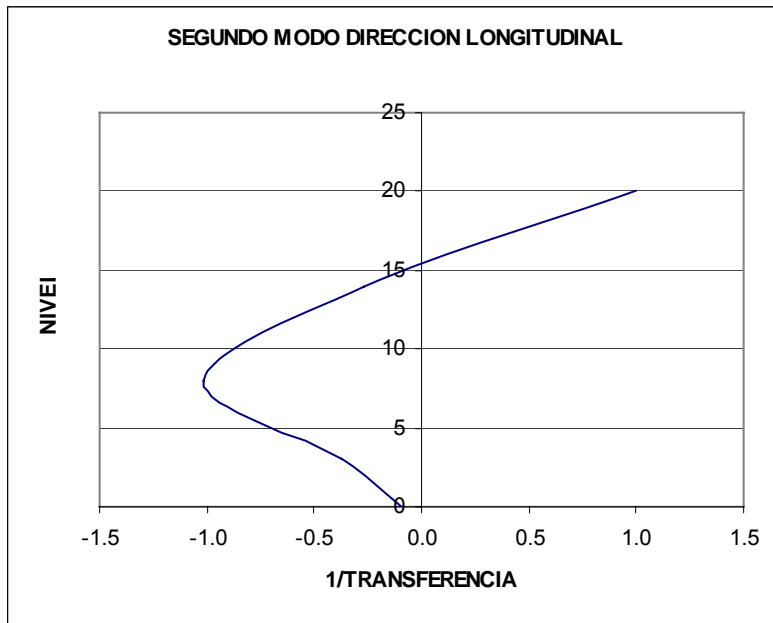
Frecuencia = 1.456 [ciclos/s]

Periodo = 0.690 [s/ciclo]

Formas modales:



PRIMER MODO	
1/transferencia	nivel
0.031	0
0.094	3
0.357	8
0.754	14
1	20



SEGUNDO MODO	
1/transferencia	nivel
-0.094	0
-0.377	3
-1.016	8
-0.269	14
1	20

Amortiguamiento

$$\xi = 9.61\%$$

5.4.3 Frecuencia y periodo de vibrar en torsión del edificio.

Frecuencia = 2.487 [ciclos/s]

Periodo = 0.402 [s/ciclo]

CAPITULO 6
COMPARACIÓN DE LAS PROPIEDADES DINAMICAS OBTENIDAS
ANALÍTICA Y EXPERIMENTALMENTE

CAPÍTULO 6 COMPARACIÓN DE LAS PROPIEDADES DINÁMICAS OBTENIDAS ANALÍTICA Y EXPERIMENTALMENTE.

En este capítulo se comparan los valores de frecuencias y periodos obtenidos experimentalmente y analíticamente para determinar si el modelo matemático desarrollado en el programa SAP2000 representa a la estructura real.

A continuación se presenta una tabla de resultados de periodos y frecuencias de vibrar correspondientes al edificio en estudio (Tabla 6.1), estos resultados son los obtenidos del programa de modelación matemática SAP2000 .

Tabla 6.1 Resultados teóricos de las frecuencias y periodos de vibrar del edificio en estudio.

TABLA: Periodos y Frecuencias Modales			
ANÁLISIS	MODO	Periodo	Frecuencia
		s	[ciclos/s]
FORMAS MODALES	Modo 1	2.027	0.493
FORMAS MODALES	Modo 2	1.896	0.527
FORMAS MODALES	Modo 3	0.875	1.142
FORMAS MODALES	Modo 4	0.717	1.393
FORMAS MODALES	Modo 5	0.553	1.805
FORMAS MODALES	Modo 6	0.398	2.511
FORMAS MODALES	Modo 7	0.266	3.753
FORMAS MODALES	Modo 8	0.250	3.996
FORMAS MODALES	Modo 9	0.183	5.444
FORMAS MODALES	Modo 10	0.170	5.848
FORMAS MODALES	Modo 11	0.145	6.850
FORMAS MODALES	Modo 12	0.138	7.208

Finalmente se puede realizar la comparación de resultados experimentales y teóricos de las frecuencias y periodos de vibrar propios del edificio (Tabla 6.2), de acuerdo a un estudio en dirección transversal y dirección longitudinal, correspondientes a los dos primeros modos de vibrar de la edificación.

Tabla 6.2 Comparativa de los resultados teóricos y experimentales del cálculo de periodos y frecuencias de vibrar de la estructura en estudio.

TABLA COMPARATIVA DE PERIODOS Y FRECUENCIAS					
DIRECCION	PERIODO [seg]		FRECUENCIA [Cic/seg]		MODO
	EXPERIMENTAL	TEORICA	EXPERIMENTAL	TEORICA	
TRANSVERSAL	2.07	2.03	0.48	0.49	1
	0.69	1.90	1.46	0.53	2
LONGITUDINAL	2.11	2.03	0.47	0.49	1
	0.69	1.90	1.45	0.53	2

Como puede observarse en la tabla anterior, la frecuencia asociada al periodo fundamental obtenida teóricamente, es prácticamente la misma que la obtenida experimentalmente. Sin embargo, para el segundo modo, las frecuencias difieren totalmente, posiblemente por la participación de elementos no estructurales en la rigidez lateral del inmueble.

CAPITULO 7
ANÁLISIS DINÁMICO DEL EDIFICIO

CAPÍTULO 7 ANÁLISIS DINÁMICO DEL EDIFICIO

7.1 ANÁLISIS DINÁMICO MODAL ESPECTRAL

El análisis dinámico modal se realiza llevando a cabo técnicas del espectro de respuestas. Nos interesa conocer los valores máximos de respuesta de la estructura ante vibraciones debidas al sismo, obteniendo esta respuesta máxima se pueden trazar gráficas de esta respuesta contra periodo que constituyen los espectros de respuesta.

7.1.1 Espectro de diseño del Reglamento de Construcciones del Distrito federal.

La forma general del espectro de diseño del Distrito Federal, según las Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo (NTC-DS), se presenta en la siguiente figura:

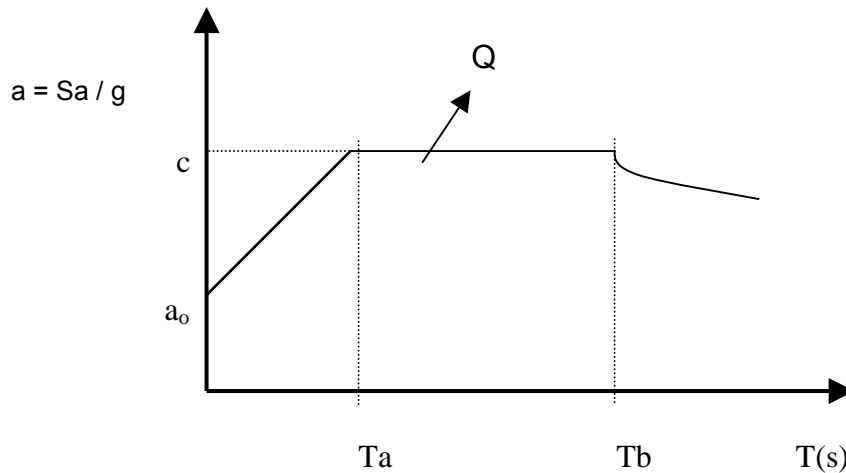


Fig. 7.1 Forma del espectro de diseño del Reglamento del Distrito Federal

La ordenada del espectro de aceleraciones para diseño sísmico, “a”, expresada como fracción de la aceleración de la gravedad, esta dada por las siguientes expresiones, según las NTC-DS:

$$a = a_0 + (c - a_0) \frac{T}{T_a} \quad \text{si, T es menor que } T_a$$

$$a = c \quad \text{si, T está entre } T_a \text{ y } T_b$$

$$a = qc \quad \text{si, T excede de } T_b$$

donde

$$q = \left(\frac{T_b}{T} \right)^r$$

En donde T es el periodo natural de vibración de la estructura, T_a y T_b son periodos característicos del espectro de diseño, según la zona sísmica; T, T_a y T_b están expresados en segundos, c es el coeficiente sísmico, que toma en cuenta la intensidad de la acción sísmica introducida en la estructura, en el sitio de interés; es la fracción del peso total de la estructura entre la fuerza lateral en la base de esta. El valor de c depende del riesgo sísmico del sitio, del tipo de suelo y del tipo de estructura.

La ciudad de México se ha dividido en tres zonas según el tipo de suelo y a su vez la zona III se ha subdividido en cuatro subzonas distintas (Fig 7.2), todas estas se presentan con su correspondiente valor de coeficiente sísmico en las siguientes tablas:

Zona	Características	C
I	Suelo duro, terreno firme a profundidades menores de 3 m	0.16
II	Zona de transición; terreno firme ubicado entre los 3 y 20 m	0.32
III	Suelo compresible; estrato resistente ubicado a mas de 20 m	0.30,0.40 y 0.45 según corresponda.

Zona	c	a ₀	T _a	T _b	r
I	0.16	0.04	0.2	1.35	1.0
II	0.32	0.08	0.2	1.35	1.33
III _a	0.40	0.10	0.53	1.8	2.0
III _b	0.45	0.11	0.85	3.0	2.0
III _c	0.40	0.10	1.25	4.2	2.0
III _d	0.30	0.10	0.85	4.2	2.0

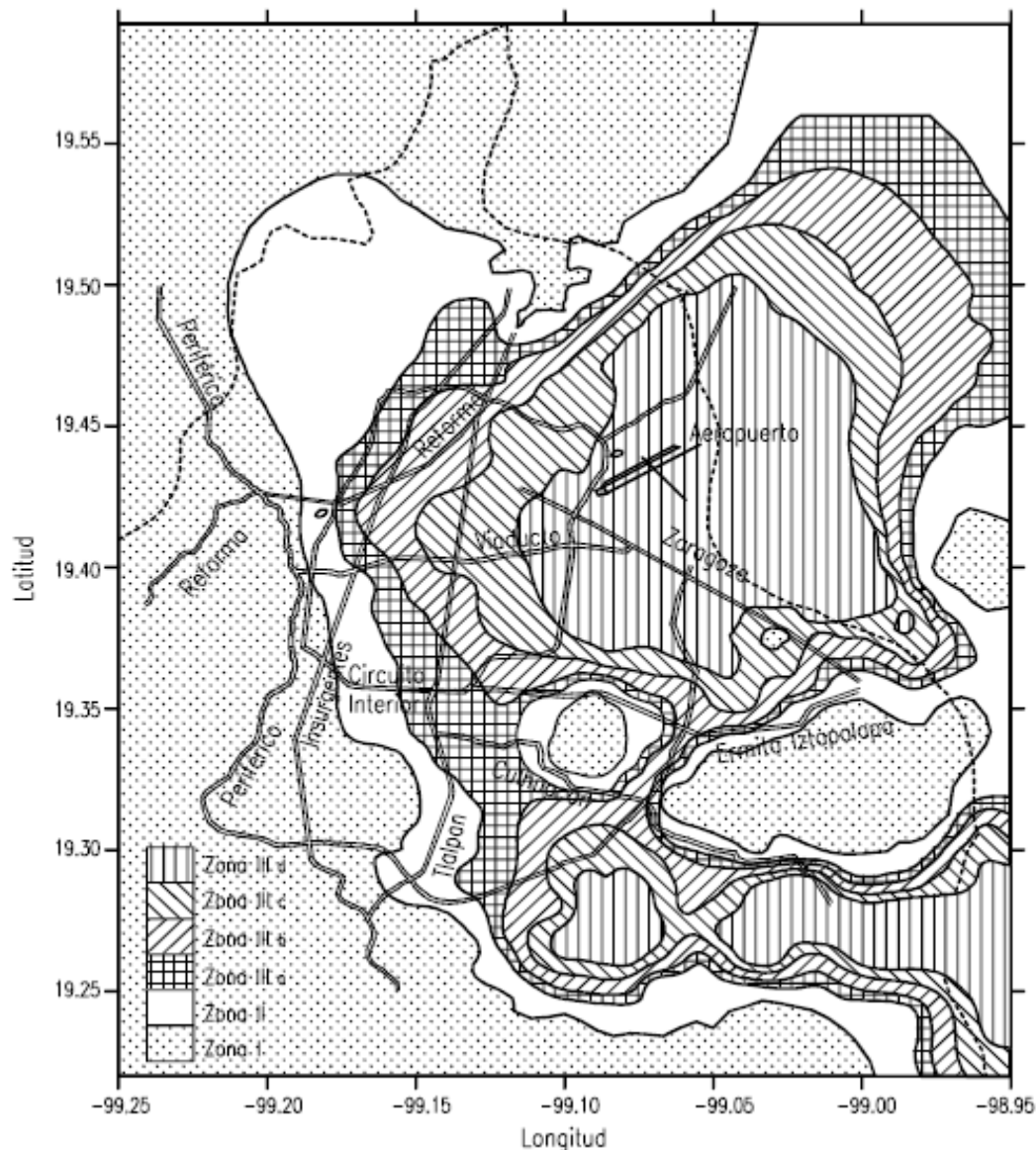


Fig. 7.2 Zonificación Sísmica del Distrito Federal

Para fines de diseño las fuerzas sísmicas se podrán reducir dividiéndolas entre el factor reductivo Q' , tomando en cuenta los efectos de la ductilidad a desarrollar por la estructura. Para las estructuras que satisfagan las condiciones de regularidad que fija la sección 6 de las NTC-DS, Q' se calculará como sigue:

$$Q' = Q \text{ si se desconoce } T \text{ o si este es mayor o igual a } T_a$$

$$Q' = 1 + \left(\frac{T}{T_a} \right) (Q - 1) \text{ si } T \text{ es menor que } T_a$$

Q' se deberá reducir por 0.8 en caso de que no se satisfagan las condiciones de regularidad que especifican la NTC-DS en su sección 6.

7.1.2 Revisión Por Cortante Basal

Las NTC-DS especifican que el cortante basal dinámico, V_{OD} , determinado con el método modal espectral, no debe ser menor que $\frac{0.8aW_0}{Q'}$; si lo anterior no ocurre, se incrementarán todas las fuerzas de diseño y desplazamientos laterales correspondientes en una proporción tal que V_{OD} , iguale a dicho valor.

7.1.3 Factor de Comportamiento Sísmico (Q)

En función de la capacidad de disipación o deformación que posea una edificación, las normas vigentes permiten hacer una reducción de fuerzas sísmicas. Se adoptarán los siguientes valores del factor de comportamiento sísmico Q según el RCDF:

I. Se usará $Q = 4$ cuando se cumplan los requisitos siguientes:

1. La resistencia en todos los entrepisos es suministrada exclusivamente por marcos no contraventeados de acero o concreto reforzado, o bien, por marcos contraventeados o con muros de concreto reforzado en los que en cada entrepiso los marcos son capaces de resistir, sin contar muros ni contravientos, cuando menos 50 por ciento de la fuerza sísmica actuante.
2. Si hay muros ligados a la estructura en la forma especificada en el caso I del artículo 204 del RCDF, éstos se deben tener en cuenta en el análisis,

pero su contribución a la capacidad ante fuerzas laterales sólo se tomará en cuenta si estos muros son de piezas macizas, y los marcos, sean o no contraventeados, y los muros de concreto reforzado son capaces de resistir al menos 80 por ciento de las fuerzas laterales totales sin la contribución de los muros de mampostería.

3. El mínimo cociente de la capacidad resistente de un entrepiso entre la acción de diseño no difiere en más de 35 por ciento del promedio de dichos cocientes para todos los entrepisos. Para verificar el cumplimiento de este requisito, se calculará la capacidad resistente en cada entrepiso teniendo en cuenta todos los elementos que puedan contribuir a la resistencia, en particular, los muros que se hallen en el caso I a que se refiere el artículo 204 del RCDF.
4. Los marcos y muros de concreto reforzado cumplen con los requisitos que fijan las normas complementarias correspondientes para marcos y muros dúctiles.
5. Los marcos rígidos de acero satisfacen los requisitos para marcos dúctiles que fijan las normas complementarias correspondientes.

II. Se adoptará $Q = 3$ cuando se satisfacen las condiciones 2, 4 y 5 del caso I y en cualquier entrepiso dejan de satisfacerse las condiciones 1 a 3 especificadas para el caso I, pero la resistencia en todos los entrepisos es suministrada por columnas de acero, por marcos de concreto reforzado con losas planas, por marcos rígidos de acero, por marcos de concreto reforzado, por muros de este material, por combinación de éstos y muros o por diafragmas de madera contrachapada. Las estructuras con losas planas deberán además satisfacer los requisitos que sobre el particular marcan las normas técnicas complementarias para estructuras de concreto.

III. Se usará $Q = 2$ cuando la resistencia a fuerzas laterales es suministrada por losas planas con columnas de acero o de concreto reforzado, por marcos de acero o de concreto reforzado, contraventeados o no, muros o columnas de concreto reforzado que no cumplen con algún entrepiso, los especificados por los casos I y II de esta sección, o por muros de mampostería de piezas macizas confinadas por castillos, dadas, columnas o trabes de concreto reforzado o de acero que satisfacen los requisitos de las normas complementarias respectivas, o diafragmas contruidos con duelas inclinadas o por sistemas de muros formados por duelas de madera horizontales o verticales combinados con elementos diagonales de madera maciza. También se usará $Q = 2$ cuando la resistencia es suministrada por elementos de concreto prefabricado o presforzado, con las excepciones que sobre el particular marcan las normas técnicas complementarias para estructuras de concreto.

IV. Se usará $Q = 1.5$ cuando la resistencia a fuerzas laterales es suministrada en todos los entrepisos por muros de mampostería de piezas huecas, confinadas o con refuerzo interior, que satisfacen los requisitos de las normas complementarias respectivas, o por combinaciones de dichos muros con elementos como los descritos para los casos II y III, o por marcos y armaduras de madera.

V. Se usará $Q = 1$ en estructuras cuya resistencia a fuerzas laterales es suministrada al menos parcialmente por elementos o materiales diferentes de los arriba especificados, a menos que se haga un estudio que demuestre, a satisfacción del Departamento, que se puede emplear un valor más alto que el que aquí se especifica.

En todos los casos se usará para toda la estructura en la dirección de análisis el valor mínimo de Q que corresponde a los diversos entrepisos de la estructura en dicha dirección.

El factor Q puede diferir en las dos direcciones ortogonales en que se analiza la estructura, según sean las propiedades de ésta en dichas direcciones.

El RCDF especifica que las ordenadas del espectro elástico se pueden reducir, para fines de diseño, dividiéndolas entre un factor Q' que es igual a Q para periodos mayores que cierto valor, y que decrece linealmente entre Q y 1 para periodos menores, como se aprecia en la figura 7.3 que muestra los espectros correspondientes a distintos valores de Q para construcciones en la zona III. Además, indica el RCDF que para construcciones con estructuración irregular debe reducirse a 80% el valor de Q' .

Los requisitos para la aplicación de los distintos valores de Q , son muy generales y deben ir aparejados a la observancia de otros más específicos de sistemas constructivos y materiales particulares.

Debe revisarse la estructura para la acción de dos componentes horizontales ortogonales del movimiento del terreno. Se considerará actuando simultáneamente el valor de diseño de un componente más 30 por ciento del valor de diseño del componente ortogonal. Ha sido costumbre considerar que la acción sísmica se ejerce en forma independiente de cada dirección, o sea revisar el efecto de la acción sísmica de diseño en una de las direcciones principales de la estructura, considerando que las fuerzas sísmicas son nulas en cualquier otra dirección.

En realidad el movimiento de terreno tiene componentes en las tres direcciones simultáneamente. El componente en una dirección horizontal es simultáneo a otros en la dirección horizontal ortogonal y en dirección vertical; sin embargo, la probabilidad de que coincidan en un mismo instante los máximos de más de un componente es despreciable. De un análisis probabilista del problema se determinó que simultáneamente al máximo en una dirección puede actuar 30 por ciento del máximo en otra ortogonal; de allí el requisito especificado por el RCDF e ilustrado en la figura 7.4.

La aplicación de este requisito da lugar a complicaciones severas en el análisis, especialmente cuando existen asimetrías en la estructuración. Por otra parte, en la mayoría de las estructuras es despreciable el efecto simultáneo del otro componente, así que el proyectista deberá evaluar inicialmente si el efecto es significativo en su caso particular para en caso contrario, ignorarlo en el análisis.

En los modelos que se ha estudiado la respuesta sísmica, han considerado que la estructura tenía únicamente movimientos de traslación. En realidad la estructura puede presentar además, movimientos de rotación en cada masa (figura 7.5) y un modelo más completo debería incluir ese grado de libertad mediante resortes de torsión en cada piso. La importancia de las rotaciones y la magnitud de las solicitaciones que por este efecto se inducen en la estructura dependen de la distribución en planta de las masas y de las rigideces laterales. Desde un punto de vista del equilibrio, la fuerza actuante por sismo en cada piso está situada en el centro de masa, mientras que la fuerza resistente lo está en el centro de torsión, o sea donde se ubica la resultante de las fuerzas laterales que resiste cada uno de los elementos. Si entre esos dos puntos existe una excentricidad, la acción en cada entrepiso estará constituida por una fuerza cortante más un momento torsionante cuyo efecto debe tomarse en cuenta en el diseño.

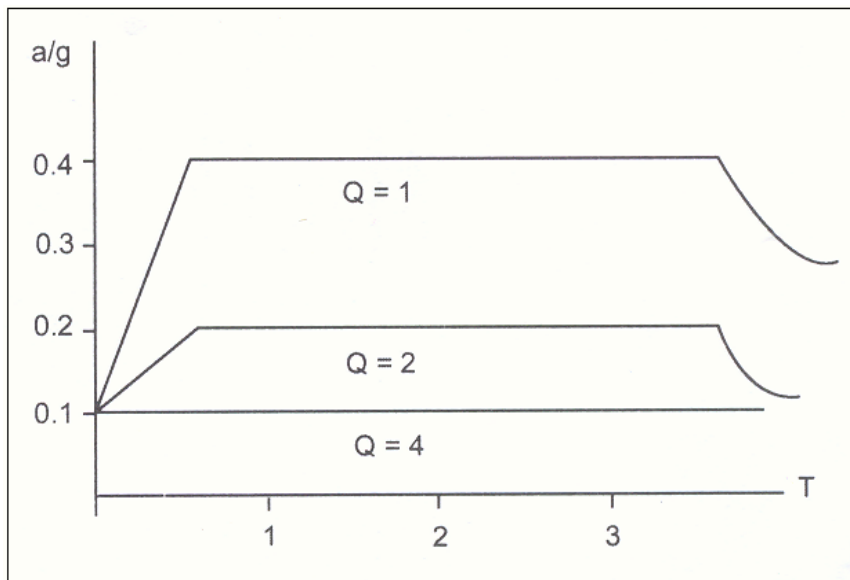


Fig. 7.3 Espectros para la Zona del Lago del D.F. reducidos para distintos factores de comportamiento sísmico.

Un análisis dinámico que incluya los efectos de torsión a través de la consideración de un grado de libertad de rotación en cada nivel resulta muy complicado y, para las estructuras comunes, el efecto de la torsión se suele considerar de manera estática superponiendo sus resultados a los de un análisis, estático o dinámico, de los efectos de traslación calculados de manera independiente.

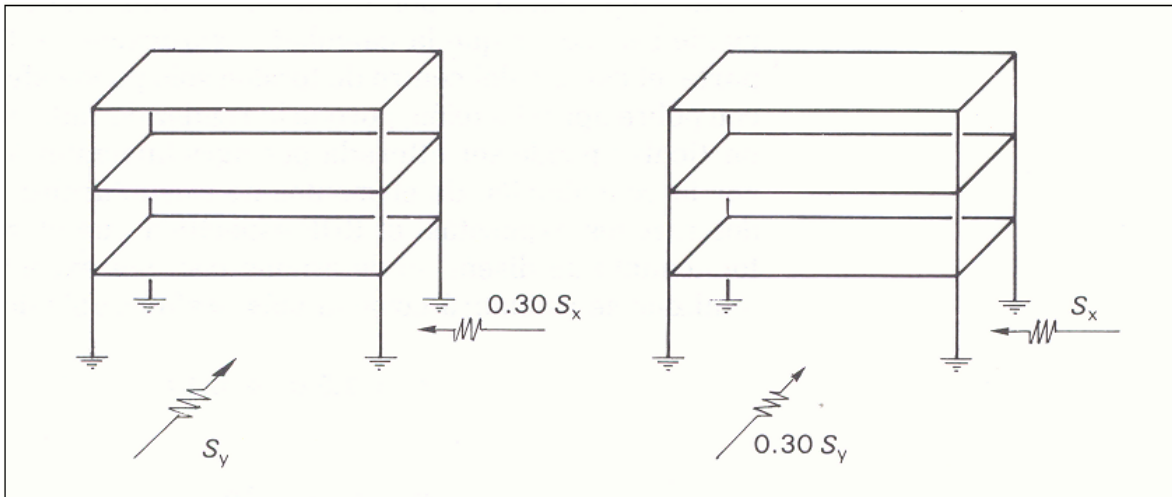


Fig. 7.4 Combinaciones del efecto sísmico en dos direcciones.

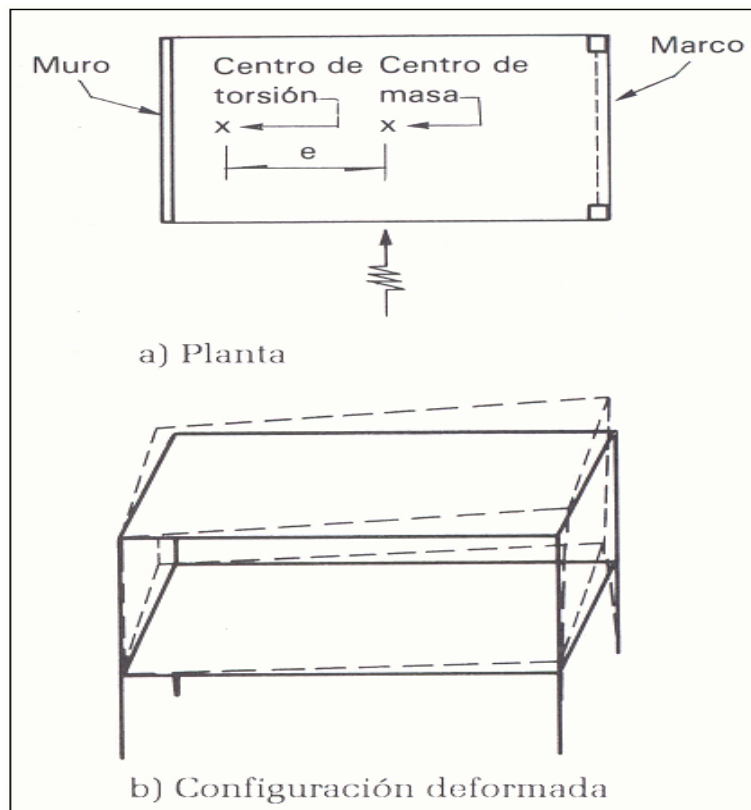


Fig. 7.5 Vibración de un edificio incluyendo efectos de torsión

Debido al efecto dinámico de la vibración, el momento torsionante que actúa en cada entrepiso puede verse en general amplificado y, por tanto, la excentricidad efectiva puede ser mayor que la calculada estáticamente. Por otra parte, el cálculo del centro de torsión sólo puede efectuarse con pobre aproximación, porque la rigidez de cada elemento particular puede ser alterada por agrietamientos locales o por la contribución de elementos no estructurales. Por las dos razones expuestas, el RDF especifica que el momento torsionante de diseño se determine con una excentricidad total que se calculará como la más desfavorable de:

$$e = 1.5 e_c + 0.1 b \quad 7.1$$

$$e = e_c - 0.1 b \quad 7.2$$

donde e_c es la calculada a partir de los valores teóricos de los centros de masa y de cortante; el factor 1.5 cubre la amplificación dinámica de la torsión; b es el lado del edificio en dirección normal a la del análisis; o sea, se considera un error posible en la determinación de la excentricidad igual a 10 por ciento del ancho del edificio.

Como se ha indicado anteriormente, el segundo objetivo básico del diseño sísmico, consistente en evitar daños ante temblores moderados, se trata de cumplir limitando los desplazamientos laterales de la estructura.

El índice más importante para la determinación de la magnitud de los posibles daños es la distorsión de entrepiso, γ , o sea el desplazamiento relativo entre dos pisos sucesivos Δ , dividido entre la altura de entrepiso H , (fig 7.6) .

$$\gamma = \tilde{\Delta} / H \quad 7.3$$

Hay que recordar que la reducción en el coeficiente sísmico por comportamiento inelástico es válida para determinar las fuerzas para las que hay que diseñar la estructura, pero que las deformaciones que se presentarán en la estructura serán Q veces las que se han determinado con un análisis elástico bajo esas fuerzas reducidas. Por tanto antes de compararlas con deformaciones admisibles, las deformaciones calculadas, Δ_c , deberán multiplicarse por Q .

$$\Delta = Q \cdot \Delta_c \quad 7.4$$



Fig. 7.6 Distorsiones de entrepiso admisibles según el RCDF

También debe tenerse en mente que el objetivo es limitar las deflexiones a valores que no causen daños en elementos estructurales y no estructurales, no para el sismo de diseño sino para uno de mucho menor intensidad. Para poder emplear los mismos resultados del análisis ante el sismo de diseño, las distorsiones admisibles se multiplican en el RCDF por un factor del orden de tres con respecto a las que realmente se quieren controlar. Así, se encuentra experimentalmente que en muros de mampostería y en recubrimientos frágiles de paredes divisorias se provocan agrietamientos cuando las distorsiones exceden de dos al millar ($\gamma \geq 0.002$); el reglamento en cuestión exige se compare la distorsión calculada con un valor admisible:

$$\gamma_{adm} = 0.006$$

$$7.5$$

cuando las deformaciones de la estructura pueden afectar elementos no estructurales frágiles (caso, A en la figura 7.6).

Por otra parte, cuando no existen elementos frágiles que pueden ser dañados por el movimiento de la estructura o cuando éstos están desligados de la estructura principal (caso b de la figura 7.6) se aumenta al doble la distorsión admisible:

$$\gamma_{adm} = 0.012 \qquad 7.6$$

En este caso, el límite tiene como fin evitar que la edificación resulte excesivamente flexible y se originen deformaciones que causen molestias y pánico a los ocupantes y que hagan que se vuelvan importantes los efectos de segundo orden.

7.2 ANÁLISIS DINAMICO MODAL ESPECTRAL DEL EDIFICIO EN ESTUDIO

El edificio ubicado en Avenida Paseo de la Reforma 116 (caso de estudio del presente trabajo) se encuentra desplantado sobre terreno blando en zona del lago, en zona IIIb de acuerdo con la clasificación del RCDF, por lo que a continuación se presenta el espectro de diseño correspondiente al mismo de acuerdo a su ubicación y características estructurales:

Datos:

$$C = 0.45$$

$$T_a = 0.85 \text{ s}$$

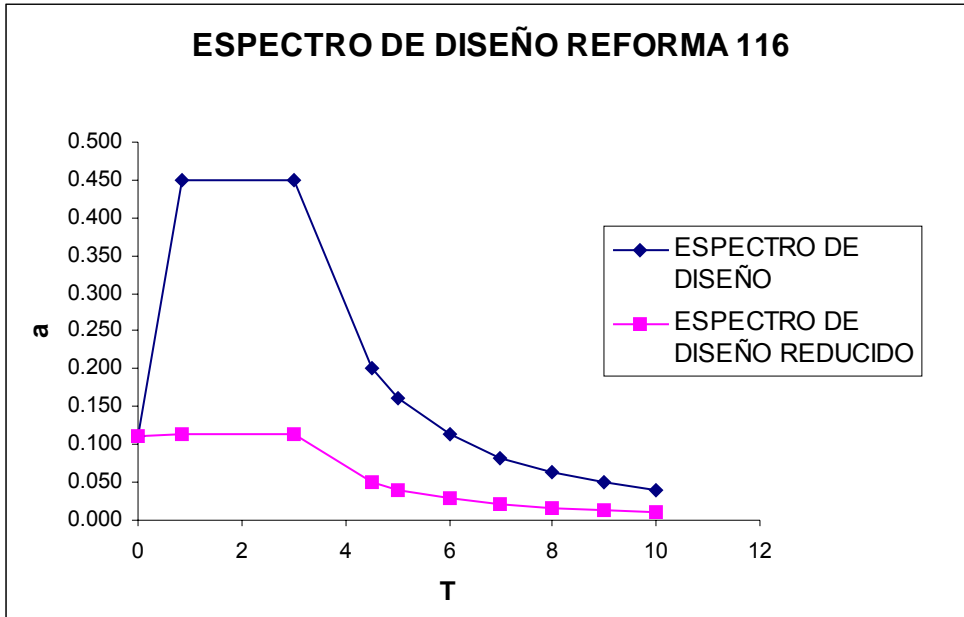
$$T = 2.02 \text{ s}$$

$$T_b = 3.0 \text{ s}$$

$$r = 2$$

$$Q = Q' = 4 \text{ (de acuerdo a las características estructurales del edificio)}$$

Con los datos anteriores se procede a la construcción del espectro de diseño:



El análisis dinámico del edificio se realizó con el apoyo del programa de cómputo para el análisis de estructuras SAP2000 debido a lo complejo que resultaría analizarlo sin esta poderosa herramienta o alguna similar.

Para que el programa nos arroje resultados del análisis dinámico se debe contar con las características físicas del edificio modeladas en el SAP2000, además de introducir los datos de los criterios de diseño del RCDF y el espectro correspondiente.

En el capítulo llamado “Anexos” del presente trabajo se muestra la estructura a detalle con sus correspondientes secciones en sus elementos, se realizan cortes en planta, longitudinales y transversales a la edificación, se presentan diagramas de elementos mecánicos y finalmente se realiza la revisión de desplazamientos de la estructura para la combinación de acciones que incluye sismo en dirección longitudinal y transversal.

De la revisión de desplazamientos presentada en los Anexos, se puede observar que los desplazamientos que experimenta el edificio no sobrepasan los límites establecidos por la normatividad vigente, excepto en el nivel 20 el cuál corresponde al cuarto de máquinas. Esta situación hace necesario sugerir el reforzamiento de esta área para incrementar su rigidez lateral, lo cuál puede llevarse a cabo mediante la colocación de contraventeos metálicos.

CAPITULO 8
CONCLUSIONES

CAPITULO 8 CONCLUSIONES

En este trabajo se presentó la evaluación del comportamiento dinámico de un edificio de acero de 20 niveles ubicado en Av. Paseo de la Reforma 116 de la Ciudad de México. Esta evaluación tuvo como objetivo conocer el estado actual y el nivel de seguridad del inmueble cuya antigüedad rebasa los 50 años, habiendo resistido numerosos eventos sísmicos. El punto de partida fue la determinación de sus propiedades dinámicas por medios analíticos (teóricos) y experimentales, con lo cuál fue posible realizar su comparación y, a partir de estas, se calibraron los modelos de computadora para el cálculo de la respuesta del edificio ante las diversas sollicitaciones estáticas y dinámicas. Particularmente, para el edificio en estudio, se efectuó un análisis dinámico para revisar el diseño de sus elementos estructurales críticos y el cumplimiento de los estados límite especificados por el Reglamento de Construcción vigente.

En relación con el proceso involucrado en la evaluación estructural de un edificio, es importante mencionar que la confiabilidad de los resultados dependerá de la calidad y existencia de información técnica (memoria de cálculo y planos estructurales), siendo común, en estructuras ya construidas, que dicha información esté incompleta. Para el inmueble objeto de este trabajo se tuvo que realizar un levantamiento detallado para identificar totalmente el sistema estructural, además de haberse realizado pruebas de laboratorio para determinar la resistencia del concreto en cimentación. Este tipo de pruebas de laboratorio son convenientes en estructuras existentes en las cuáles se tiene duda sobre la resistencia del concreto por efectos de agrietamiento o degradación. Otro tipo de estudio realizado fue un levantamiento topográfico con el cuál fue posible identificar la presencia de asentamientos diferenciales o pérdida de verticalidad, aspectos que suelen estar presentes en estructuras desplantadas sobre terreno blando.

En términos generales, se considera que es necesario recabar información sobre las condiciones actuales de las edificaciones de importancia en las que exista la posibilidad o que presenten evidencia de alteraciones en las características físicas de sus elementos estructurales debidas al efecto sísmico. En la medida que esto sea una práctica común, se podrán prevenir daños mayores ante eventos sísmicos futuros realizando, de requerirse, un reforzamiento en los elementos estructurales que así lo requieran.

La modelación estructural por medio de programas de cómputo, es una herramienta muy poderosa y juega un papel muy importante en la práctica de la ingeniería estructural, sin embargo, como se comentó anteriormente, se debe contar con información confiable y detallada, ya sea de la información contenida en planos y memorias de calculo o de pruebas de laboratorio.

Los desarrollos tecnológicos recientes han sido de gran apoyo a la ingeniería ya que actualmente se cuenta con aparatos muy sofisticados que nos ayudan por ejemplo a realizar cálculos confiables y en menor tiempo, obtener registros de cualquier tipo, apoyo en la modelación y en las comunicaciones, con esto tenemos mayor certeza en nuestros resultados y somos mas eficientes en todos los aspectos; por lo que debemos hacer uso de los desarrollos tecnológicos y aplicarlos en los proyectos que así lo requieran. Existe un factor que en ocasiones limita su uso y es el económico, aunque con el paso del tiempo, esta tecnología es cada vez mas accesible.

Para fines de evaluación estructural, actualmente, además de los equipos y programas de cómputo especializados, se cuenta con otro tipo de instrumentos de medición como los acelerógrafos de alta sensibilidad que permiten disminuir las incertidumbres en el posible comportamiento de las estructuras, mediante el conocimiento de distintos parámetros dinámicos, como los periodos de vibrar. De esta manera, la modelación de estructuras por computadora puede ser validada por medio de resultados de estudios experimentales y, en caso de existir diferencias, se deberá realizar un análisis de la posible causa y corregir el modelo para que sea representativo de la estructura real. Es así como las técnicas de instrumentación sísmica, a pesar de ser relativamente recientes, están siendo incorporadas más frecuentemente como un elemento de gran ayuda en la identificación del comportamiento de estructuras existentes sobre las cuáles se tiene duda de su comportamiento o que han sufrido daño durante su vida útil.

Para el caso del edificio estudiado, la determinación experimental de sus propiedades dinámicas, permitió generar un modelo estructural congruente con la estructura existente, cuyos valores de periodo fundamental obtenidos analítica y experimentalmente arrojaron diferencias menores al 5%, lo cuál se considera satisfactorio. Para el caso del segundo modo las diferencias en periodo fueron mucho mayores, lo cuál puede atribuirse a la participación de elementos no estructurales dentro del inmueble que incrementaron su rigidez lateral.

Posteriormente se llevó a cabo el análisis y revisión de su comportamiento ante solicitaciones dinámicas como las que establece el Reglamento vigente. En la revisión de desplazamientos que experimenta el edificio se observa que no sobrepasan los límites establecidos por la normatividad vigente, excepto en el nivel 20 el cuál corresponde al cuarto de máquinas, por lo que esta situación hace necesario sugerir el reforzamiento de esta área para incrementar su rigidez lateral, lo cuál puede llevarse a cabo mediante la colocación de contraventeos metálicos.

ANEXOS

ANEXOS

DETALLE ESTRUCTURAL DEL EDIFICIO

Se presentan en planta las secciones estructurales del edificio ubicado en Avenida Paseo de la Reforma 116 de los niveles 3, 8, 14 y además se divide la estructura en 15 ejes transversales y longitudinales, para los cuales también se encuentran identificadas sus secciones. Estas secciones se detallan posteriormente en cuanto a dimensiones y propiedades de sus materiales con el objeto de identificarlas en la estructura.

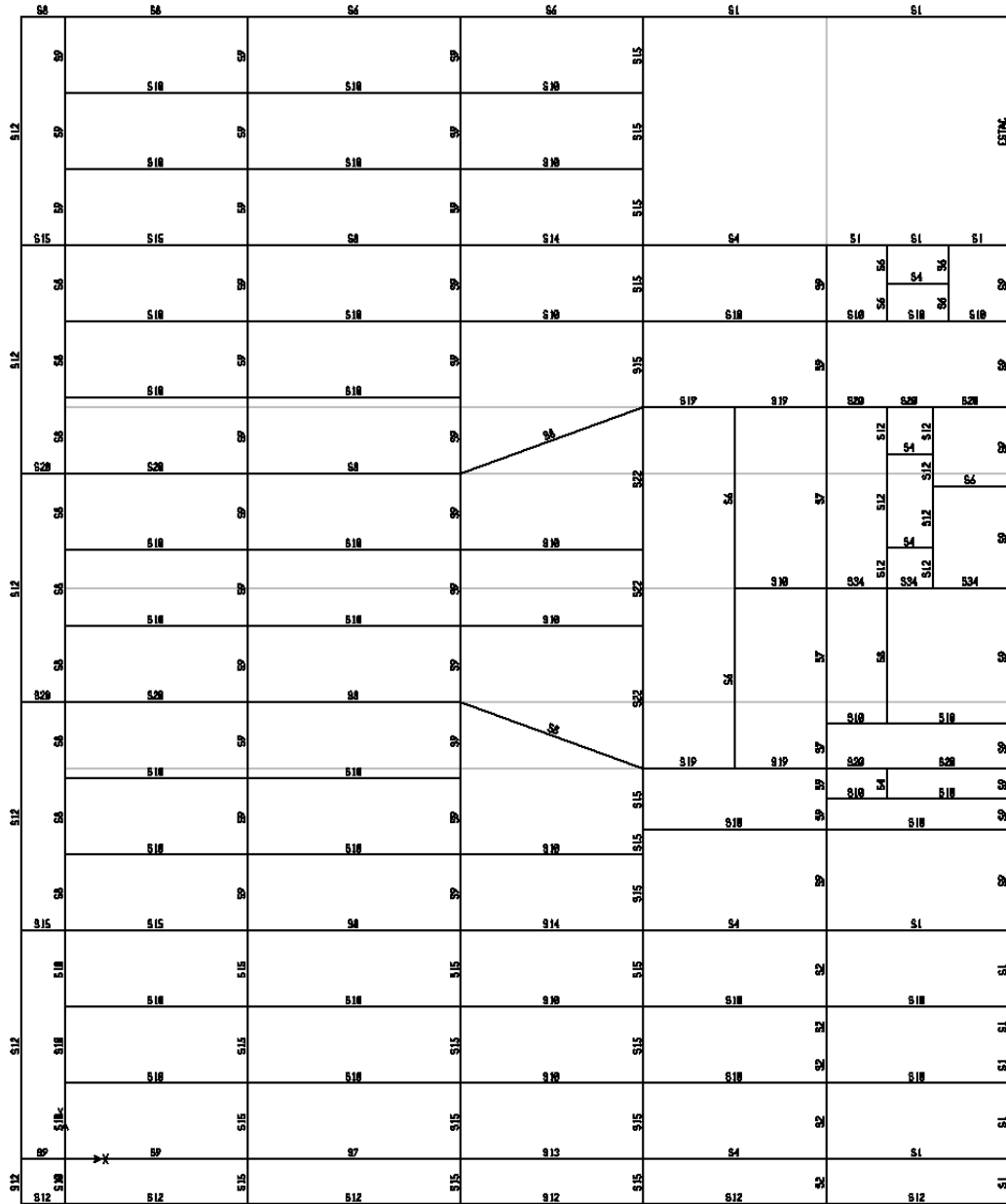
En este Anexo se presentan algunas vistas exteriores virtuales del edificio con el objeto de representar físicamente sus detalles estructurales.

SECCIONES ESTRUCTURALES EN PLANTA, NIVELES 3,8,14:

SAP2000

2/20/05 16:33:34

P I S O 3

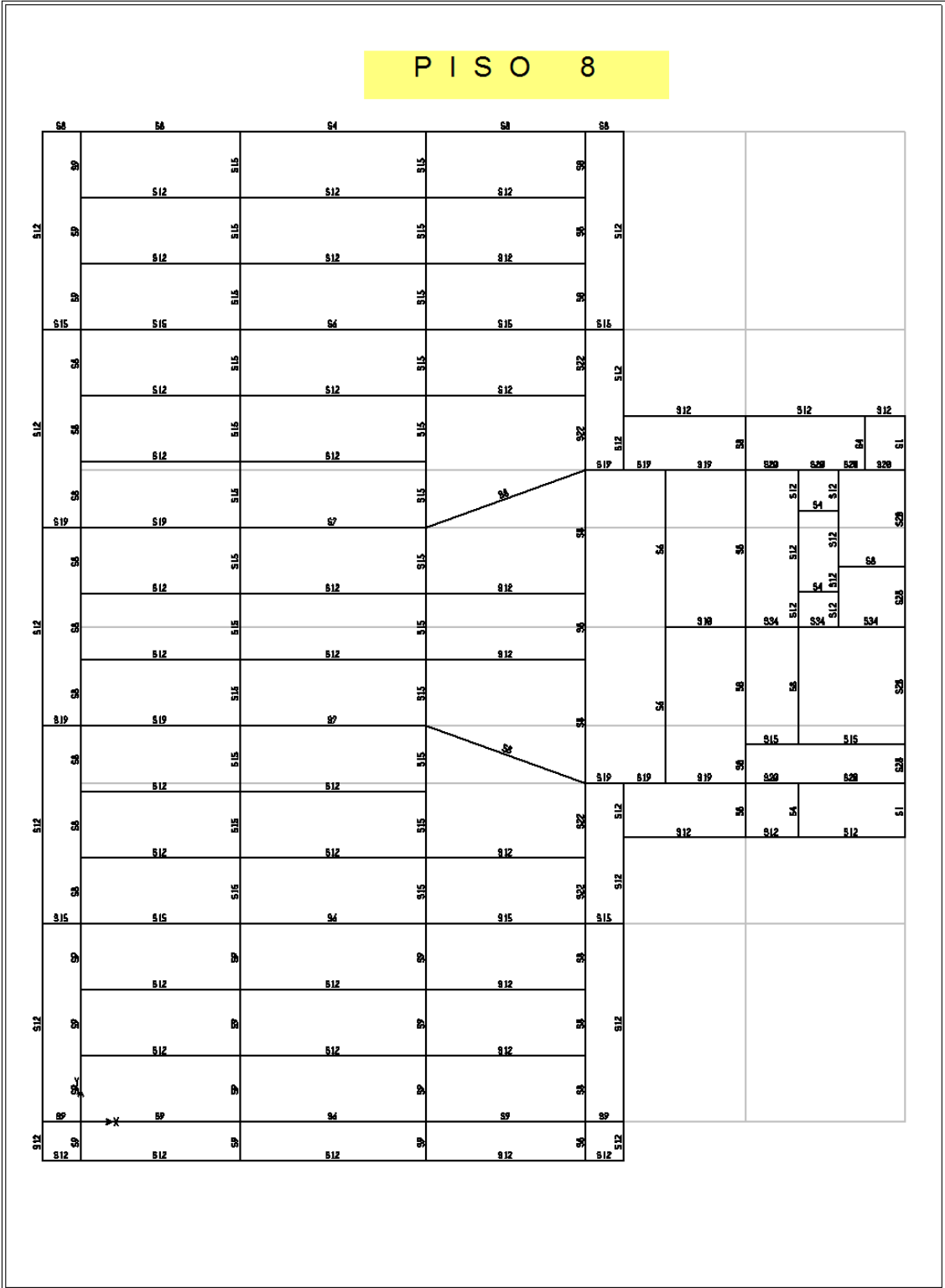


SAP2000 v8.0.8 - File:dinamicorun_V8 - Frame Sections - Ton, m, C Units

SAP2000

2/20/05 16:39:20

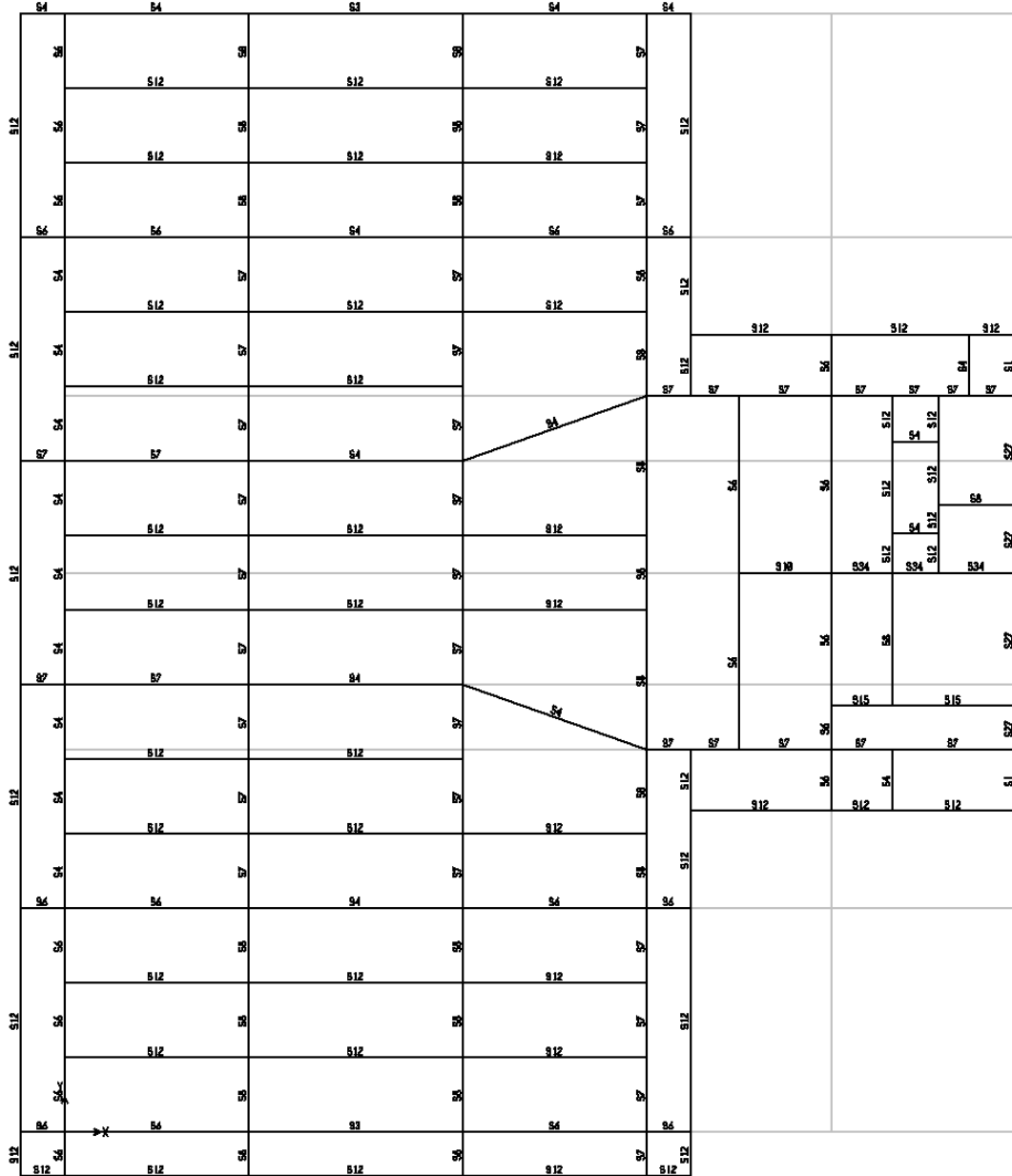
PISO 8



SAP2000

2/20/05 16:42:11

P I S O 14

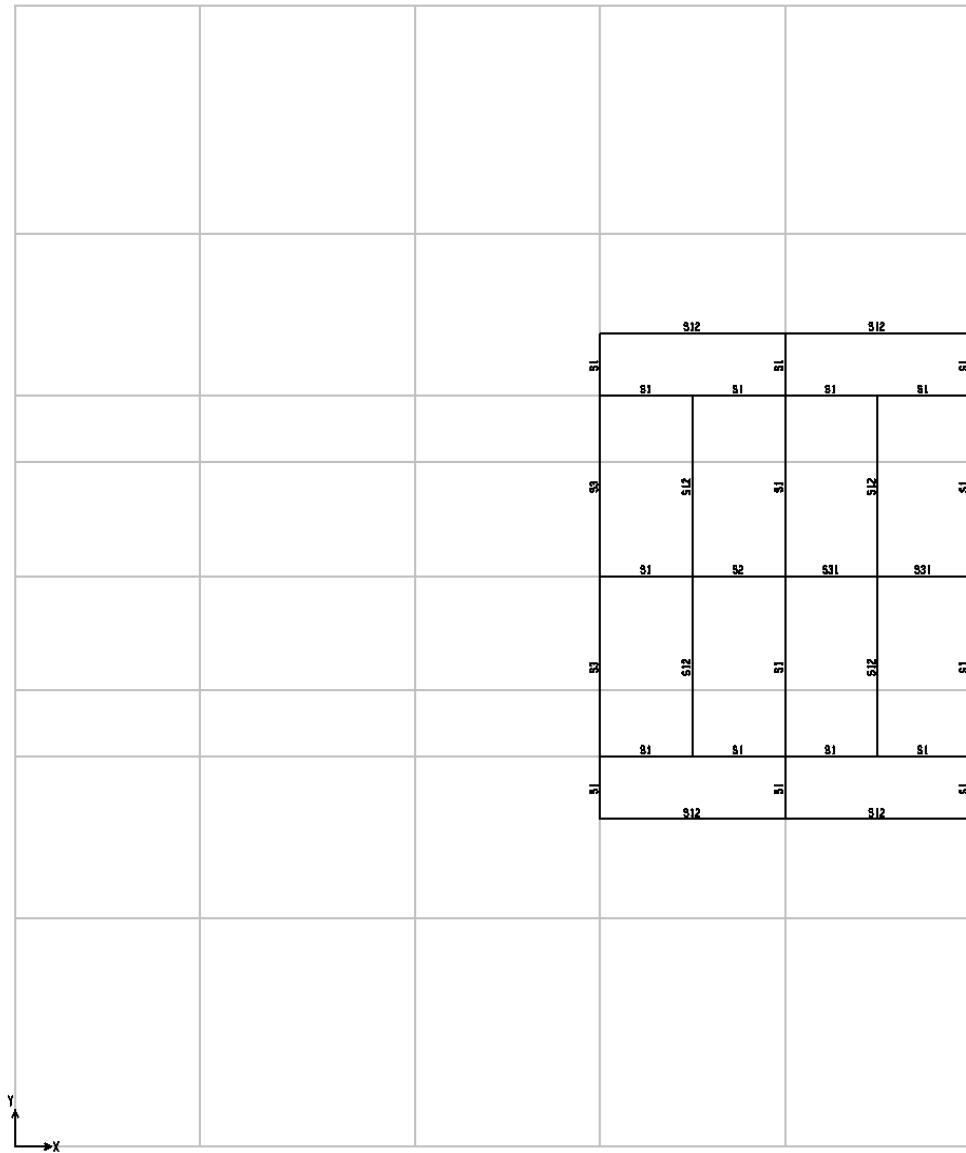


SAP2000 v8.0.8 - File:dinamicorun_V8 - X-Y Plane @ Z=47.6 - Ton, m, C Units

SAP2000

2/20/05 16:43:56

A Z O T E A



SAP2000 v8.0.8 - File:dinámicorun_V8 - X-Y Plane @ Z=70.45 - Ton, m, C Units

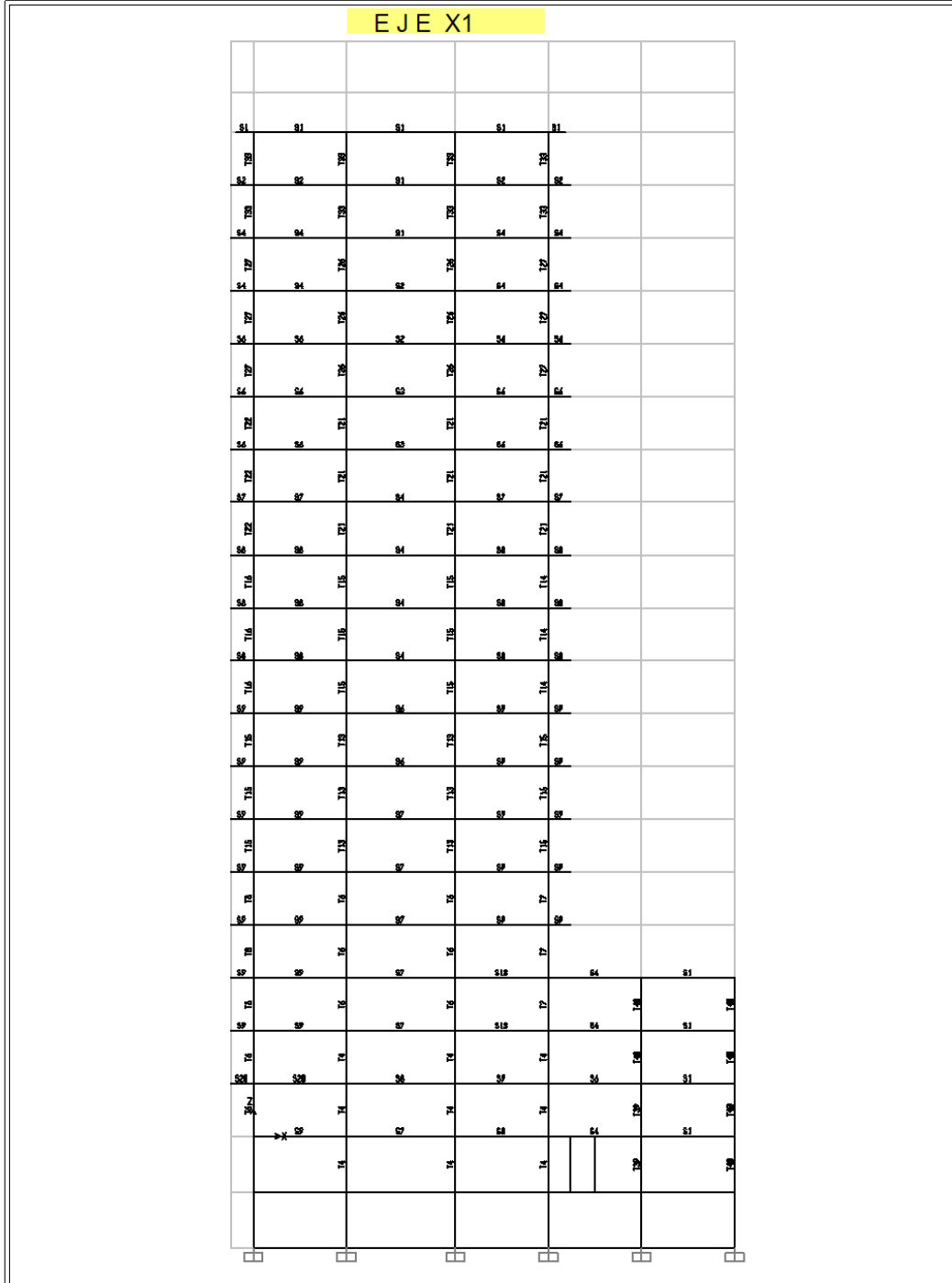
EJE IDENTIFICACION DE EJES

EJE	Y1	Y2	Y3	Y4	Y5	Y6
X9						
X8						
X7						
X6						
X5						
X4						
X3						
X2						
X1						

SECCIONES ESTRUCTURALES POR EJES

SAP2000

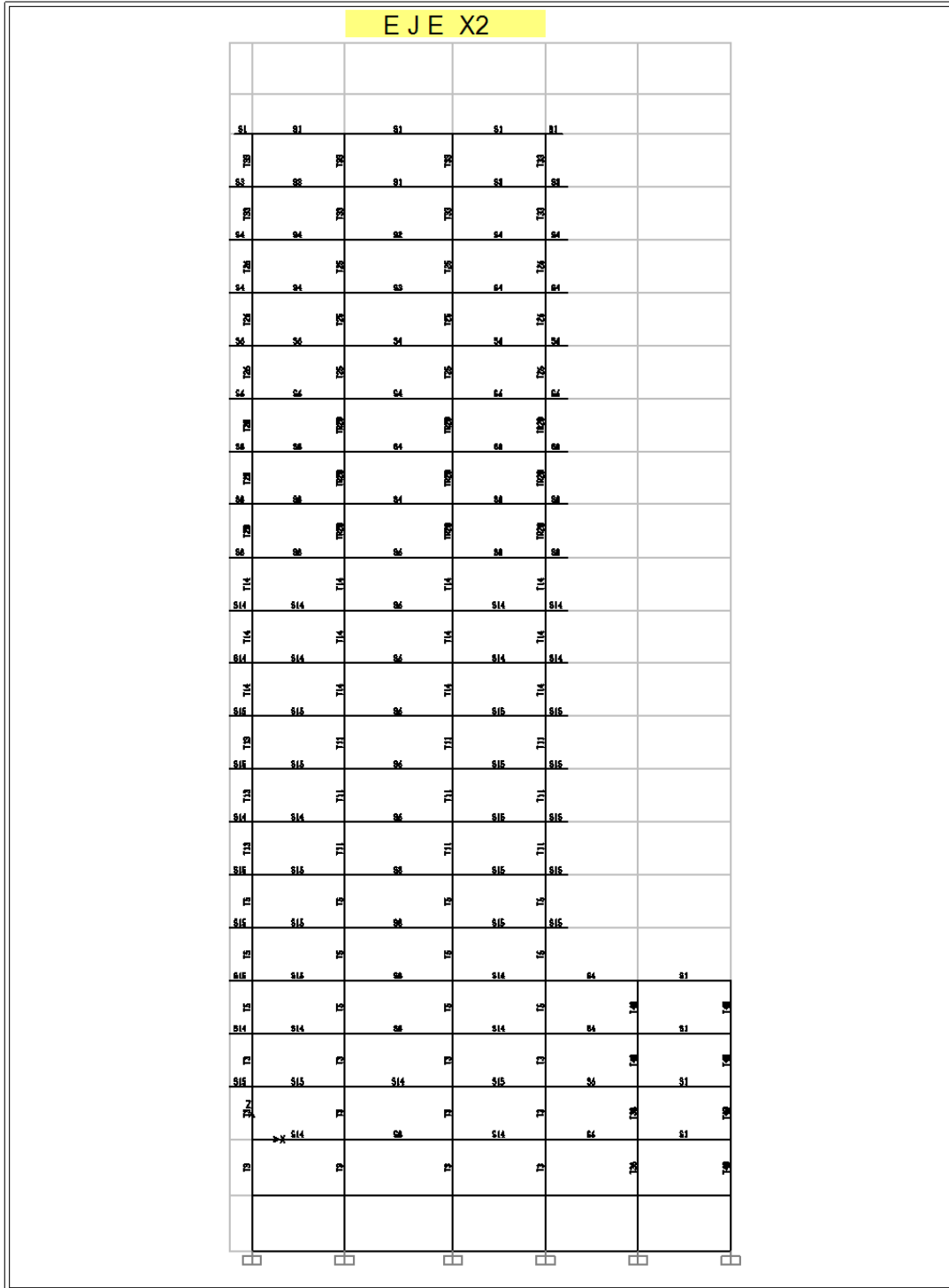
2/20/05 23:19:06



SAP2000 v8.0.8 - File:dinamicorun_V8 - X-Z Plane @ Y=0 - Ton, m, C Units

SAP2000

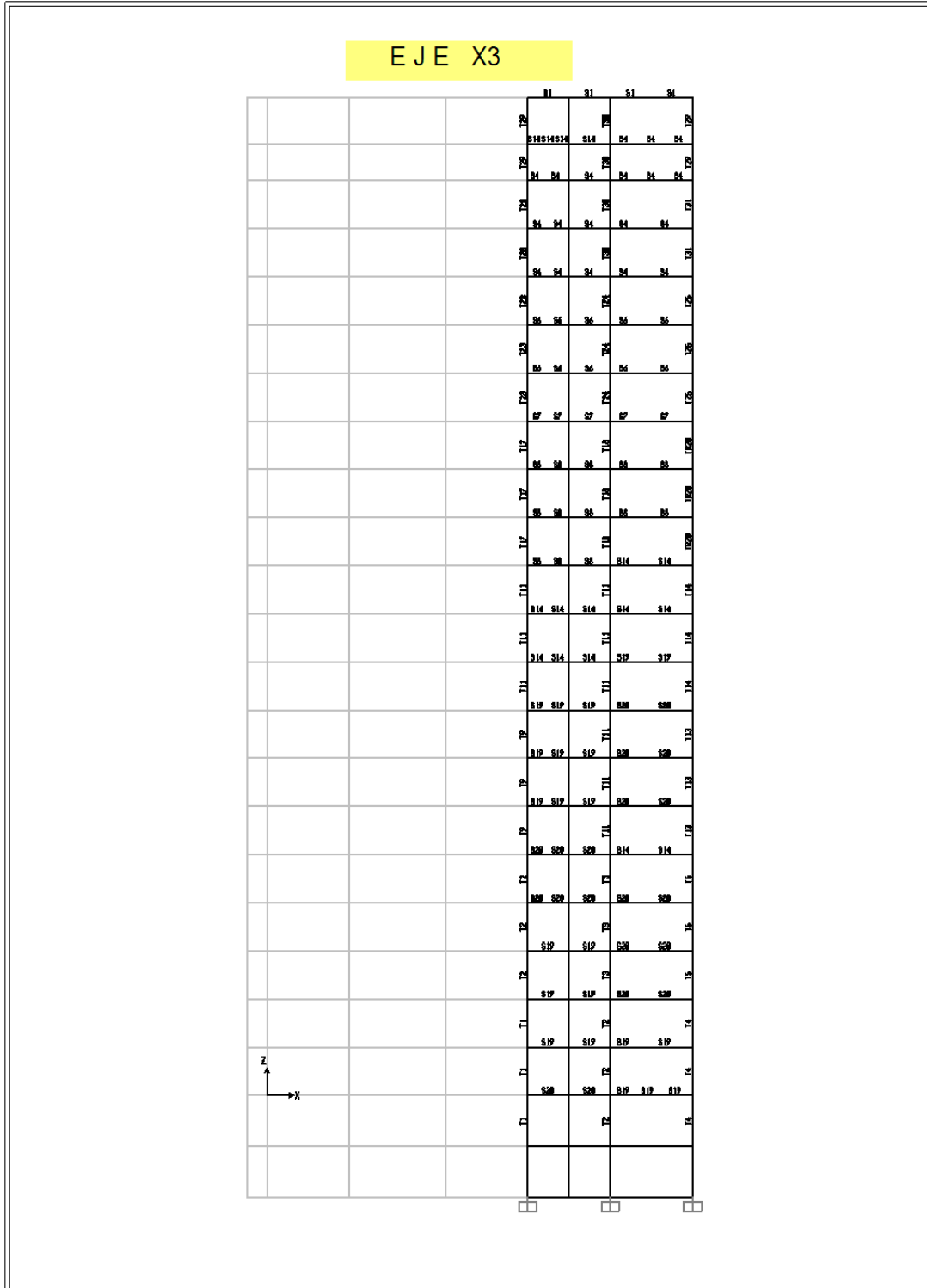
2/20/05 23:30:54



SAP2000 v8.0.8 - File:dinamicorun_V8 - X-Z Plane @ Y=7.299999 - Ton, m, C Units

SAP2000

2/20/05 23:32:34

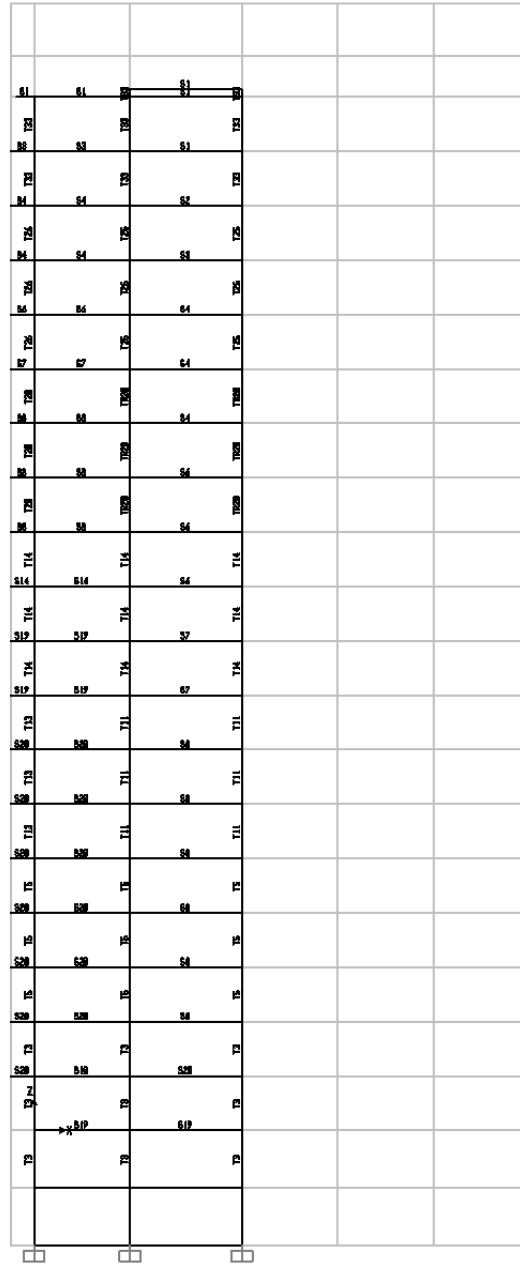


SAP2000 v8.0.8 - File:dinámicorun_V8 - X-Z Plane @ Y=12.475 - Ton, m, C Units

SAP2000

2/20/05 23:34:49

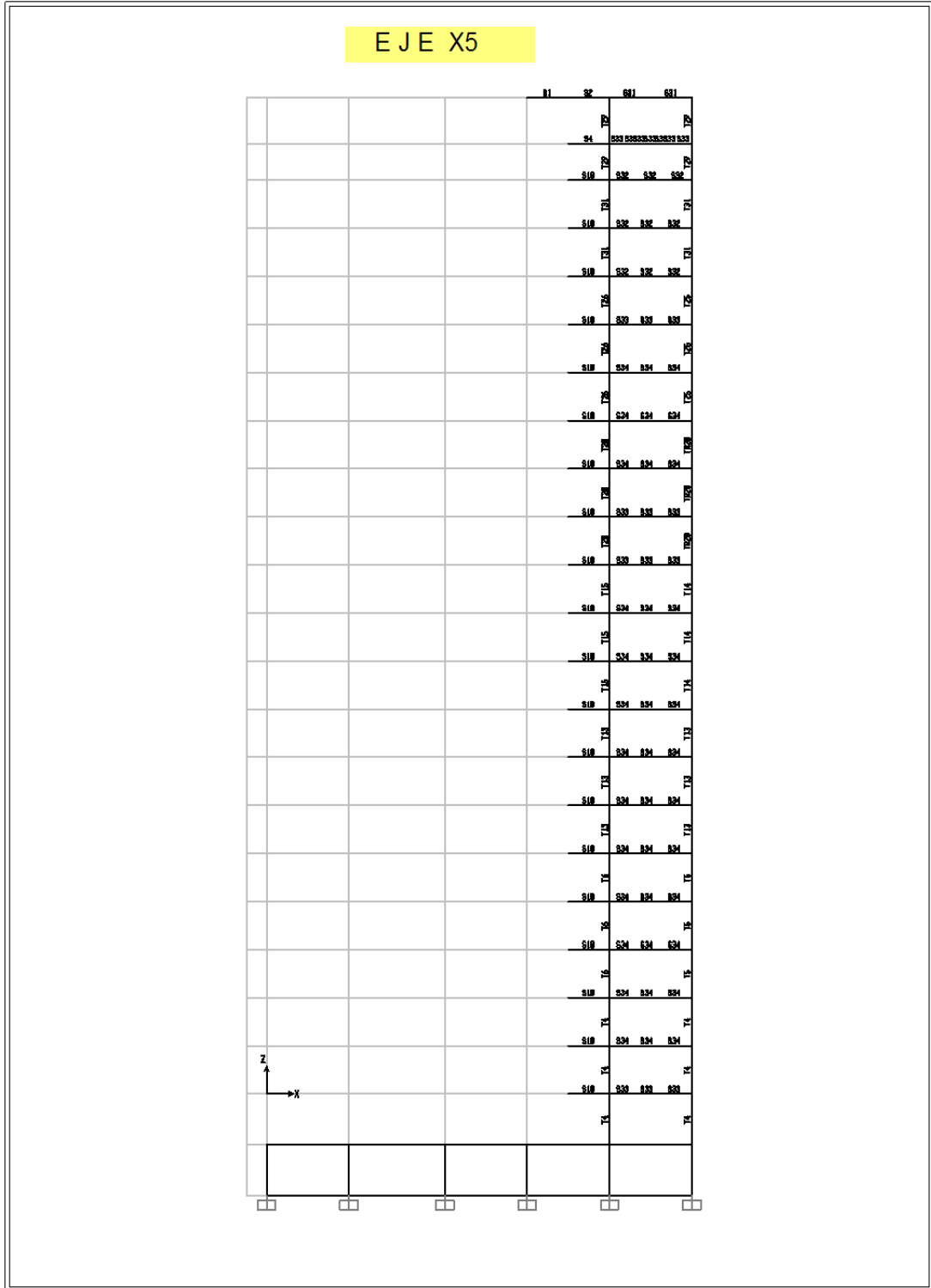
EJE X4



SAP2000 v8.0.8 - File:dinamicorun_V8 - X-Z Plane @ Y=14.6 - Ton, m, C Units

SAP2000

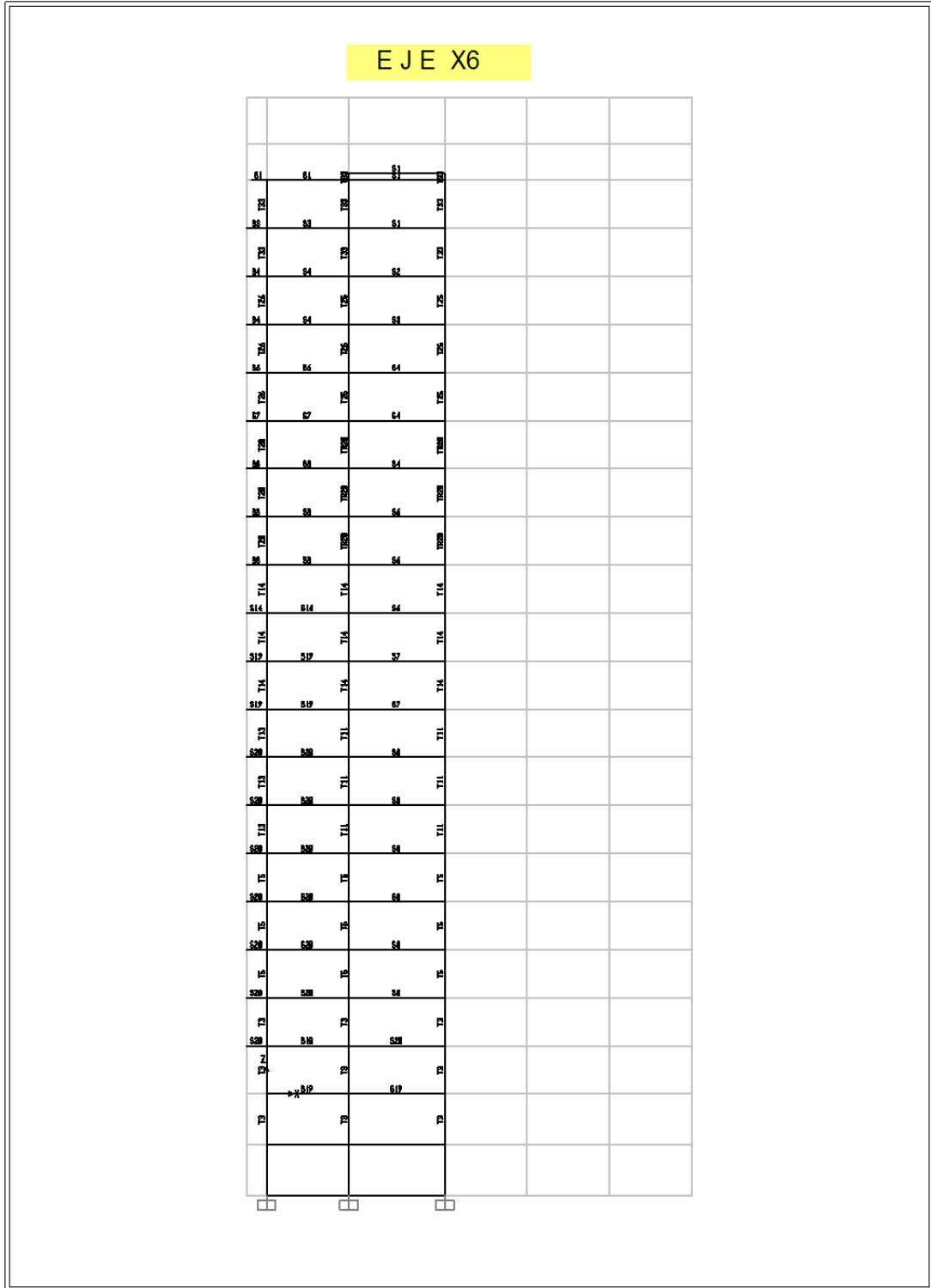
2/20/05 23:35:31



SAP2000 v8.0.8 - File:dinámicorun_V8 - X-Z Plane @ Y=18.25 - Ton, m, C Units

SAP2000

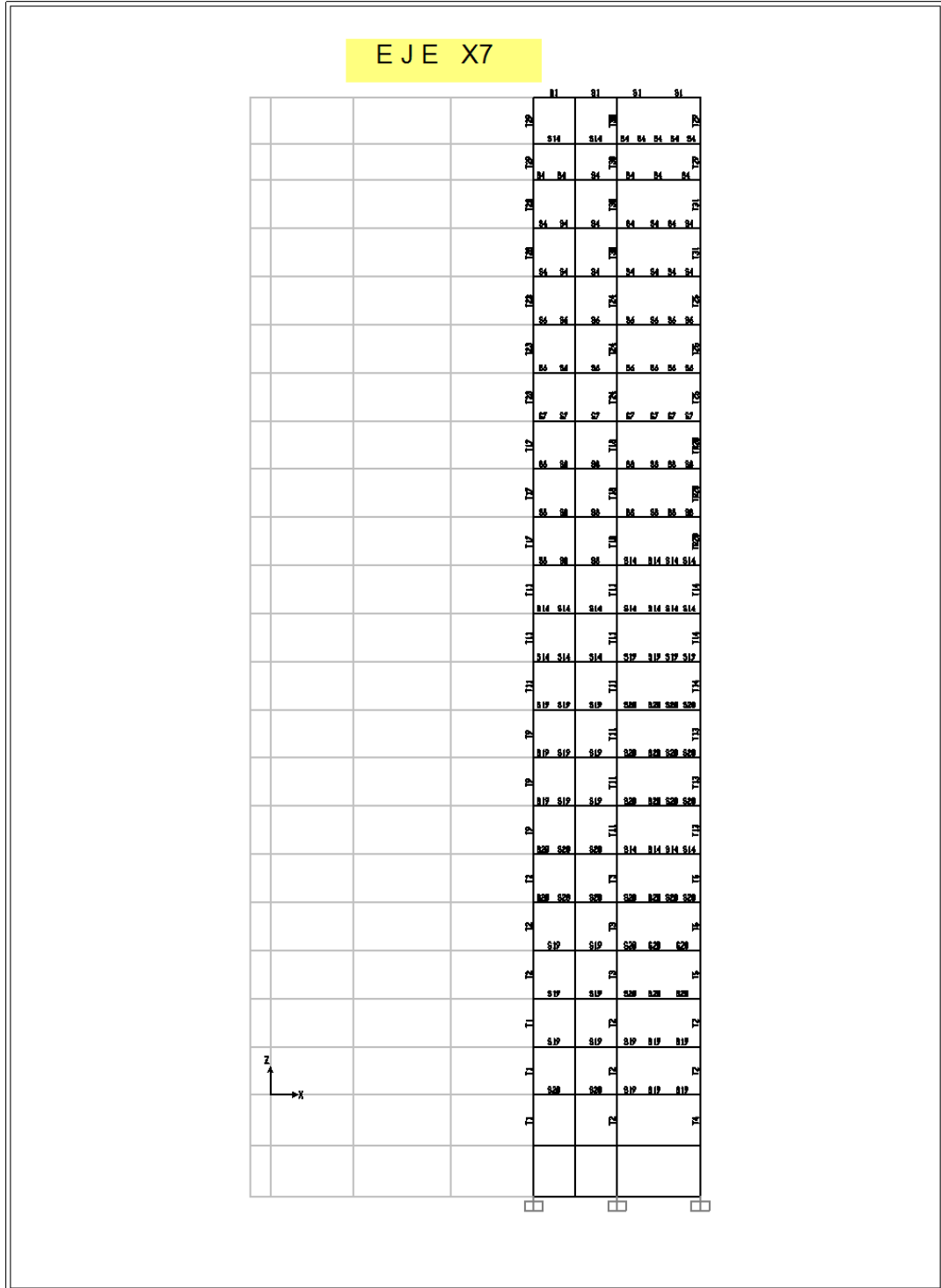
2/20/05 23:36:19



SAP2000 v8.0.8 - File:dinámicorun_V8 - X-Z Plane @ Y=21.9 - Ton, m, C Units

SAP2000

2/20/05 23:37:23



SAP2000 v8.0.8 - File:dinamicorun_V8 - X-Z Plane @ Y=24.025 - Ton, m, C Units

SAP2000

2/20/05 23:38:05

E J E X 8

S1	S1	S1	S1	S1	S1	
S2	S2	S2	S2	S2	S2	
S3	S3	S3	S3	S3	S3	
S4	S4	S4	S4	S4	S4	
S5	S5	S5	S5	S5	S5	
S6	S6	S6	S6	S6	S6	
S7	S7	S7	S7	S7	S7	
S8	S8	S8	S8	S8	S8	
S9	S9	S9	S9	S9	S9	
S10	S10	S10	S10	S10	S10	
S11	S11	S11	S11	S11	S11	
S12	S12	S12	S12	S12	S12	
S13	S13	S13	S13	S13	S13	
S14	S14	S14	S14	S14	S14	
S15	S15	S15	S15	S15	S15	
S16	S16	S16	S16	S16	S16	
S17	S17	S17	S17	S17	S17	
S18	S18	S18	S18	S18	S18	
S19	S19	S19	S19	S19	S19	
S20	S20	S20	S20	S20	S20	
S21	S21	S21	S21	S21	S21	
S22	S22	S22	S22	S22	S22	
S23	S23	S23	S23	S23	S23	
S24	S24	S24	S24	S24	S24	
S25	S25	S25	S25	S25	S25	
S26	S26	S26	S26	S26	S26	
S27	S27	S27	S27	S27	S27	
S28	S28	S28	S28	S28	S28	
S29	S29	S29	S29	S29	S29	
S30	S30	S30	S30	S30	S30	
S31	S31	S31	S31	S31	S31	
S32	S32	S32	S32	S32	S32	
S33	S33	S33	S33	S33	S33	
S34	S34	S34	S34	S34	S34	
S35	S35	S35	S35	S35	S35	
S36	S36	S36	S36	S36	S36	
S37	S37	S37	S37	S37	S37	
S38	S38	S38	S38	S38	S38	
S39	S39	S39	S39	S39	S39	
S40	S40	S40	S40	S40	S40	
S41	S41	S41	S41	S41	S41	
S42	S42	S42	S42	S42	S42	
S43	S43	S43	S43	S43	S43	
S44	S44	S44	S44	S44	S44	
S45	S45	S45	S45	S45	S45	
S46	S46	S46	S46	S46	S46	
S47	S47	S47	S47	S47	S47	
S48	S48	S48	S48	S48	S48	
S49	S49	S49	S49	S49	S49	
S50	S50	S50	S50	S50	S50	
S51	S51	S51	S51	S51	S51	
S52	S52	S52	S52	S52	S52	
S53	S53	S53	S53	S53	S53	
S54	S54	S54	S54	S54	S54	
S55	S55	S55	S55	S55	S55	
S56	S56	S56	S56	S56	S56	
S57	S57	S57	S57	S57	S57	
S58	S58	S58	S58	S58	S58	
S59	S59	S59	S59	S59	S59	
S60	S60	S60	S60	S60	S60	
S61	S61	S61	S61	S61	S61	
S62	S62	S62	S62	S62	S62	
S63	S63	S63	S63	S63	S63	
S64	S64	S64	S64	S64	S64	
S65	S65	S65	S65	S65	S65	
S66	S66	S66	S66	S66	S66	
S67	S67	S67	S67	S67	S67	
S68	S68	S68	S68	S68	S68	
S69	S69	S69	S69	S69	S69	
S70	S70	S70	S70	S70	S70	
S71	S71	S71	S71	S71	S71	
S72	S72	S72	S72	S72	S72	
S73	S73	S73	S73	S73	S73	
S74	S74	S74	S74	S74	S74	
S75	S75	S75	S75	S75	S75	
S76	S76	S76	S76	S76	S76	
S77	S77	S77	S77	S77	S77	
S78	S78	S78	S78	S78	S78	
S79	S79	S79	S79	S79	S79	
S80	S80	S80	S80	S80	S80	
S81	S81	S81	S81	S81	S81	
S82	S82	S82	S82	S82	S82	
S83	S83	S83	S83	S83	S83	
S84	S84	S84	S84	S84	S84	
S85	S85	S85	S85	S85	S85	
S86	S86	S86	S86	S86	S86	
S87	S87	S87	S87	S87	S87	
S88	S88	S88	S88	S88	S88	
S89	S89	S89	S89	S89	S89	
S90	S90	S90	S90	S90	S90	
S91	S91	S91	S91	S91	S91	
S92	S92	S92	S92	S92	S92	
S93	S93	S93	S93	S93	S93	
S94	S94	S94	S94	S94	S94	
S95	S95	S95	S95	S95	S95	
S96	S96	S96	S96	S96	S96	
S97	S97	S97	S97	S97	S97	
S98	S98	S98	S98	S98	S98	
S99	S99	S99	S99	S99	S99	
S100	S100	S100	S100	S100	S100	

SAP2000 v8.0.8 - File: dinámicorun_V8 - X-Z Plane @ Y=29.2 - Ton, m, C Units

SAP2000

2/20/05 23:39:31

E J E X9

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
101	102	103	104	105
106	107	108	109	110
111	112	113	114	115
116	117	118	119	120
121	122	123	124	125
126	127	128	129	130
131	132	133	134	135
136	137	138	139	140
141	142	143	144	145
146	147	148	149	150
151	152	153	154	155
156	157	158	159	160
161	162	163	164	165
166	167	168	169	170
171	172	173	174	175
176	177	178	179	180
181	182	183	184	185
186	187	188	189	190
191	192	193	194	195
196	197	198	199	200

SAP2000 v8.0.8 - File:dinamicorun_V8 - X-Z Plane @ Y=36.5 - Ton, m, C Units

EJE Y1

SAP2000 v8.0.8 - File:dinamicorun_V8 - Y-Z Plane @ X=0 - Ton, m, C Units

SAP2000

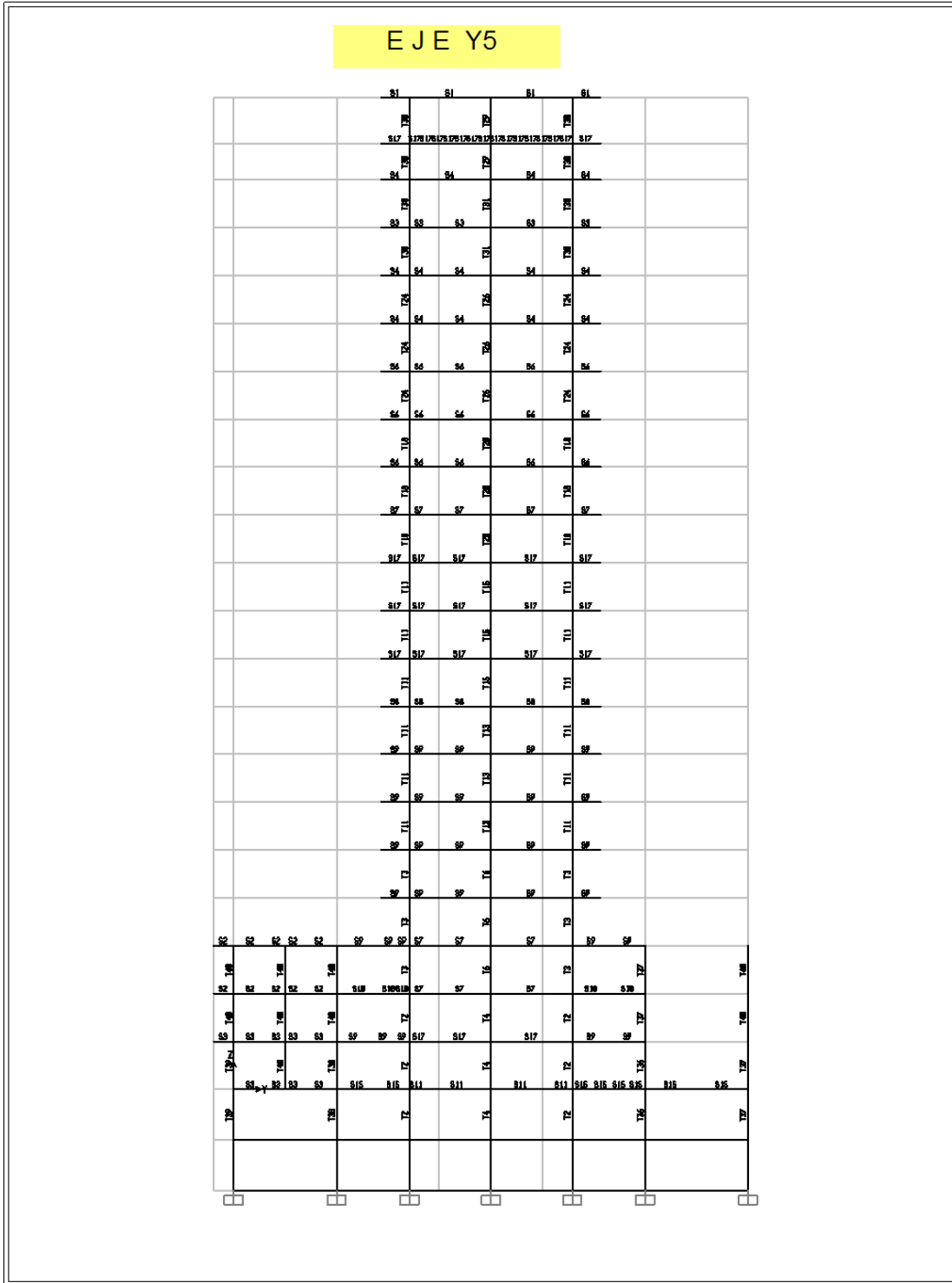
2/20/05 23:43:46

EJE Y3

SAP2000 v8.0.8 - File:dinamicorun_V8 - Y-Z Plane @ X=13 - Ton, m, C Units

SAP2000

2/20/05 23:45:44



SAP2000 v8.0.8 - File:dinamicorun_V8 - Y-Z Plane @ X=25 - Ton, m, C Units

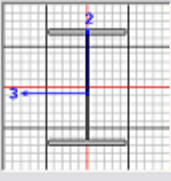
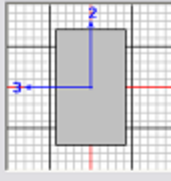
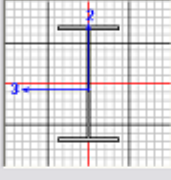
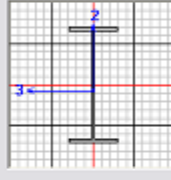
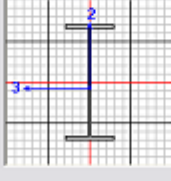
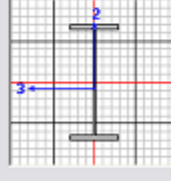
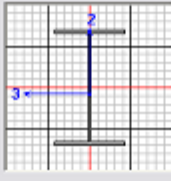
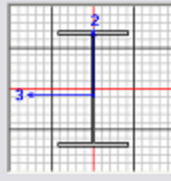
SAP2000

2/20/05 23:47:28

EJE Y6

SAP2000 v8.0.8 - File:dinamicorun_V8 - Y-Z Plane @ X=31 - Ton, m, C Units

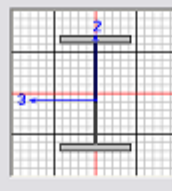
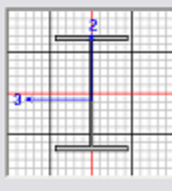
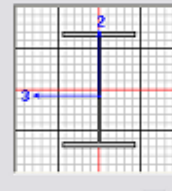
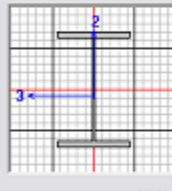
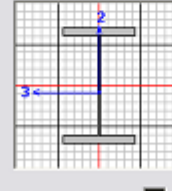
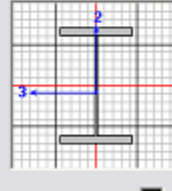
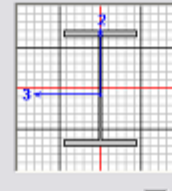

CARACTERÍSTICAS DE LAS SECCIONES

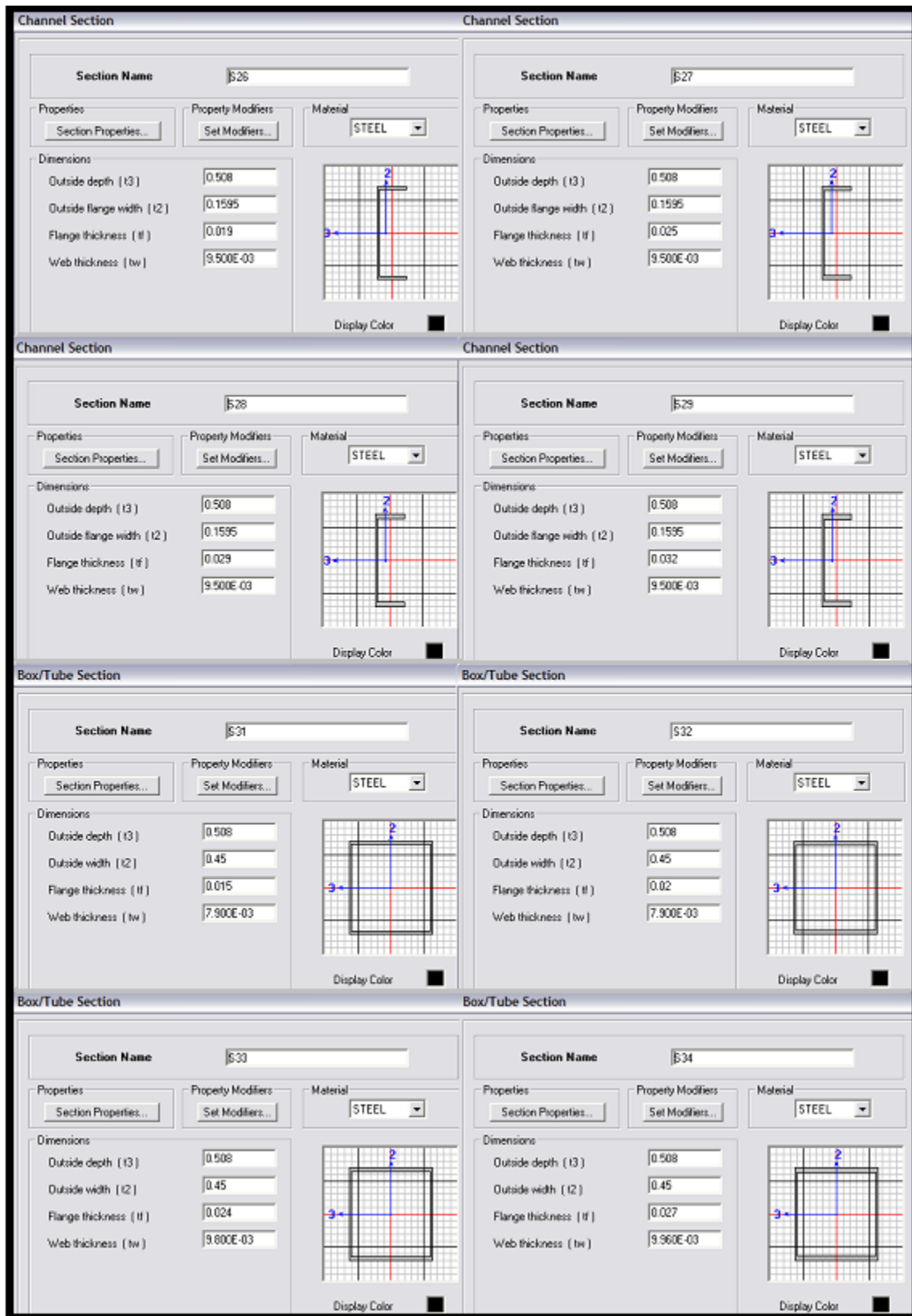
I/Wide Flange Section		Rectangular Section	
<p>Section Name ESTAC</p> <p>Properties: Section Properties... Property Modifiers: Set Modifiers... Material: STEEL</p> <p>Dimensions:</p> <ul style="list-style-type: none"> Outside height (t3): 0.3 Top flange width (t2): 0.2 Top flange thickness (t1): 0.012 Web thickness (tw): 6.000E-03 Bottom flange width (t2b): 0.2 Bottom flange thickness (t1b): 0.012 <p>Display Color: <input checked="" type="checkbox"/></p> 	<p>Section Name FSECT</p> <p>Properties: Section Properties... Property Modifiers: Set Modifiers... Material: STEEL</p> <p>Dimensions:</p> <ul style="list-style-type: none"> Depth (t3): 0.5 Width (t2): 0.3 <p>Display Color: <input checked="" type="checkbox"/></p> 		
<p>Section Name S1</p> <p>Properties: Section Properties... Property Modifiers: Set Modifiers... Material: STEEL</p> <p>Dimensions:</p> <ul style="list-style-type: none"> Outside height (t3): 0.4 Top flange width (t2): 0.2079 Top flange thickness (t1): 0.014 Web thickness (tw): 7.900E-03 Bottom flange width (t2b): 0.2079 Bottom flange thickness (t1b): 0.014 <p>Display Color: <input checked="" type="checkbox"/></p> 	<p>Section Name S2</p> <p>Properties: Section Properties... Property Modifiers: Set Modifiers... Material: STEEL</p> <p>Dimensions:</p> <ul style="list-style-type: none"> Outside height (t3): 0.508 Top flange width (t2): 0.2079 Top flange thickness (t1): 0.016 Web thickness (tw): 7.900E-03 Bottom flange width (t2b): 0.2079 Bottom flange thickness (t1b): 0.016 <p>Display Color: <input checked="" type="checkbox"/></p> 		
<p>Section Name S3</p> <p>Properties: Section Properties... Property Modifiers: Set Modifiers... Material: STEEL</p> <p>Dimensions:</p> <ul style="list-style-type: none"> Outside height (t3): 0.508 Top flange width (t2): 0.2079 Top flange thickness (t1): 0.018 Web thickness (tw): 7.900E-03 Bottom flange width (t2b): 0.2079 Bottom flange thickness (t1b): 0.018 <p>Display Color: <input checked="" type="checkbox"/></p> 	<p>Section Name S4</p> <p>Properties: Section Properties... Property Modifiers: Set Modifiers... Material: STEEL</p> <p>Dimensions:</p> <ul style="list-style-type: none"> Outside height (t3): 0.508 Top flange width (t2): 0.2079 Top flange thickness (t1): 0.0205 Web thickness (tw): 7.900E-03 Bottom flange width (t2b): 0.2079 Bottom flange thickness (t1b): 0.0205 <p>Display Color: <input checked="" type="checkbox"/></p> 		
<p>Section Name S5</p> <p>Properties: Section Properties... Property Modifiers: Set Modifiers... Material: STEEL</p> <p>Dimensions:</p> <ul style="list-style-type: none"> Outside height (t3): 0.508 Top flange width (t2): 0.3079 Top flange thickness (t1): 0.018 Web thickness (tw): 7.900E-03 Bottom flange width (t2b): 0.3079 Bottom flange thickness (t1b): 0.018 <p>Display Color: <input checked="" type="checkbox"/></p> 	<p>Section Name S6</p> <p>Properties: Section Properties... Property Modifiers: Set Modifiers... Material: STEEL</p> <p>Dimensions:</p> <ul style="list-style-type: none"> Outside height (t3): 0.508 Top flange width (t2): 0.3079 Top flange thickness (t1): 0.019 Web thickness (tw): 7.900E-03 Bottom flange width (t2b): 0.3079 Bottom flange thickness (t1b): 0.019 <p>Display Color: <input checked="" type="checkbox"/></p> 		

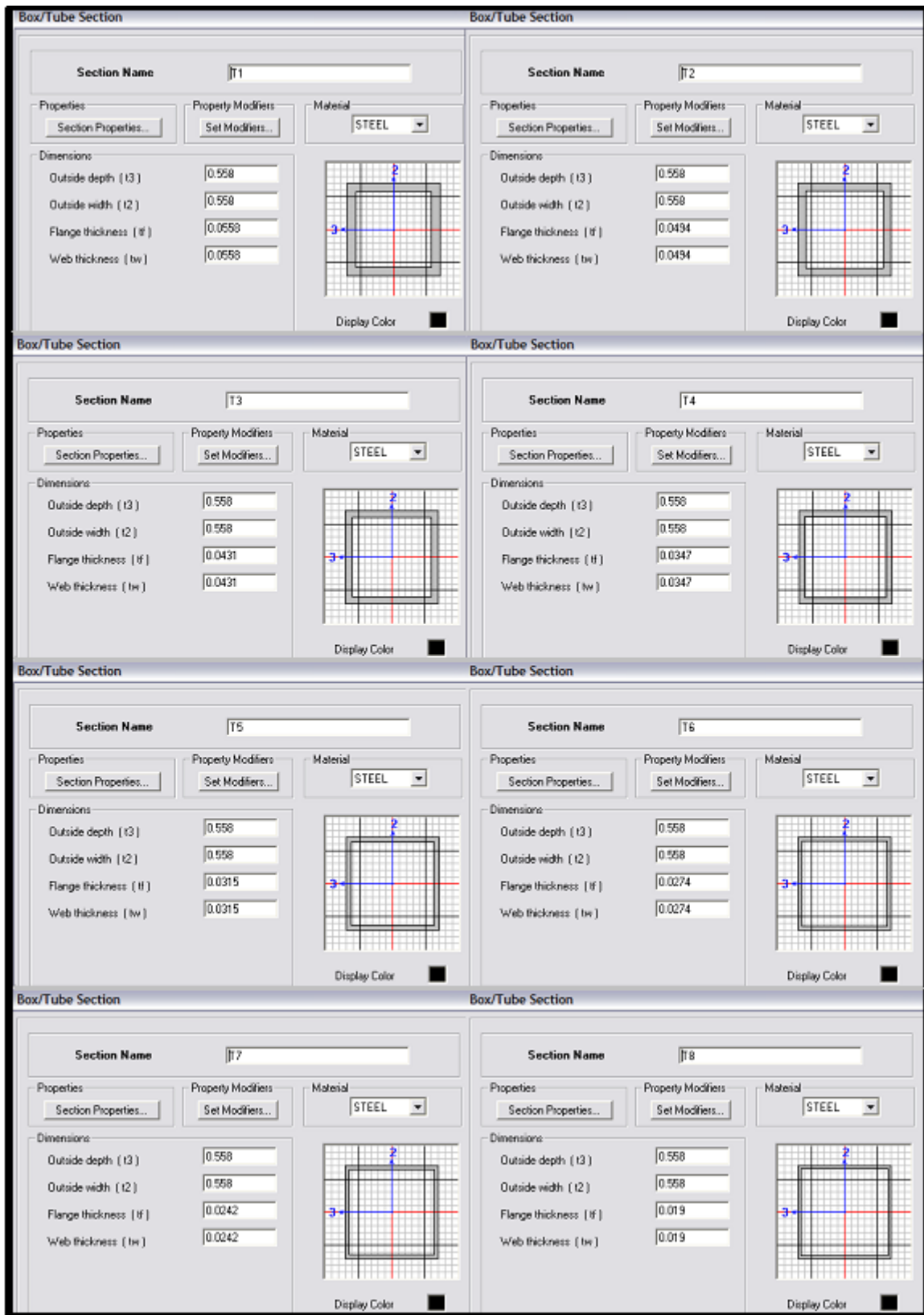
The image displays 16 panels, each representing the configuration for a different I/Wide Flange Section. Each panel contains the following information:

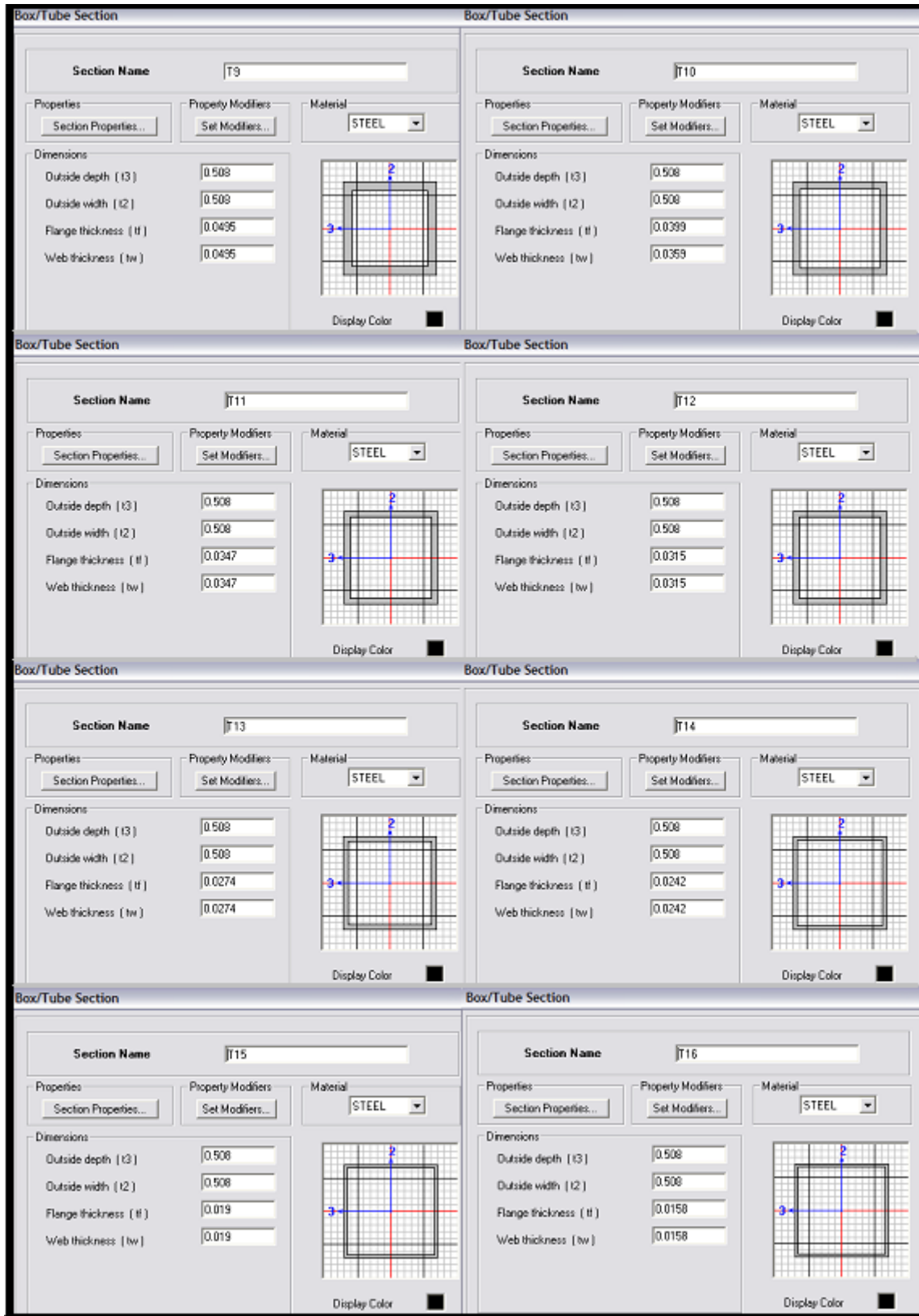
- Section Name:** A text field containing a section identifier (e.g., §7, §8, §9, §10, §11, §12, §13, §14).
- Properties:** A button labeled 'Section Properties...'
- Property Modifiers:** A button labeled 'Set Modifiers...'
- Material:** A dropdown menu currently set to 'STEEL'.
- Dimensions:** A table of geometric parameters for the I-beam section.
- Diagram:** A graphical representation of the I-beam section on a grid, with dimension lines labeled '2' (web height) and '3' (flange width).
- Display Color:** A checkbox to toggle the color display of the section.

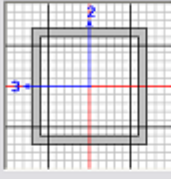
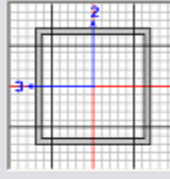
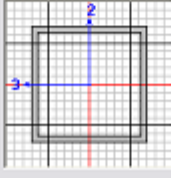
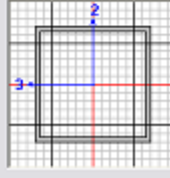
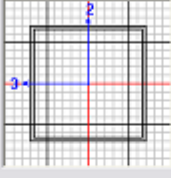
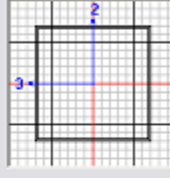
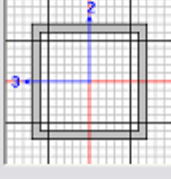
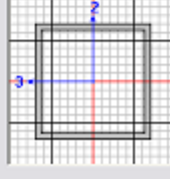
Section Name	Outside height (h3)	Top flange width (t2)	Top flange thickness (tf)	Web thickness (tw)	Bottom flange width (t2b)	Bottom flange thickness (tfb)
§7	0.508	0.3079	0.0205	7.900E-03	0.3079	0.0205
§8	0.508	0.3079	0.024	7.900E-03	0.3079	0.024
§9	0.508	0.3079	0.027	7.900E-03	0.3079	0.027
§10	0.508	0.3079	0.03	7.900E-03	0.3079	0.03
§11	0.508	0.3095	0.019	9.500E-03	0.3095	0.019
§12	0.508	0.3095	0.021	9.500E-03	0.3095	0.021
§13	0.508	0.3095	0.026	9.500E-03	0.3095	0.026
§14	0.508	0.3095	0.028	9.500E-03	0.3095	0.028

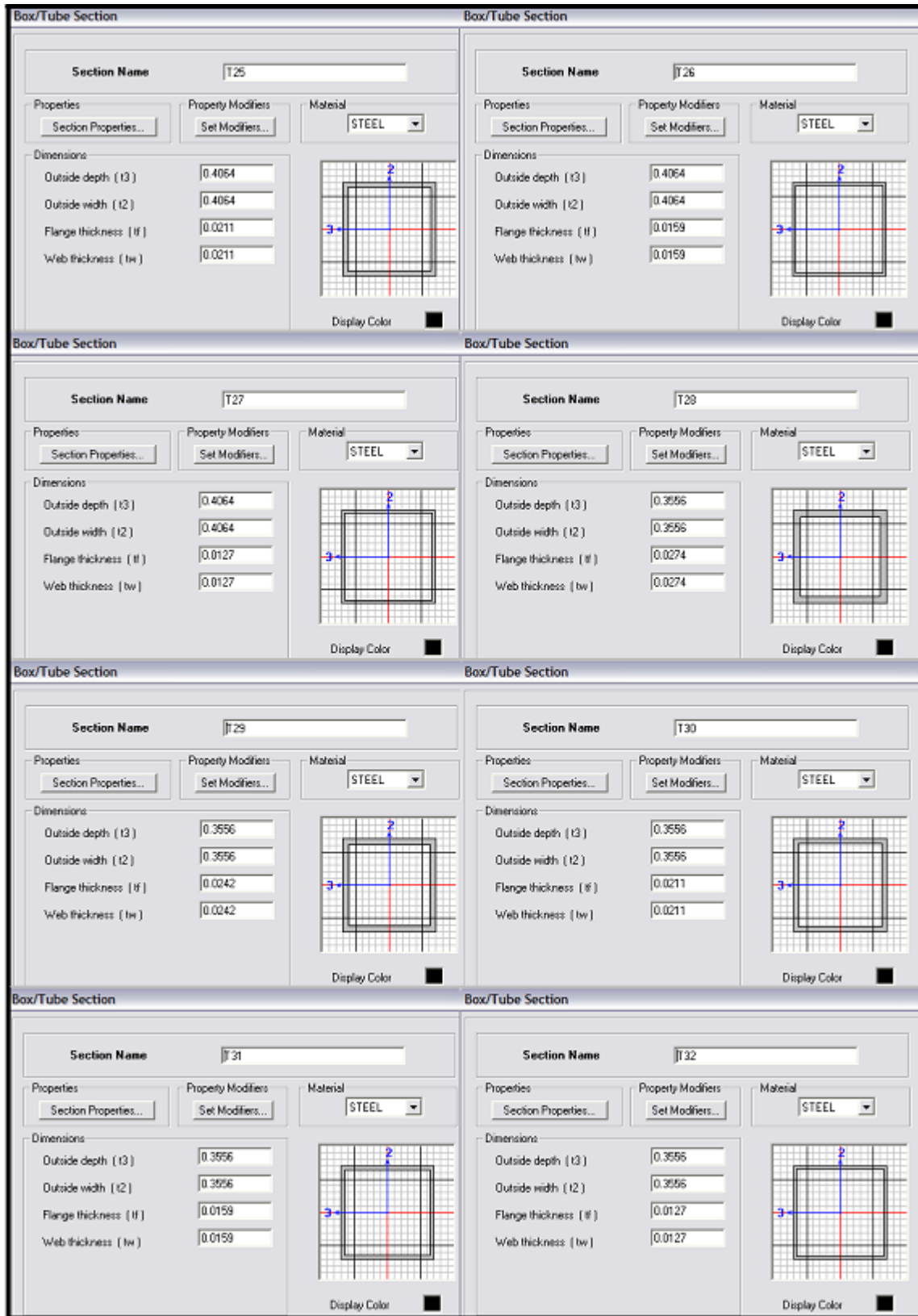
<p>I/Wide Flange Section</p> <p>Section Name S15</p> <p>Properties: Section Properties... Property Modifiers: Set Modifiers... Material: STEEL</p> <p>Dimensions:</p> <ul style="list-style-type: none"> Outside height (t3): 0.508 Top flange width (t2): 0.3095 Top flange thickness (tf): 0.031 Web thickness (tw): 9.500E-03 Bottom flange width (t2b): 0.3095 Bottom flange thickness (tfb): 0.031  <p>Display Color <input type="checkbox"/></p>	<p>I/Wide Flange Section</p> <p>Section Name S16</p> <p>Properties: Section Properties... Property Modifiers: Set Modifiers... Material: STEEL</p> <p>Dimensions:</p> <ul style="list-style-type: none"> Outside height (t3): 0.508 Top flange width (t2): 0.3127 Top flange thickness (tf): 0.022 Web thickness (tw): 0.0127 Bottom flange width (t2b): 0.3127 Bottom flange thickness (tfb): 0.022  <p>Display Color <input type="checkbox"/></p>
<p>I/Wide Flange Section</p> <p>Section Name S17</p> <p>Properties: Section Properties... Property Modifiers: Set Modifiers... Material: STEEL</p> <p>Dimensions:</p> <ul style="list-style-type: none"> Outside height (t3): 0.508 Top flange width (t2): 0.3127 Top flange thickness (tf): 0.025 Web thickness (tw): 0.0127 Bottom flange width (t2b): 0.3127 Bottom flange thickness (tfb): 0.025  <p>Display Color <input type="checkbox"/></p>	<p>I/Wide Flange Section</p> <p>Section Name S18</p> <p>Properties: Section Properties... Property Modifiers: Set Modifiers... Material: STEEL</p> <p>Dimensions:</p> <ul style="list-style-type: none"> Outside height (t3): 0.508 Top flange width (t2): 0.3127 Top flange thickness (tf): 0.028 Web thickness (tw): 0.0127 Bottom flange width (t2b): 0.3127 Bottom flange thickness (tfb): 0.028  <p>Display Color <input type="checkbox"/></p>
<p>I/Wide Flange Section</p> <p>Section Name S19</p> <p>Properties: Section Properties... Property Modifiers: Set Modifiers... Material: STEEL</p> <p>Dimensions:</p> <ul style="list-style-type: none"> Outside height (t3): 0.508 Top flange width (t2): 0.3127 Top flange thickness (tf): 0.031 Web thickness (tw): 0.0127 Bottom flange width (t2b): 0.3127 Bottom flange thickness (tfb): 0.031  <p>Display Color <input type="checkbox"/></p>	<p>I/Wide Flange Section</p> <p>Section Name S20</p> <p>Properties: Section Properties... Property Modifiers: Set Modifiers... Material: STEEL</p> <p>Dimensions:</p> <ul style="list-style-type: none"> Outside height (t3): 0.508 Top flange width (t2): 0.3127 Top flange thickness (tf): 0.035 Web thickness (tw): 0.0127 Bottom flange width (t2b): 0.3127 Bottom flange thickness (tfb): 0.035  <p>Display Color <input type="checkbox"/></p>
<p>I/Wide Flange Section</p> <p>Section Name S22</p> <p>Properties: Section Properties... Property Modifiers: Set Modifiers... Material: STEEL</p> <p>Dimensions:</p> <ul style="list-style-type: none"> Outside height (t3): 0.508 Top flange width (t2): 0.3127 Top flange thickness (tf): 0.028 Web thickness (tw): 0.0127 Bottom flange width (t2b): 0.3127 Bottom flange thickness (tfb): 0.028  <p>Display Color <input type="checkbox"/></p>	<p>Channel Section</p> <p>Section Name S25</p> <p>Properties: Section Properties... Property Modifiers: Set Modifiers... Material: STEEL</p> <p>Dimensions:</p> <ul style="list-style-type: none"> Outside depth (t3): 0.508 Outside flange width (t2): 0.1079 Flange thickness (tf): 0.02 Web thickness (tw): 7.900E-03  <p>Display Color <input type="checkbox"/></p>

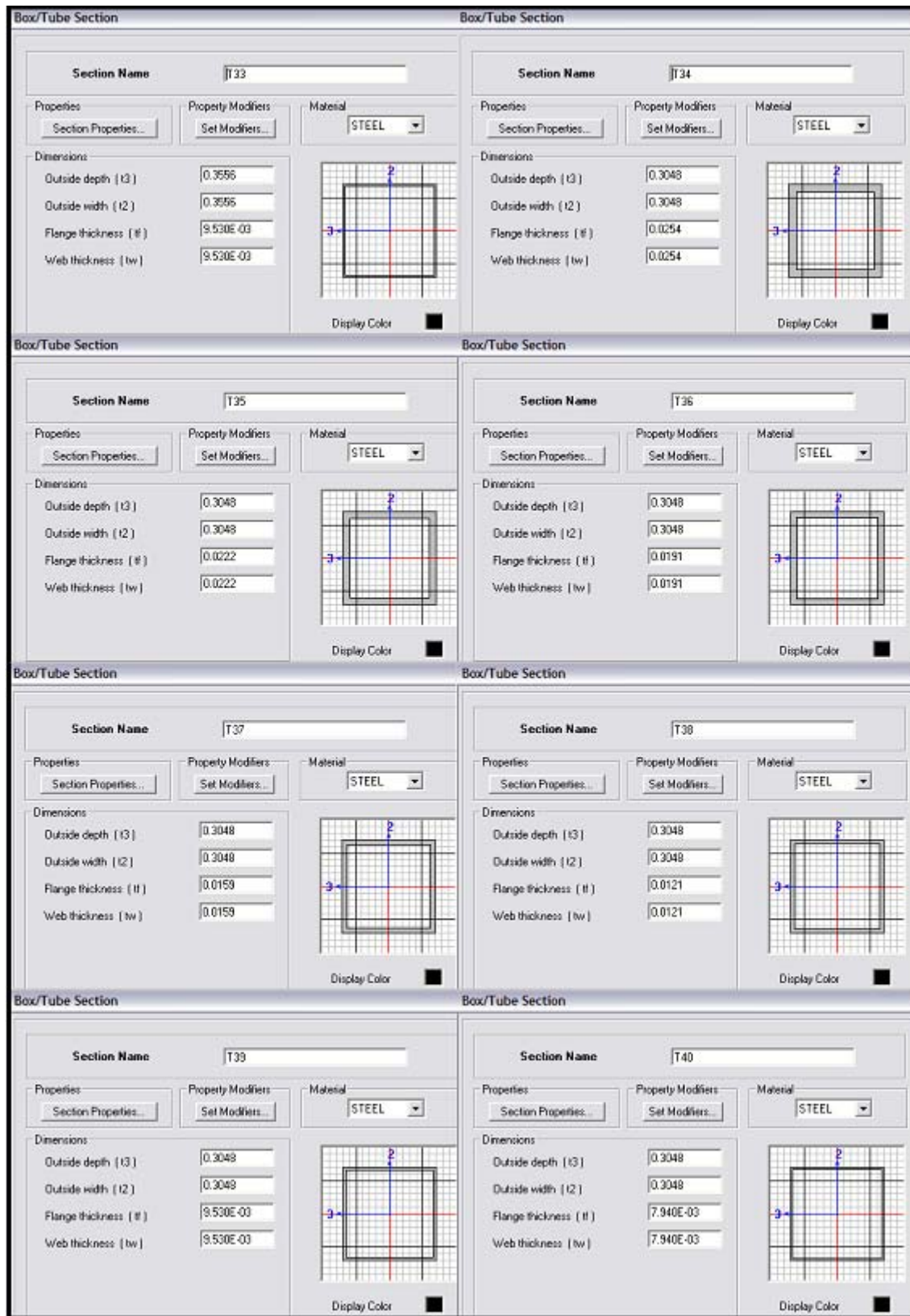






<p>Box/Tube Section</p> <p>Section Name T17</p> <p>Properties: Section Properties... Property Modifiers: Set Modifiers... Material: STEEL</p> <p>Dimensions:</p> <p>Outside depth (I3): 0.457 Outside width (I2): 0.457 Flange thickness (I4): 0.0347 Web thickness (Iw): 0.0347</p>  <p>Display Color <input type="checkbox"/></p>	<p>Box/Tube Section</p> <p>Section Name T18</p> <p>Properties: Section Properties... Property Modifiers: Set Modifiers... Material: STEEL</p> <p>Dimensions:</p> <p>Outside depth (I3): 0.457 Outside width (I2): 0.457 Flange thickness (I4): 0.0274 Web thickness (Iw): 0.0274</p>  <p>Display Color <input type="checkbox"/></p>
<p>Box/Tube Section</p> <p>Section Name T19</p> <p>Properties: Section Properties... Property Modifiers: Set Modifiers... Material: STEEL</p> <p>Dimensions:</p> <p>Outside depth (I3): 0.457 Outside width (I2): 0.457 Flange thickness (I4): 0.0242 Web thickness (Iw): 0.0242</p>  <p>Display Color <input type="checkbox"/></p>	<p>Box/Tube Section</p> <p>Section Name T20</p> <p>Properties: Section Properties... Property Modifiers: Set Modifiers... Material: STEEL</p> <p>Dimensions:</p> <p>Outside depth (I3): 0.457 Outside width (I2): 0.457 Flange thickness (I4): 0.019 Web thickness (Iw): 0.019</p>  <p>Display Color <input type="checkbox"/></p>
<p>Box/Tube Section</p> <p>Section Name T21</p> <p>Properties: Section Properties... Property Modifiers: Set Modifiers... Material: STEEL</p> <p>Dimensions:</p> <p>Outside depth (I3): 0.4572 Outside width (I2): 0.4572 Flange thickness (I4): 0.0159 Web thickness (Iw): 0.0159</p>  <p>Display Color <input type="checkbox"/></p>	<p>Box/Tube Section</p> <p>Section Name T22</p> <p>Properties: Section Properties... Property Modifiers: Set Modifiers... Material: STEEL</p> <p>Dimensions:</p> <p>Outside depth (I3): 0.4572 Outside width (I2): 0.4572 Flange thickness (I4): 0.0127 Web thickness (Iw): 0.0127</p>  <p>Display Color <input type="checkbox"/></p>
<p>Box/Tube Section</p> <p>Section Name T23</p> <p>Properties: Section Properties... Property Modifiers: Set Modifiers... Material: STEEL</p> <p>Dimensions:</p> <p>Outside depth (I3): 0.4064 Outside width (I2): 0.4064 Flange thickness (I4): 0.0316 Web thickness (Iw): 0.0316</p>  <p>Display Color <input type="checkbox"/></p>	<p>Box/Tube Section</p> <p>Section Name T24</p> <p>Properties: Section Properties... Property Modifiers: Set Modifiers... Material: STEEL</p> <p>Dimensions:</p> <p>Outside depth (I3): 0.4064 Outside width (I2): 0.4064 Flange thickness (I4): 0.0242 Web thickness (Iw): 0.0242</p>  <p>Display Color <input type="checkbox"/></p>



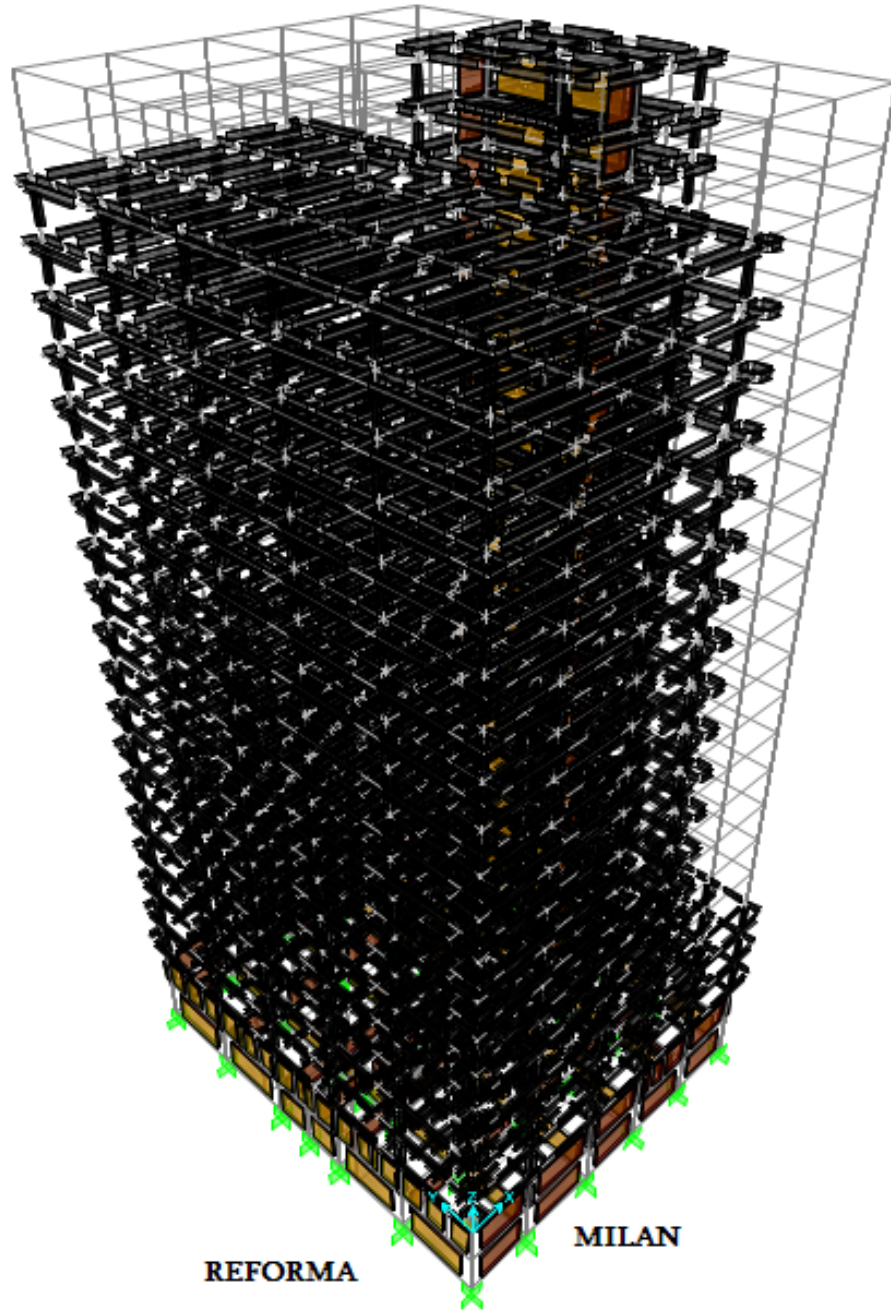


The image displays five panels for defining Box/Tube sections. Each panel contains the following information:

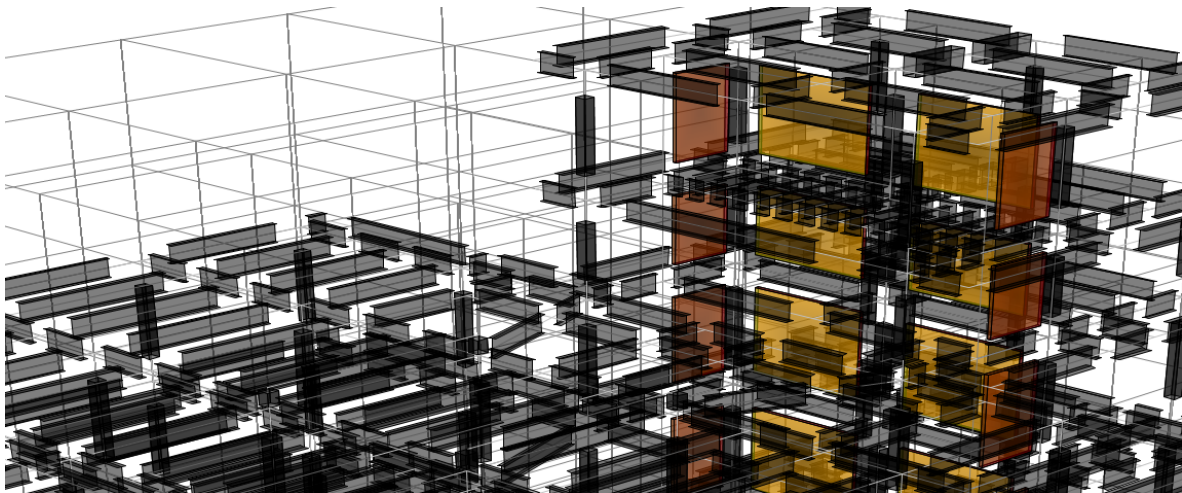
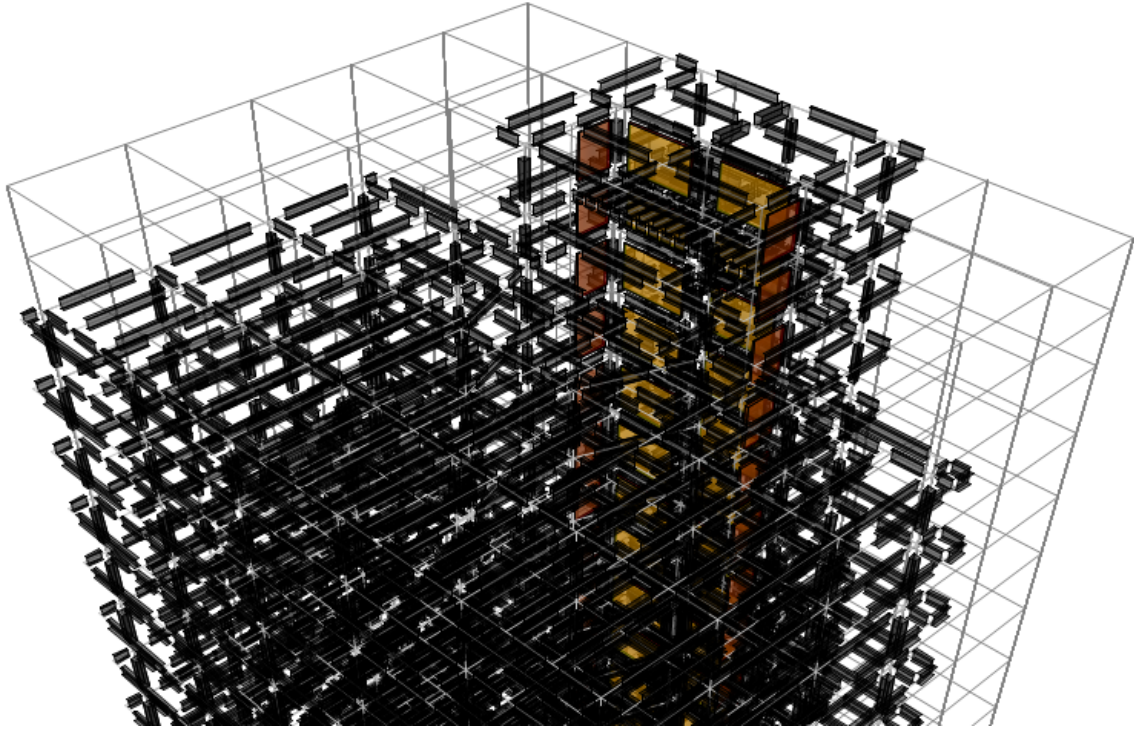
Section Name	Material	Outside depth (t3)	Outside width (t2)	Flange thickness (tf)	Web thickness (tw)
TR13	STEEL	0.558	0.508	0.0254	0.0254
TR14	STEEL	0.558	0.508	0.0222	0.0222
TR20	STEEL	0.558	0.4572	0.0191	0.0191
TR26	STEEL	0.5588	0.4064	0.0159	0.0159
TR32	STEEL	0.5588	0.3556	0.0127	0.0127

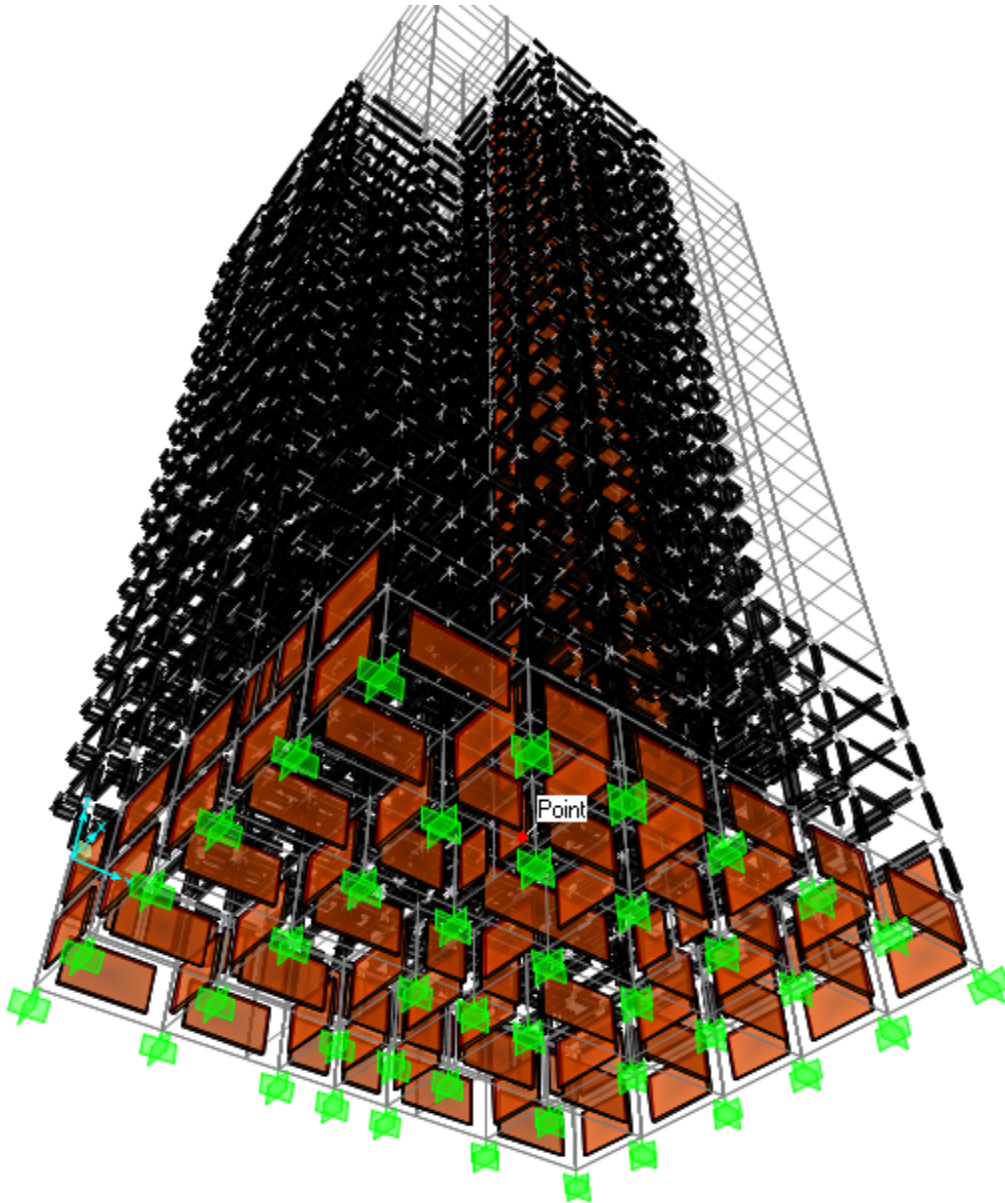
Each panel also includes a 'Display Color' checkbox and a grid diagram showing the section's geometry with dimensions t2, t3, and tf indicated.

VISTAS REPRESENTATIVAS DEL EDIFICIO





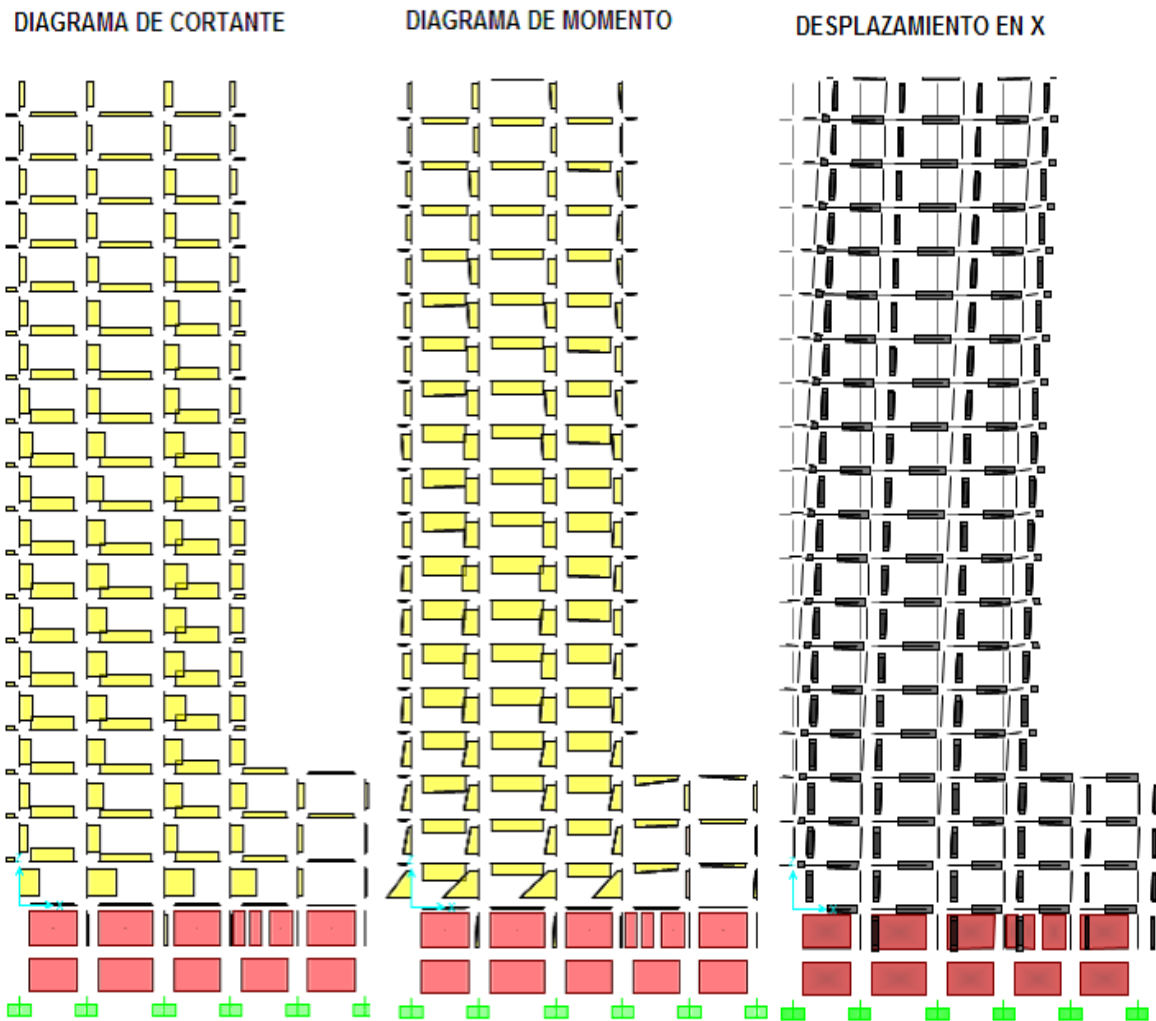




DIAGRAMAS DE CORTANTE Y DE MOMENTO.

Se presentan los diagramas de cortante y de momento de los ejes X1, X4, X9, Y1, Y4 y Y6, además se representa el desplazamiento del edificio ante la acción de un sismo en su respectiva dirección.

Elementos mecánicos en el eje X1



Elementos mecánicos en el eje X4

DIAGRAMA DE CORTANTE

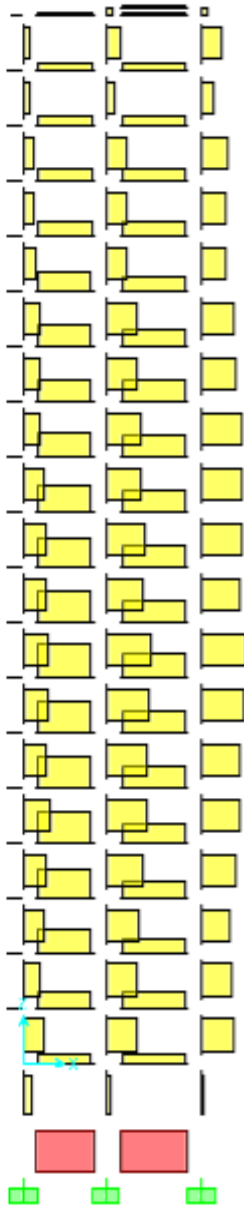


DIAGRAMA DE MOMENTO



DESPLAZAMIENTO

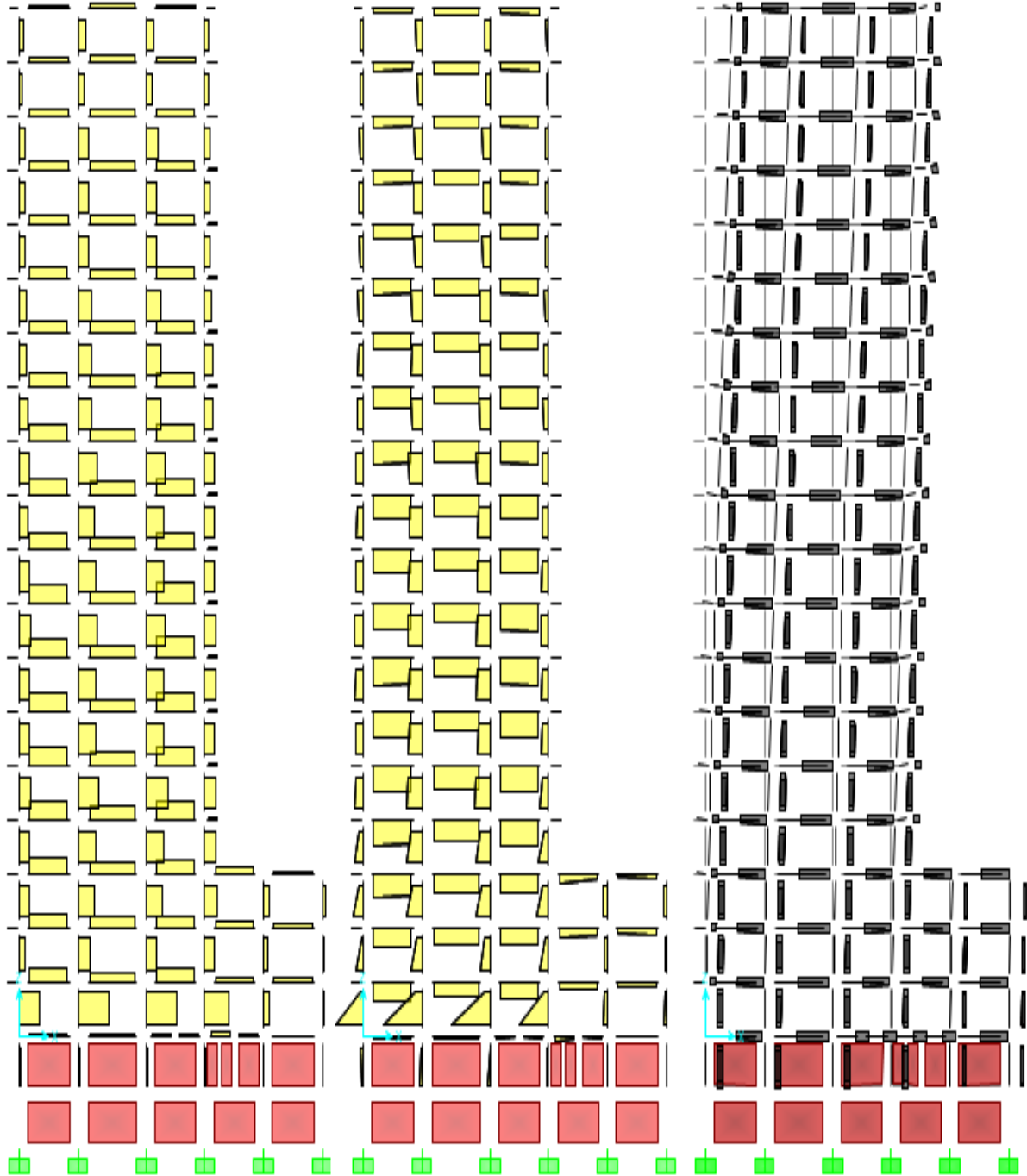


Elementos mecánicos en el eje X9

DIAGRAMA DE CORTANTE

DIAGRAMA DE MOMENTO

DESPLAZAMIENTO



Elementos mecánicos en el eje Y1

DIAGRAMA DE CORTANTE

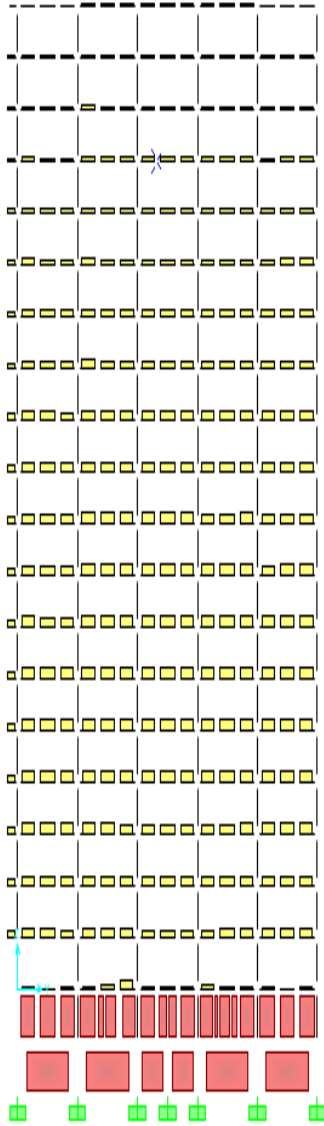
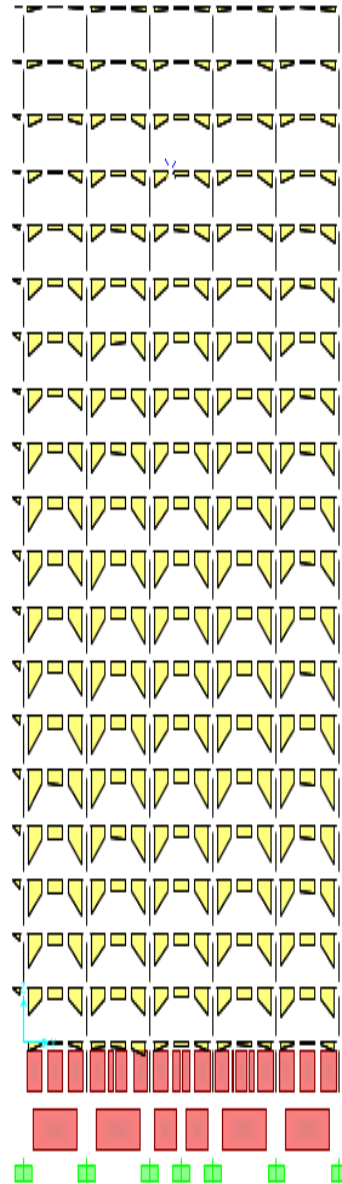
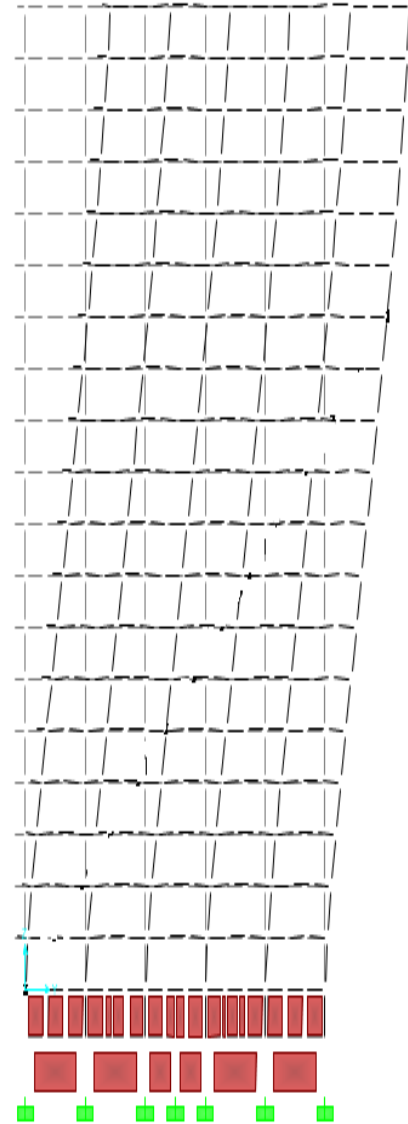


DIAGRAMA DE MOMENTO



DESPLAZAMIENTO

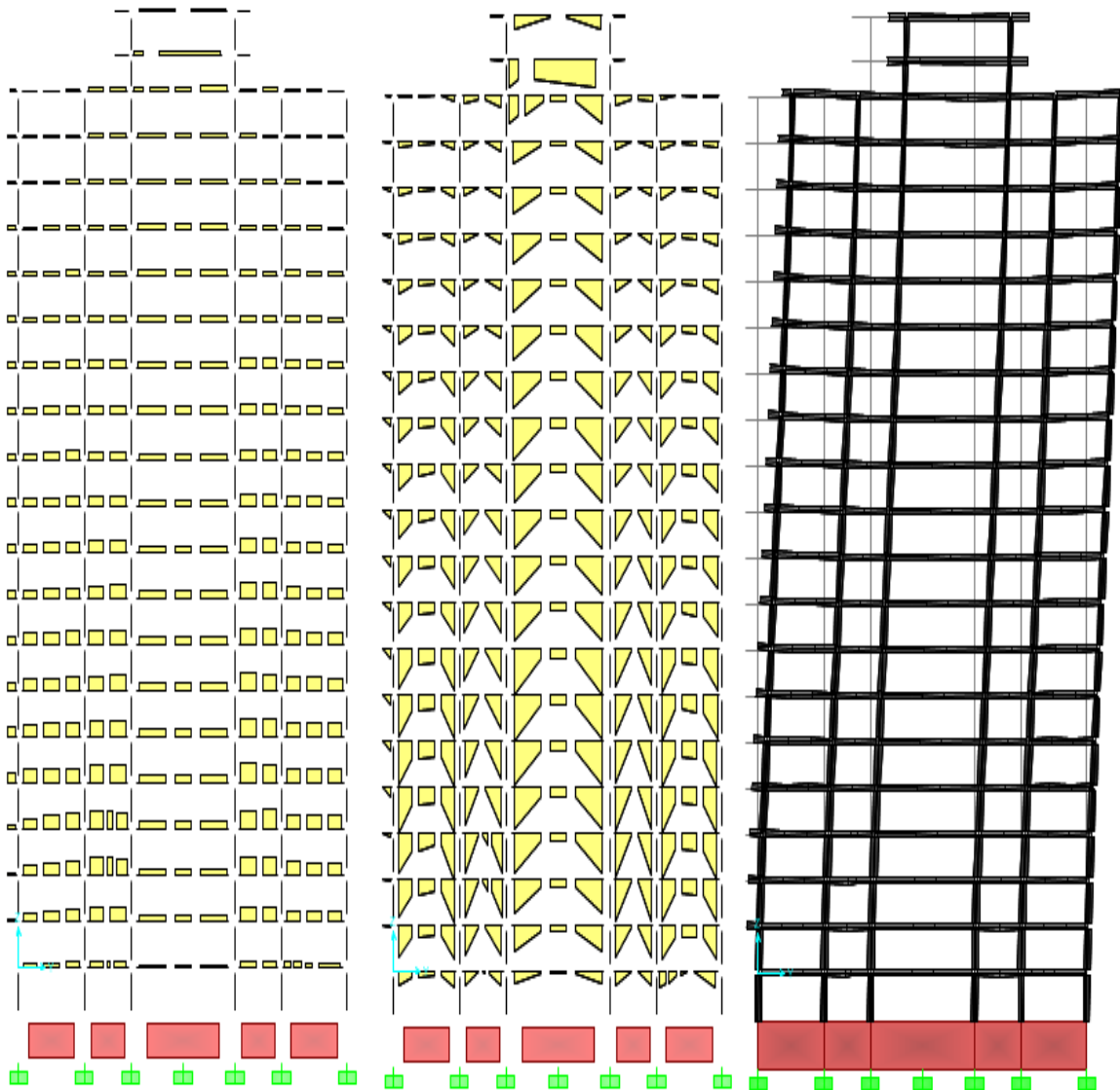


Elementos mecánicos en el eje Y4

DIAGRAMA DE CORTANTE

DIAGRAMA DE MOMENTOS

DESPLAZAMIENTO

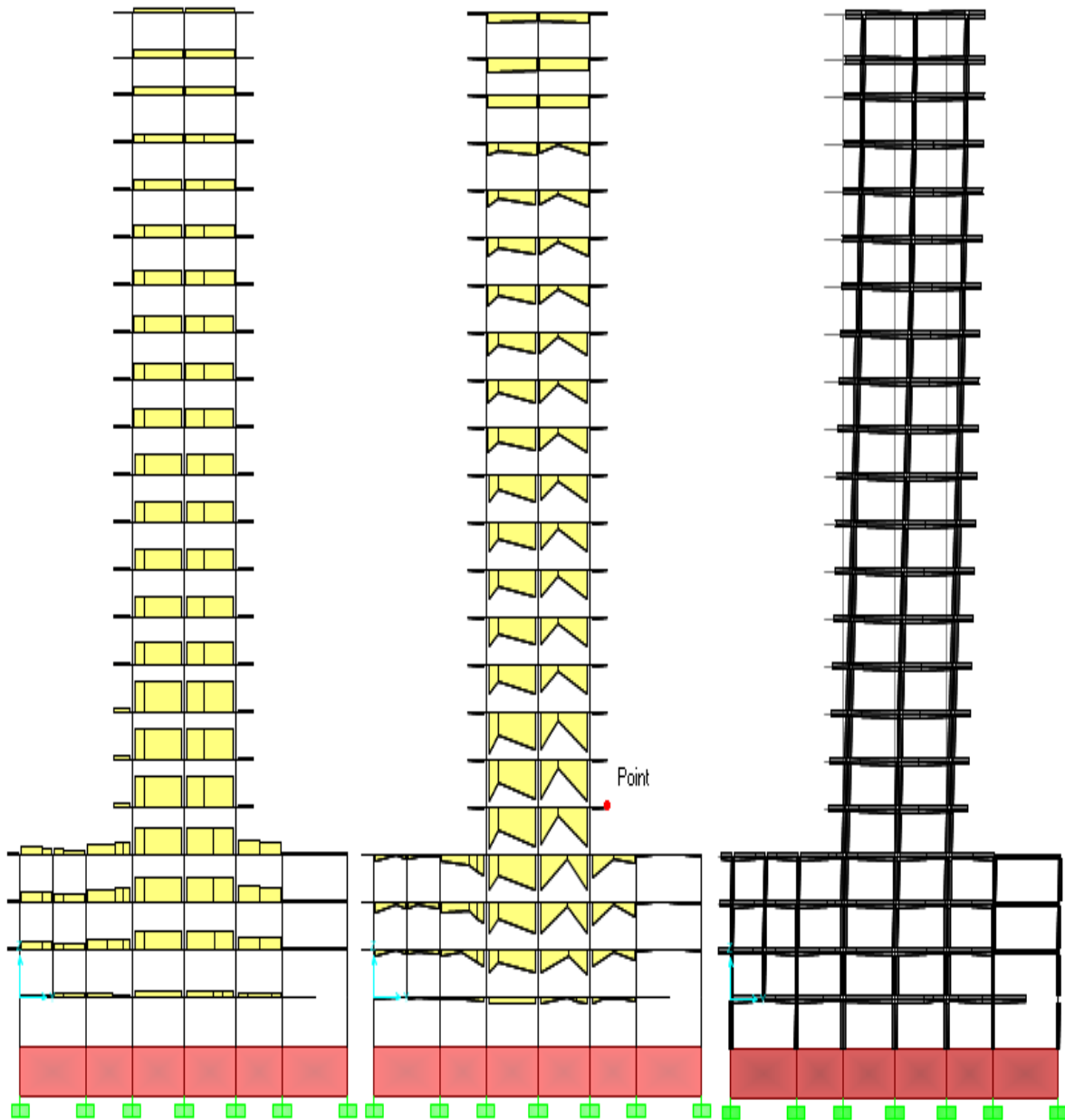


Elementos mecánicos en el eje Y6

DIAGRAMA DE CORTANTE

DIAGRAMA DE MOMENTO

DESPLAZAMIENTO

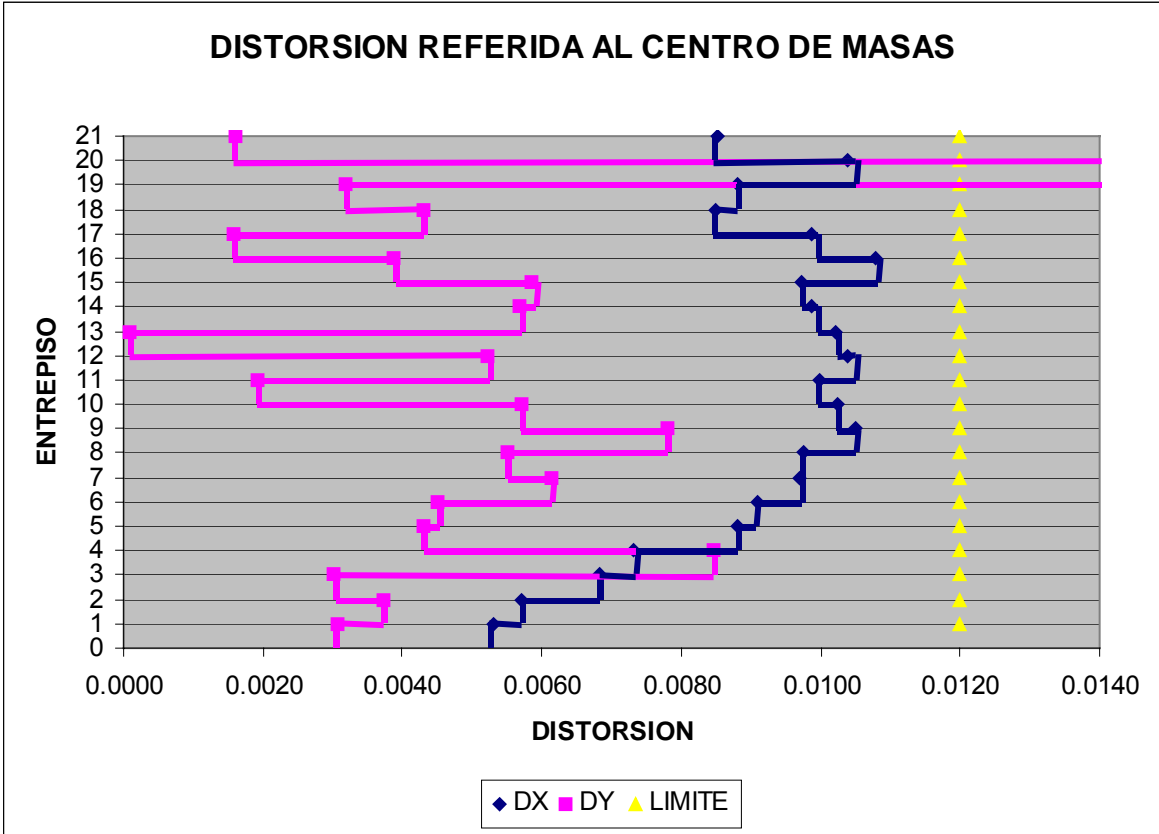


REVISIÓN DE DESPLAZAMIENTOS

Se presenta la revisión de desplazamientos de acuerdo a la máxima respuesta de la estructura provocada por la combinación de acciones del sismo en dirección X y sismo en dirección Y, de acuerdo al RCDF.

REVISIÓN DE DESPLAZAMIENTOS PARA LA COMBINACIÓN DE ACCIONES QUE INCLUYE SISMO EN DIRECCIÓN X							
DESPLAZAMIENTO PERMISIBLE:							
NIVEL	ELEVACION	ALTURA DE	DESPLAZAMIENTO	DESPLAZAMIENTO	O D/H	DESPLAZAMIENTO	RESULTADO
	[m]	ENTREPISO	TOTAL	RELATIVO		PERMISIBLE	
		[m]	[cm]	[cm]			
21	70.45	3.25	63.60	2.77	0.009	0.012	=PASA
20	67.20	2.6	60.83	2.70	0.010	0.012	=PASA
19	64.60	3.4	58.13	2.95	0.009	0.012	=PASA
18	61.20	3.4	55.18	2.89	0.009	0.012	=PASA
17	57.80	3.4	52.29	3.36	0.010	0.012	=PASA
16	54.40	3.4	48.93	3.67	0.011	0.012	=PASA
15	51.00	3.4	45.26	3.31	0.010	0.012	=PASA
14	47.60	3.4	41.95	3.36	0.010	0.012	=PASA
13	44.20	3.4	38.59	3.51	0.010	0.012	=PASA
12	40.80	3.4	36.08	3.53	0.010	0.012	=PASA
11	37.40	3.4	31.55	3.39	0.010	0.012	=PASA
10	34.00	3.4	28.16	3.48	0.010	0.012	=PASA
9	30.60	3.4	24.68	3.57	0.011	0.012	=PASA
8	27.20	3.4	21.11	3.27	0.010	0.012	=PASA
7	23.80	3.4	17.84	3.30	0.010	0.012	=PASA
6	20.40	3.4	14.54	3.08	0.009	0.012	=PASA
5	17.00	3.4	11.46	2.99	0.009	0.012	=PASA
4	13.60	3.4	8.47	2.49	0.007	0.012	=PASA
3	10.20	3.4	5.98	2.32	0.007	0.012	=PASA
2	6.80	3.4	3.66	1.91	0.006	0.012	=PASA
1	3.40	3.4	1.75	1.75	0.005	0.012	=PASA

REVISIÓN DE DESPLAZAMIENTOS PARA LA COMBINACIÓN DE ACCIONES QUE INCLUYE SISMO EN DIRECCIÓN Y							
DESPLAZAMIENTO PERMISIBLE.							
NIVEL	ELEVACION	ALTURA DE ENTREPISO	DESPLAZAMIENTO TOTAL	DESPLAZAMIENTO RELATIVO	Q/D/H	DESPLAZAMIENTO PERMISIBLE	RESULTADO
	[m]	[m]	[cm]	[cm]			
21	70.45	3.25	13.54	0.52	0.002	0.012	=PASA
20	67.20	2.6	13.02	15.74	0.061	0.012	=EXCEDE
19	64.80	3.4	30.72	1.08	0.003	0.012	=PASA
18	61.20	3.4	29.64	1.46	0.004	0.012	=PASA
17	57.80	3.4	28.18	0.54	0.002	0.012	=PASA
16	54.40	3.4	27.64	1.32	0.004	0.012	=PASA
15	51.00	3.4	26.32	1.99	0.006	0.012	=PASA
14	47.80	3.4	24.33	1.93	0.006	0.012	=PASA
13	44.20	3.4	22.40	2.22	0.000	0.012	=PASA
12	40.80	3.4	20.18	1.78	0.005	0.012	=PASA
11	37.40	3.4	18.40	0.65	0.002	0.012	=PASA
10	34.00	3.4	17.75	1.94	0.006	0.012	=PASA
9	30.80	3.4	15.81	2.65	0.008	0.012	=PASA
8	27.20	3.4	13.16	1.87	0.006	0.012	=PASA
7	23.80	3.4	11.29	2.09	0.006	0.012	=PASA
6	20.40	3.4	9.20	1.53	0.005	0.012	=PASA
5	17.00	3.4	7.67	1.46	0.004	0.012	=PASA
4	13.60	3.4	6.21	2.88	0.008	0.012	=PASA
3	10.20	3.4	3.33	1.02	0.003	0.012	=PASA
2	6.80	3.4	2.31	1.27	0.004	0.012	=PASA
1	3.40	3.4	1.04	1.04	0.003	0.012	=PASA



BIBLIOGRAFÍA

1. Reglamento de Construcciones del Distrito Federal.
2. Normas Técnicas Complementarias para Diseño por sismo.
3. Meli Piralla Roberto. **"DISEÑO ESTRUCTURAL"**. 2^{da}. Edición. Editorial Limusa.
4. Bazan E. y Meli R; **"DISEÑO SÍSMICO DE EDIFICIOS"** Ed. Limusa, México, 1999.
5. Chopa Anil K., Newmark Nathan M. **"DISEÑO DE ESTRUCTURAS RESISTENTES A SISMOS"**. Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A. C.
6. Boris B. Lin T. Y., Scalzi J. B. **"DISEÑO DE ESTRUCTURAS DE ACERO"**. 2^a Edición Editorial Limusa - Wiley, S. A.
7. W.M. Jenkins, **"ANÁLISIS Y MECÁNICA DE LAS ESTRUCTURAS"**, Representaciones y Servicios de Ingeniería, 1985.
8. R. Quaas, L. Alcántara, J. M. Espinosa, E. MENA, J. A. Otero, S. Medina. **"BASE MEXICANA DE DATOS DE SISMOS FUERTES"**. Cuadernos FICA México 1996.
9. www.cenapred.unam.mx
10. www.ssn.unam.mx