



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

01161 3
2ej.

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE INGENIERÍA
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

EFFECTOS PRODUCIDOS POR MOMENTOS TORSIONANTES DINAMICOS EN ESTRUCTURAS RETICULARES.

REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN INGENIERIA (*Estructuras*)

SOTOMAYOR BALLESTEROS, LUIS H.

CIUDAD UNIVERSITARIA 1992



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

EFFECTOS PRODUCIDOS POR MOMENTOS TORSIONANTES DINÁMICOS EN ESTRUCTURAS RETICULARES

- 1.- Introducción.
- 2.- Rotacional de diversos tipos de ondas en semiespacio elástico.
- 3.- Resultado de mediciones durante sismos en la base de un edificio.
- 4.- Espectro simplificado para el análisis por torsión en la base de un edificio.
- 5.- Análisis de los efectos producidos en un edificio de tres niveles por momentos torsionantes en la base.
- 6.- Efecto del cambio del centro de giro en la base de la estructura.
- 7.- Elementos mecánicos más desfavorables durante el movimiento torsional de la estructura.
- 8.- Comentarios finales.
- 9.- Referencias.

Luis Homero Sotomayor Ballesteros

1992

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

EFFECTOS PRODUCIDOS POR MOMENTOS
TORSIONANTES DINÁMICOS EN
ESTRUCTURAS RETICULARES

1.1 ANTECEDENTES.

Desde los tiempos más lejanos el hombre obtenía sus conocimientos casual y desorganizadamente, hasta que hace cuatro siglos el sabio italiano Galileo Galilei, por primera vez utilizó un método para conseguir sus descubrimientos e inventos. A este método que sigue la ciencia para su investigación, se le llama *método científico*.

El método científico sigue en su aplicación los siguientes pasos:

- a). - *Observación.*
- b). - *Hipótesis.*
- c). - *Experimentación.*
- d). - *Organización.*
- e). - *Teoría.*
- f). - *Verificación.*
- g). - *Ley o principio.*

Los fenómenos naturales han llamado siempre la atención de la humanidad, ya que traen consigo destrucción y muerte. Con el transcurrir del tiempo, el hombre ha propuesto, corregido y desechado diferentes teorías para explicar el origen de estos fenómenos, las cuales van desde considerarlos castigos divinos, hasta las hipótesis o leyes que conocemos en nuestros días.

A finales del siglo pasado y a principios del presente, se establecieron estaciones sismológicas en varios países alrededor del mundo. Mediante instrumentos sensibles se inició el registro instrumental de las ondas sísmicas generadas por terremotos lejanos, permitiendo determinar en forma relativamente precisa, la ubicación de los focos sísmicos.

EFFECTOS PRODUCIDOS POR MOMENTOS TORSIONANTES DINÁMICOS EN ESTRUCTURAS RETICULARES.

Al graficar sobre un mapa los focos de los sismos registrados en un periodo de tiempo dado, éstos se concentran siempre a lo largo de franjas angostas, las cuales separan grandes regiones oceánicas y continentales, indicando que la superficie terrestre está dividida por una serie de placas.

De acuerdo con conceptos geofísicos modernos, la mayor actividad sísmica en el mundo está asociada directa o indirectamente, con el movimiento relativo de las placas litosféricas y su interacción a lo largo de zonas de contacto. En los bordes entre bloques rígidos de la litósfera, se generan el 90 % de los sismos registrados instrumentalmente. A lo largo de la zona de contacto entre ambas placas se generan grandes fuerzas de fricción que las mantienen trabadas, generando esfuerzos en el material rígido de la corteza con la consiguiente acumulación de considerables cantidades de energía elástica de deformación. Cuando los esfuerzos sobrepasan la resistencia de la roca, o cuando se vencen las fuerzas de fricción, se produce la ruptura violenta y la liberación repentina de la energía acumulada en el material de la corteza, produciendo vibraciones que las percibimos en la superficie como temblores.

La ciudad de México ha sido afectada en repetidas ocasiones por varios sismos, los que han ocasionado cuantiosos daños materiales y la pérdida de vidas humanas. Los sismos de septiembre de 1985, destruyeron edificios vitales como: centros hospitalarios y educativos conjuntos habitacionales, centrales telefónicas, estaciones de radio y televisión, etc. Las condiciones locales del subsuelo de la ciudad de México, jugaron un papel muy importante, para que a una distancia aproximada de 400 km. se generaran los daños más considerables, contraponiéndose a las leyes de atenuación.

1.2 FENOMENOS DE AMPLIFICACIÓN.

Según las leyes de atenuación, la intensidad del movimiento disminuye con la distancia del epicentro. Sin embargo, se conoce desde hace tiempo que la intensidad, y consecuentemente, la cantidad de los daños producidos por terremotos, no sólo es función de la magnitud del sismo y de la distancia epicentral; la sacudida del terreno no varía significativamente de un sitio a otro y depende de la conformación del subsuelo y de la forma del terreno. Muchas variables afectan la amplitud de las ondas sísmicas. En general, se reconoce que los siguientes aspectos, influyen en la intensidad y en las características del movimiento del terreno (Fig 1.1):

- a). - *Las condiciones geológicas del subsuelo.*
- b). - *La topografía del terreno.*
- c). - *El mecanismo del terremoto y su direccionalidad.*

CONDICIONES LOCALES DEL SUELO.

En general, se reconoce que existe una relación entre la intensidad del movimiento del terreno, la severidad del daño ocasionado a edificaciones y las condiciones locales del suelo. Teóricamente se ha determinado que la aceleración asociada a ondas sísmicas aumenta en la superficie al pasar de un lecho rocoso (alta velocidad) a través de un estrato de sedimentos blandos (baja velocidad); el aumento depende de la relación de las velocidades de propagación en los dos medios y de la profundidad de la columna de suelo.

Así, las condiciones locales del subsuelo tienen un efecto sobre la amplitud del movimiento en la superficie; en general, la intensidad de la sacudida del terreno y la cuantía de daños, serán mayores en suelos blandos sin consolidar, que en suelo firme o rocoso.

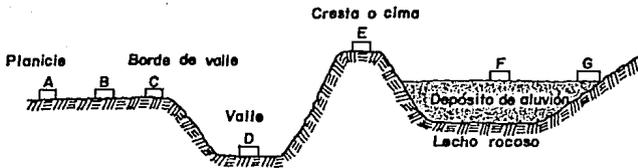


FIG.
1.1

ESQUEMA QUE ILUSTR A LOS RASGOS GEOLÓGICOS Y TOPOGRÁFICOS Y LAS CONDICIONES LOCALES DEL SUELO

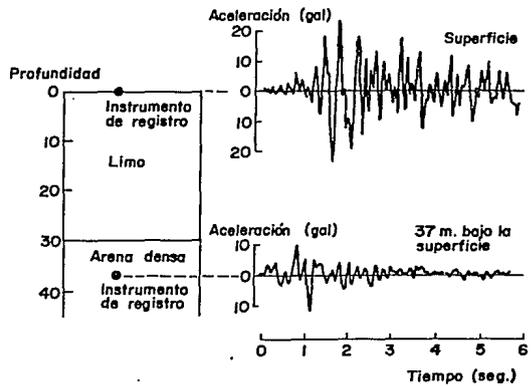


FIG.
1.2

REGISTROS DE ACELERACIONES OBTENIDOS EN URAYASU, JAPÓN

EFFECTOS PRODUCIDOS POR MOMENTOS TORSIONANTES DINÁMICOS EN ESTRUCTURAS RETICULARES.

En la Fig 1.2 se muestran dos registros de aceleraciones obtenidos en Urayasu, Japón: el inferior, es el registro de un instrumento a 37 mts. de profundidad; el superior, es el registro del movimiento del terreno en la superficie. La comparación de registros en pozos profundos con registros en la superficie, muestra la amplificación de las ondas cerca de la superficie.

El caso más notorio de amplificación dinámica de ondas sísmicas ha sido la ciudad de México, la cual está asentada en su mayor parte, sobre los sedimentos blandos y saturados del antiguo Lago de Texcoco y ha sufrido en varias ocasiones los efectos de sismos lejanos con origen en la zona de subducción en la costa del Pacífico.

El terremoto del 19 de septiembre de 1985 causado por la ruptura del segmento de placas frente al estado de Michoacán, no fue una excepción y ocasionó daños extensivos a la propiedad y la pérdida de numerosas vidas. A pesar de que el epicentro del sismo de gran magnitud $M_s = 8.1$ se localizó frente a la costa, y hubo algún daño en el litoral, el impacto principal del evento se experimentó en la ciudad de México, a 400 km. del área epicentral, donde causó gran destrucción.

La condición del subsuelo tan peculiar en la ciudad de México, resultante de sedimentos saturados en el lecho del histórico Lago de Texcoco, hace que estos estratos aluviales muestren periodos fundamentales de vibración en el intervalo de 2 a 3 seg., susceptibles de entrar en resonancia con ondas sísmicas de periodo largo.

En la Fig. 1.3 se muestran en forma esquemática los registros de aceleraciones del terremoto de 1985 y su posición relativa respecto al epicentro.

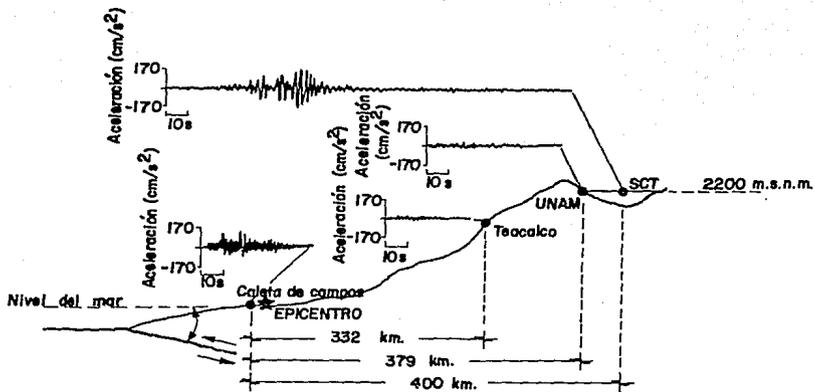


FIG.

1.3

SECCIÓN ESQUEMÁTICA QUE MUESTRA LA POSICIÓN RELATIVA DE LAS ESTACIONES, QUE REGISTRARON EL TERREMOTO DE MÉXICO DEL 19 DE SEPTIEMBRE DE 1985

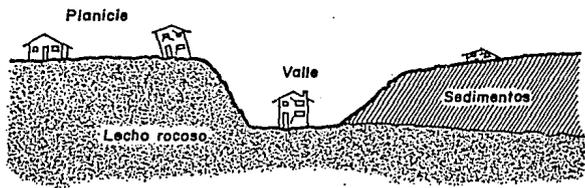


FIG.

1.4

EFFECTO DE LA TOPOGRAFÍA SOBRE LA INTENSIDAD DEL MOVIMIENTO DEL TERRENO

EFFECTOS PRODUCIDOS POR MOMENTOS TORSIONANTES DINÁMICOS EN ESTRUCTURAS RETICULARES.

En los registros de Teacalco y de la Universidad Nacional Autónoma de México, estaciones sismológicas situadas a 332 y 379 km. de distancia del epicentro respectivamente, se observa claramente el efecto de las leyes normales de atenuación, según las cuales la amplitud de las ondas decrece en función de la distancia. Notorio en el registro de la estación de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, situada sobre depósitos profundos de suelo blando, es el efecto de amplificación del movimiento en relación con la estación de la UNAM, localizada sobre terreno rocoso. En la UNAM, se registraron aceleraciones máximas de 0.047 g y en la SCT, a pocos kilómetros de distancia, aceleraciones de 0.187 g, una amplificación del orden de 4 veces; en este caso, la topografía no tuvo influencia, pues el terreno en este sector de la ciudad de México, es relativamente plano. La máxima intensidad y respuesta ocurrió en sitios con suelos aluviales de 50 mts. de profundidad.

De lo expuesto, se concluye que las características y profundidad del suelo subyacente tienen un efecto significativo sobre la intensidad de la sacudida y la severidad de los daños. Las ondas sísmicas pueden ser amplificadas a través de estratos de suelos aluviales blandos y la respuesta de los edificios puede aumentar considerablemente si el período natural de vibración de los mismos, coincide con el período dominante de la columna de suelo, dándose el fenómeno de resonancia.

CONDICIONES DE TOPOGRAFÍA.

La topografía del terreno influye significativamente en la intensidad del movimiento sísmico y puede mostrar un efecto amplificador o atenuador. Se han realizado análisis teóricos cuyos resultados indican que ciertas formas topográficas, especialmente montes y valles, muestran varios grados de amplificación. Dependiendo del contenido de frecuencias, de la dirección y del ángulo de incidencia de las ondas sísmicas, aumenta la amplitud del movimiento; en los bordes de valles, en la cresta y en las laderas de las colinas, se ha determinado analíticamente un incremento en la intensidad de la vibración; en el fondo del valle, en cambio, un efecto atenuador (Fig. 1.4).

Se han realizado investigaciones mediante procedimientos analíticos sobre la influencia de los valles en la amplitud e intensidad del movimiento sísmico (Fig. 1.1). Se ha comprobado (ref. 11) que la aceleración máxima del terreno en un sitio cercano al valle (punto B), se puede amplificar hasta en un 50 % respecto a un sitio en terreno plano (punto A) y en el propio borde del valle (punto C), la amplificación puede ser del doble, respecto al punto de referencia; en el fondo del valle (punto D), se puede registrar más bien un efecto atenuador y disminuir la aceleración máxima en un 65 %. Esto depende del tipo de las características de ondas que lleguen al sitio.

Se demuestra así teóricamente que la variación en la intensidad del movimiento sísmico puede ser realmente grande debido a irregularidades topográficas. Mediciones en sitio confirman estos resultados. Incluso, con sistemas de análisis complejos, es difícil cuantificar el efecto de amplificación causado por condiciones e irregularidades topográficas, debido a que las características

EFFECTOS PRODUCIDOS POR MOMENTOS TORSIONANTES DINÁMICOS EN ESTRUCTURAS RETICULARES.

reales son mucho más complicadas que las de los modelos simplificados asumidos en los estudios teóricos. Faltan por otro lado, más registros de sismos reales, cuyo análisis e interpretación puedan arrojar mayor luz sobre este fenómeno.

DIRECCIONALIDAD DE LAS ONDAS SÍSMICAS.

Ultimamente se ha reconocido que la direccionalidad de las ondas tiene un efecto determinante en la intensidad del movimiento sísmico. Modelos teóricos y la experiencia de recientes terremotos, demuestran que la intensidad de la sacudida varía, no solo según la distancia al epicentro, sino también, según la posición azimutal del sitio, respecto a la fuente sísmica y a la dirección en que se propaga la ruptura a lo largo de la falla.

La propagación de la dislocación en determinada dirección genera ondas sísmicas que son registradas en forma diferente a ambos lados de la fuente; en lugares localizados en la dirección de propagación de la ruptura se registran mayores intensidades y frecuencias más altas, en cambio, en sitios localizados en el lado opuesto al punto inicial de ruptura y a la dirección de propagación se experimentan menores intensidades y frecuencias más bajas (ref. 11).

Este fenómeno conocido como *efecto de direccionalidad*, se cree que se debe a que las ondas tienden a concentrarse o polarizarse en la dirección en que progresa la ruptura. Las leyes de atenuación no describen la variación azimutal de la intensidad respecto a la dirección de propagación de la ruptura y la orientación de la falla.

EFFECTOS PRODUCIDOS POR MOMENTOS TORSIONANTES DINÁMICOS EN ESTRUCTURAS RETICULARES.

Después de los sismos que se registraron en México en septiembre de 1985 y con el fin de estudiar los fenómenos de amplificación, han sido instalados más de 100 acelerógrafos de superficie, estructuras y pozos, por las siguientes instituciones:

- a). *Instituto de Ingeniería de la U. N. A. M.*
- b). *Fundación I. C. A.*
- c). *Centro de Instrumentación y Registro Sísmico de la Fundación Javier Barros Sierra.*
- d). *Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED).*

cada una de ellas, publica periódicamente boletines en los que informan los resultados obtenidos de analizar los registros de los sismos percibidos por las diferentes estaciones sísmicas que integran sus redes de observación.

A continuación se describe la red de observación sísmica, instalada por el Centro Nacional de Prevención de desastres (CENAPRED), así como los criterios de selección para ubicar las estaciones sísmicas.

1.3 RED DE OBSERVACIÓN SÍSMICA DEL CENAPRED.

El Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED), depende de la Secretaría de Gobernación y cuenta con la colaboración de la Universidad Nacional Autónoma de México. El centro está ubicado en terrenos de la UNAM en la parte sur de C.U. en México, D.F.

El CENAPRED investiga y estudia principalmente, los desastres de origen geológico y en particular, los fenómenos sísmicos. Para ello, el gobierno de Japón donó un sistema de observación sísmico de temblores fuertes, compuesto por 16 estaciones.

Dados los trágicos antecedentes de los temblores de 1985, se plantearon como objetivos principales del sistema, los estudios del comportamiento dinámico de suelos y estructuras, particularmente en la ciudad de México, y las características de propagación de ondas sísmicas originadas por temblores intensos en la zona de subducción a lo largo de las costas de Guerrero.

La red de observación sísmica del CENAPRED está compuesta por 16 estaciones autónomas de registro y un puesto central de recepción y procesamiento de la información, ubicado en las instalaciones de dicho Centro en C.U. El sistema está dividido en dos subredes: una instalada a lo largo de la línea Acapulco-México, y otra, en la ciudad de México.

RED DE ATENUACIÓN.

Esta subred consta de 5 estaciones acelerográficas distribuidas uniformemente entre Acapulco y México, ubicadas en las siguientes ciudades: Acapulco, Chilpancingo, Mezcala, Iguala y Cuernavaca (Fig 1.5).

EFFECTOS PRODUCIDOS POR MOMENTOS TORSIONANTES DINÁMICOS EN ESTRUCTURAS RETICULARES.

El propósito de esta red es el registro de los temblores en la zona de subducción de las costas de Guerrero, en donde la probabilidad de temblores intensos es muy alta, y el estudio de las características de propagación de las ondas en su trayectoria hacia la ciudad de México.

RED DE LA CIUDAD DE MÉXICO.

Esta subred consta de 11 estaciones instaladas en distintos puntos de la ciudad de México. La distribución de las estaciones se hizo con base en la zonificación geotécnica de la ciudad (Fig. 1.6).

Los principales objetivos de esta red son el estudio de las características de las ondas sísmicas incidentes en el valle provenientes de la costa y el comportamiento de los distintos suelos bajo excitación sísmica. Por esta razón se instalaron en la mayoría de las estaciones, no solo acelerómetros triaxiales en la superficie, sino también sensores triaxiales en pozos profundos a diferentes profundidades (Fig. 1.7).

La profundidad de los sensores se escogió con base en estudios de los suelos y de los perfiles estratigráficos de cada sitio. El criterio general fue localizar los sensores del pozo menos profundo a la mitad del primer estrato blando de arcilla y los sensores más profundos a la mitad del estrato duro.

En dos estaciones (9 y 15), se instalaron también instrumentos en un edificio cercano a la estación, uno en la base y otro en la azotea. La colocación de estos aparatos se hizo con el objeto de estudiar su respuesta dinámica durante un movimiento fuerte y la interacción suelo-estructura. El edificio de la Unidad Kennedy es una estructura de mampostería de cuatro niveles. El edificio de IMP, también de cuatro niveles, es de concreto preesforzado.

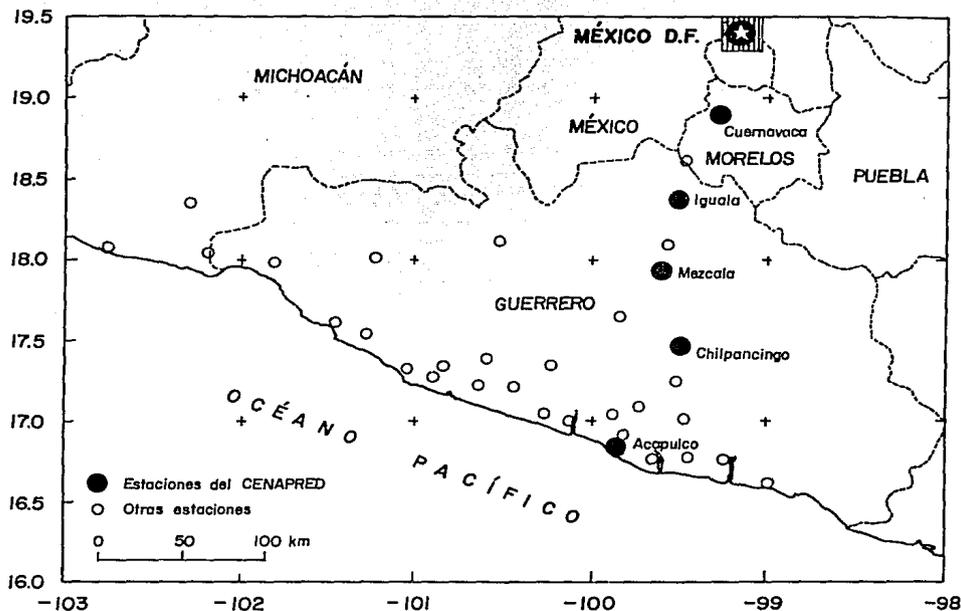


FIG.

1.5

LOCALIZACIÓN DE LAS ESTACIONES DE LA
RED DEL CENAPRED A LO LARGO DE LA
LÍNEA DE ATENUACIÓN ACAPULCO - MÉXICO

14

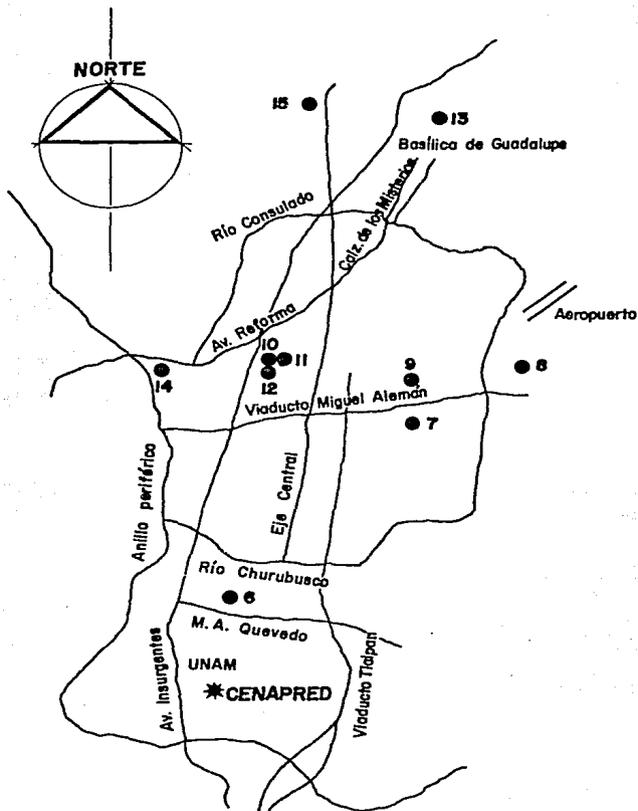


FIG.

1.6

LOCALIZACIÓN DE LAS ESTACIONES DE LA
RED DEL CENAPRED EN LA CIUDAD DE MÉXICO

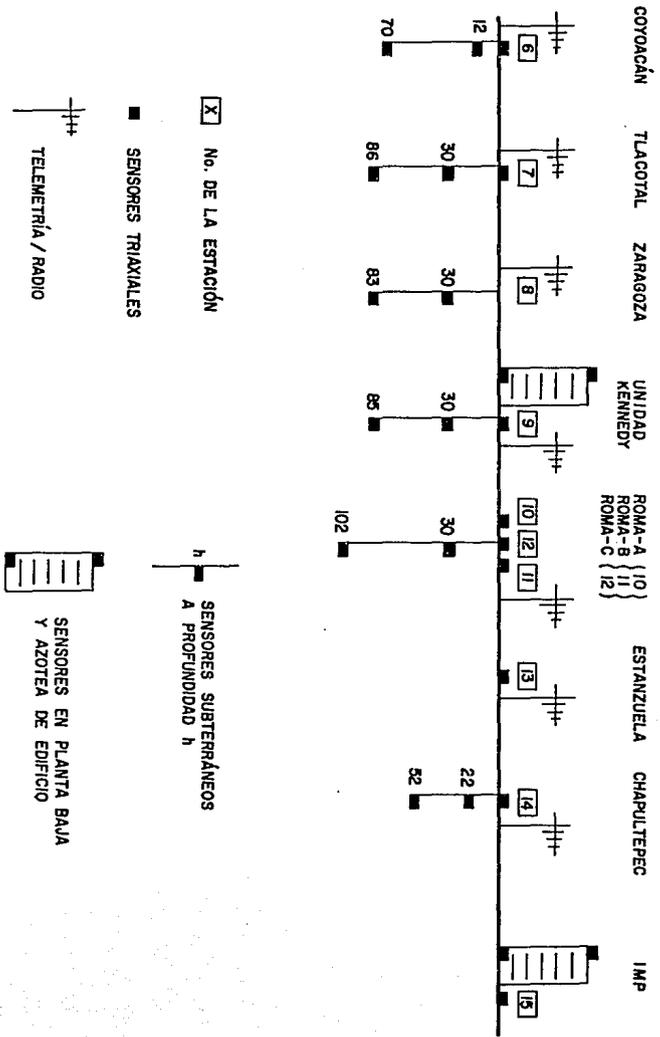


FIG. 17

EQUIPOS INSTALADOS EN LAS ESTACIONES DE LA RED EN LA CIUDAD DE MÉXICO

EFFECTOS PRODUCIDOS POR MOMENTOS TORSIONANTES DINÁMICOS EN ESTRUCTURAS RETICULARES.

REGISTROS DE SISMOS RECIENTES.

La red de observación del CENAPRED entró en operación en abril de 1990. El 31 de mayo de 1990, a las 01 hrs. 35 min. 27.7 seg., fue registrado el primer evento, ocurrido frente a las costas del Estado de Guerrero. El movimiento tuvo una magnitud $M_s = 5.8$, y fue sentido con una intensidad de IV en la ciudad de México.

Diez de las estaciones de la red de observación registraron el sismo. Las estaciones que no lo registraron fueron Iguala (4), Zaragoza (8) y la Estanzuela (13), debido a que el movimiento no rebasó el umbral de disparo. Las estaciones de Acapulco (1) y Chapultepec (14) todavía no estaban en operación.

En la *Tabla 1.1* se presenta un cuadro general de las estaciones que registraron el evento con el nombre de la estación, el tiempo de inicio del registro, su duración y las aceleraciones máximas obtenidas en las tres componentes.

El aspecto más interesante de los registros obtenidos en este temblor, son los acelerogramas de los sensores instalados en el subsuelo, que indican en general una amplificación del movimiento conforme emerge hacia la superficie. Esta característica se observa claramente en las estaciones Coyoacán (6), en Tlacotal (7) y particularmente en la estación Roma-C (12) (ver *Tabla 1.1*). En esta última, se deduce una amplificación de la aceleración máxima de la onda de aproximadamente 2 veces, desde el sensor colocado a 102 m. hacia el punto a 30 m. y una amplificación de casi 3 veces, desde el sensor colocado a 30 m. a la superficie.

TABLA 1.1

No. de la Estación	Nombre de la Estación	Tiempo Inicial del Registro HH: MM: SS	Duración del Registro (seg.)	A max X + Norte (gals)	A max Y + Este (gals)	A max Z + Vert. (gals)
2	CHILPANCINGO	07:36:10	31	6.44	-4.79	4.58
3	MEZCALA	07:36:15	36	-5.55	-4.46	4.24
5	QUERNAVACA	07:36:46	31	-4.79	6.25	2.08
6	COYOACÁN SUPERFICIE	07:36:58	46	-5.58	-6.90	1.89
6	COYOACÁN POZO 12 m.	07:36:58	46	-4.39	-5.43	-1.68
6	COYOACÁN POZO 70 m.	07:36:58	46	1.86	2.44	1.19
7	TLACOTAL SUPERFICIE	07:37:01.5	80	5.37	-6.74	-2.93
7	TLACOTAL POZO 30 m.	07:37:01.5	80	-6.78	-6.68	-2.14
7	TLACOTAL POZO 86 m.	07:37:01.5	80	2.04	-1.95	1.50
9	UNIDAD KENNEDY SUPERFICIE	07:37:01.5	66	-6.50	6.23	-2.62
9	UNIDAD KENNEDY POZO 30 m.	07:37:01.5	66	-5.80	-6.29	-1.80
9	UNIDAD KENNEDY BASE EDIFICIO	07:37:05	62	6.87	6.04	-2.11
9	UNIDAD KENNEDY AZOTEA EDIFICIO	07:37:03.4	67	-7.97	8.42	-2.14
10	ROMA - A	07:36:57.5	71	12.51	-8.06	-4.52
10	ROMA - A (redispore)	07:38:15.5	31	-3.91	-2.23	-0.82
11	ROMA - B	07:37:00.5	63	-7.69	-7.42	-2.59
12	ROMA - C SUPERFICIE	07:36:59.5	64	11.60	-9.06	-2.84
12	ROMA - C POZO 30 m.	07:36:59.5	64	-5.43	3.72	1.83
12	ROMA - C POZO 102 m.	07:36:59.5	64	-2.84	-1.68	1.34
15	IMP SUPERFICIE	07:36:58	64	-10.16	-10.77	-2.87
15	IMP BASE EDIFICIO	07:37:00.9	56	-6.84	-7.57	1.50
15	IMP AZOTEA EDIFICIO	07:37:00.9	56	17.03	22.58	1.96

CAPÍTULO II

ROTACIONAL DE DIVERSOS TIPOS DE ONDAS EN SEMIESPACIO ELÁSTICO

EFFECTOS PRODUCIDOS POR MOMENTOS
TORCIONANTES DINÁMICOS EN
ESTRUCTURAS PARTICULARES

2.1 TIPOS DE ONDAS SÍSMICAS.

Cualquier medio elástico responde a un impacto o perturbación externa vibrando; por ejemplo, al lanzar una piedra a un embalse produce ondas que se propagan en todas direcciones sobre la superficie del agua; un golpe impreso a un recipiente con gelatina, genera un movimiento ondulatorio de la masa; el repique de una campana hace que el aire vibre y se propaguen las ondas sonoras.

También la roca de la corteza terrestre tiene propiedades físicas que hacen que ésta, se deforme y vibre elásticamente cuando fuerzas externas actúan sobre ella. Cuando la roca se fractura debido a la deformación de la corteza, se libera la energía acumulada en el material que se disipa principalmente en forma de calor; una parte menor es irradiada en forma de ondas sísmicas que se propagan a través del medio sólido de la tierra en forma similar a las vibraciones producidas por el sonido o a las ondas en la superficie del agua.

Las ondas sísmicas se propagan en todas direcciones, a partir de la zona donde se inició la ruptura, llamada *foco*, hacen vibrar la superficie de la tierra, y son percibidas por las personas como temblores, eventos que son denominados terremotos cuando causan destrucción.

Existen dos tipos principales de ondas sísmicas, las que se propagan a través del medio sólido de la tierra, denominadas *ondas de cuerpo o internas* y las *ondas de superficie* que se propagan por la superficie terrestre.

EFFECTOS PRODUCIDOS POR MOMENTOS TORSIONANTES DINÁMICOS EN ESTRUCTURAS RETICULARES.

Existen dos tipos de ondas internas o de cuerpo:

1.- Ondas primarias u ondas P, que hacen vibrar una partícula en el sentido de propagación de las ondas; su movimiento es similar al de las ondas sonoras, comprimen y dilatan alternativamente el medio sólido a través del cual viajan (Fig. 2.1 a); también se les denomina ondas longitudinales o de compresión.

2.- Ondas secundarias u ondas S, que hacen vibrar una partícula en sentido perpendicular a la trayectoria de las ondas, producen esfuerzos de cortante en el medio sólido en que se propagan, también se les denomina ondas transversales o de cortante (Fig 2.1 b)

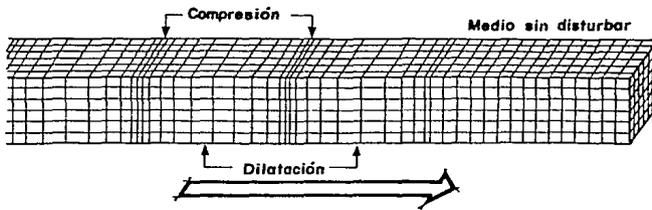
Las ondas de superficie se dividen a su vez en dos tipos:

1.- Ondas Love u ondas L, cuyo movimiento es similar al de las ondas S, hacen vibrar la partícula horizontalmente en sentido perpendicular a la dirección de propagación, sin presentar movimiento vertical (Fig. 2.1 c).

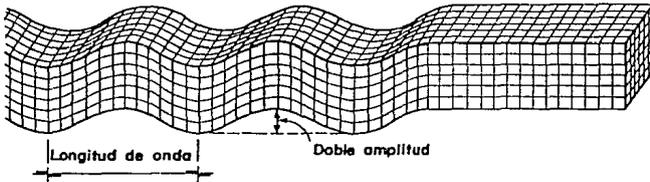
2.- Ondas Rayleigh u ondas R, cuyo movimiento es similar al de las ondas en la superficie del agua, hacen vibrar una partícula sobre un plano que apunta en dirección de la trayectoria de las ondas, con movimiento elíptico horizontal y vertical simultáneamente (Fig. 2.1 d).

La velocidad de propagación de las ondas sísmicas depende de la densidad y de las propiedades elásticas de la roca y del material a través del cual se transmiten.

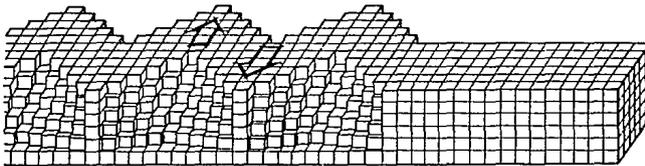
a) ONDAS "P"



b) ONDAS "S"



c) ONDAS "LOVE"



d) ONDAS "RAYLEIGH"

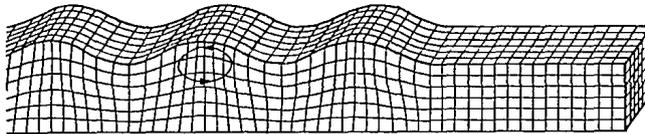


FIG.
2.1

TIPOS DE ONDAS SÍSMICAS

No

HAY

Page.

22

EFFECTOS PRODUCIDOS POR MOMENTOS TORSIONANTES DINÁMICOS EN ESTRUCTURAS RETICULARES.

2.2 LA PROPAGACIÓN DE LAS ONDAS EN UN MEDIO SOLIDO ELÁSTICO.

La acción de una fuerza aplicada repentinamente, no se transmite al mismo tiempo a todas las partes del cuerpo. Al principio las partes alejadas del cuerpo permanecen tranquilas, y las deformaciones producidas por la fuerza, se propagan a través del cuerpo en forma de ondas elásticas. Si las dimensiones del cuerpo son grandes, el tiempo que toman las ondas para recorrer el cuerpo llega a ser de importancia práctica y deben ser consideradas. Se tienen tales problemas, por ejemplo, al tratar el efecto de impacto u ondas producidas en los sismos.

Al tratar la propagación de ondas en un medio elástico, es de provecho usar ecuaciones diferenciales en términos de desplazamientos.

$$\begin{aligned}(\lambda + G) \frac{\partial e}{\partial x} + G \nabla^2 u + X &= 0 \\(\lambda + G) \frac{\partial e}{\partial y} + G \nabla^2 v + Y &= 0 \\(\lambda + G) \frac{\partial e}{\partial z} + G \nabla^2 w + Z &= 0\end{aligned} \quad (2.1)$$

Para obtener las ecuaciones de movimientos pequeños de estas ecuaciones de equilibrio, es necesario solamente añadir las fuerzas de inercia. Al suponer que no hay fuerzas de cuerpo, las ecuaciones de movimiento son:

$$\begin{aligned}(\lambda + G) \frac{\partial e}{\partial x} + G \nabla^2 u - \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} &= 0 \\(\lambda + G) \frac{\partial e}{\partial y} + G \nabla^2 v - \rho \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} &= 0 \\(\lambda + G) \frac{\partial e}{\partial z} + G \nabla^2 w - \rho \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} &= 0\end{aligned} \quad (2.2)$$

**EFFECTOS PRODUCIDOS POR MOMENTOS TORSIONANTES DINÁMICOS
EN ESTRUCTURAS RETICULARES.**

en donde e es la deformación volumétrica, y el símbolo ∇^2 representa la operación:

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$$

Al suponer que la deformación producida por las ondas, es tal, que el volumen de expansión es cero; la deformación consistirá solamente de distorsión cortante y rotación. Las ecuaciones (2.2) se convierten entonces:

$$\begin{aligned} G \nabla^2 u - \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} &= 0 \\ G \nabla^2 v - \rho \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} &= 0 \\ G \nabla^2 w - \rho \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} &= 0 \end{aligned} \quad (2.3)$$

estas ecuaciones son para *ondas de distorsión "S"*.

Al considerar ahora la deformación producida por las ondas, la rotación de un elemento con respecto al eje z es:

$$\omega_z = \frac{1}{2} \left[\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right] \quad (a)$$

Expresiones análogas dan la rotación alrededor de los ejes x y y . La deformación es irrotacional puede ser representada mediante:

$$\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} = 0, \quad \frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial z} = 0, \quad \frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial x} = 0 \quad (b)$$

Estas ecuaciones son satisfechas si los desplazamientos u , v , w son derivados de una función ϕ , como sigue:

$$u = \frac{\partial \phi}{\partial x}, \quad v = \frac{\partial \phi}{\partial y}, \quad w = \frac{\partial \phi}{\partial z} \quad (c)$$

**EFFECTOS PRODUCIDOS POR MOMENTOS TORSIONANTES DINÁMICOS
EN ESTRUCTURAS RETICULARES.**

Entonces:

$$e = \nabla^2 \phi, \quad \frac{\partial e}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \nabla^2 \phi = \nabla^2 u$$

Al sustituir estas expresiones en las ecuaciones (2.2):

$$\begin{aligned} (\lambda + 2G) \nabla^2 u - \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} &= 0 \\ (\lambda + 2G) \nabla^2 v - \rho \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} &= 0 \\ (\lambda + 2G) \nabla^2 w - \rho \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} &= 0 \end{aligned} \quad (2.4)$$

se obtienen ecuaciones para ondas de dilatación "P".

Un caso más general de propagación de ondas en un medio elástico, es obtenido por superposición de ondas de distorsión y ondas de dilatación. Para ambas clases de ondas, las ecuaciones de movimiento tienen la forma común:

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} = a^2 \nabla^2 \psi \quad (2.5)$$

en donde:

$$a = c_1 = \sqrt{\frac{\lambda + 2G}{\rho}} \quad (2.6)$$

para el caso de ondas de dilatación, y:

$$a = c_2 = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (2.7)$$

para el caso de ondas de distorsión.

2.3 ECUACIONES QUE DEFINEN MATEMÁTICAMENTE A LAS ONDAS DE CUERPO.

Si una perturbación es producida en un punto de un medio elástico, las ondas se irradian desde este punto en todas direcciones. Sin embargo, a una gran distancia de ese lugar, tales ondas pueden considerarse como *ondas planas* y se puede suponer que todas las partículas se mueven paralelas a la dirección de propagación de la onda (*Ondas longitudinales o de dilatación*), o perpendicular a esta dirección (*Ondas transversales o de distorsión*).

a). - Ondas longitudinales "P".

Al considerar el eje x en la dirección de propagación de la onda, entonces u es función de x y t , y las ecuaciones (2.4) dan:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = c_1^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad (2.8)$$

donde c_1 está definido por la ecuación (2.6).

Al considerar el marco de referencia mostrado en la Fig. 2.3, se puede considerar que el movimiento para este tipo de ondas queda descrito por:

$$\begin{aligned} u &= A \sin \frac{2\pi}{L} (x \pm c_1 t) \\ v &= 0 \\ w &= 0 \end{aligned} \quad (2.9)$$

Como λ y G pueden escribirse en términos de E y el módulo de Poisson:

$$\begin{aligned} \lambda &= \frac{\nu E}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)} \\ G &= \frac{E}{2(1 + \nu)} \end{aligned}$$

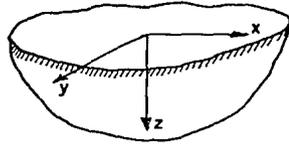


FIG.

2.3

MARCO DE REFERENCIA DEL SEMI-ESPACIO ELÁSTICO

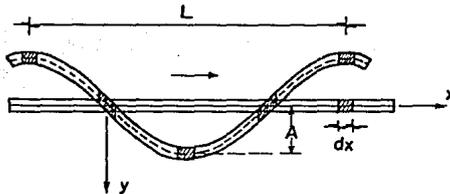


FIG.

2.4

ONDAS TRANSVERSALES "S"

**EFFECTOS PRODUCIDOS POR MOMENTOS TORSIONANTES DINÁMICOS
EN ESTRUCTURAS RETICULARES.**

Al sustituir las expresiones anteriores en la ecuación (2.6):

$$c_1 = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)\rho}} \quad (2.10)$$

Si se usa el signo negativo en las ecuaciones (2.9), el movimiento es hacia la derecha con una velocidad c_1 conforme se incrementa el tiempo t ; L es la longitud de onda y A es la amplitud de la misma.

b). - Ondas transversales "S".

Al suponer que el eje x tiene la dirección de propagación de la onda y el eje y en la dirección del desplazamiento transversal, se tiene que v es función de x y t . Entonces, de las ecuaciones (2.3):

$$\frac{\partial^2 v}{\partial t^2} = c_2^2 \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} \quad (2.11)$$

Cualquier función del tipo $f(x - c_2 t)$ es una solución de la ecuación anterior, por ejemplo:

$$\begin{aligned} u &= 0 \\ v &= A \operatorname{sen} \frac{2\pi}{L} (x - c_2 t) \\ w &= 0 \end{aligned} \quad (2.12)$$

La longitud de la onda es L , A es la amplitud (ver Fig. 2.4) y c_2 la velocidad de propagación cuyo valor está dado por la ecuación (2.7), también puede expresarse como:

$$c_2 = c_1 \sqrt{\frac{(1-2\nu)}{2(1-\nu)}} \quad (2.13)$$

2.4 ECUACIONES QUE DEFINEN MATEMÁTICAMENTE A ONDAS SUPERFICIALES.

En un cuerpo elástico es posible tener otro tipo de ondas, las cuales se propagan sobre la superficie y penetran solamente muy poco al interior del cuerpo. Estas ondas son similares a las ondas producidas en una superficie lisa de agua cuando una piedra es arrojada en ella. Estas son llamadas *ondas superficiales*.

a). - Ondas "Rayleigh".

En 1885, Lord Rayleigh, físico inglés que estudiaba problemas acústicos, demostró la existencia de ondas en la superficie libre de un sólido elástico. Este tipo de ondas se conocen como *Ondas de Rayleigh* y su propagación no está limitada a medios estratificados también se pueden propagar, a través de un semiespacio homogéneo.

Rayleigh, quien fue el primero en investigar este tipo de ondas, comentó: "No es improbable que las ondas superficiales jueguen un papel importante en los sismos, y en la colisión de sólidos elásticos. Separándose en dos dimensiones solamente, pueden adquirir a una gran distancia de la fuente una preponderancia creciente continuamente".

El movimiento de las partículas generado por las ondas de Rayleigh sigue trayectorias elípticas con ciclos retrógrados (a diferencia de los ciclos progresivos que se presentan en las ondas superficiales en los líquidos) en el plano vertical que contiene a la dirección de propagación (Fig. 2.5).

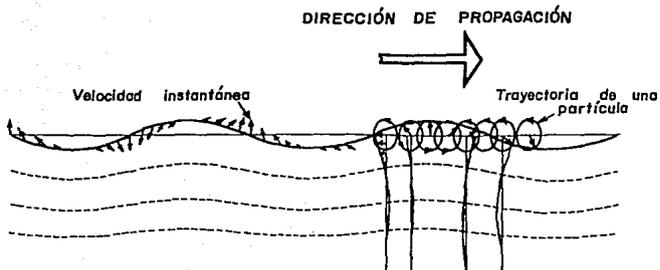


FIG.
2.5

ONDAS RAYLEIGH

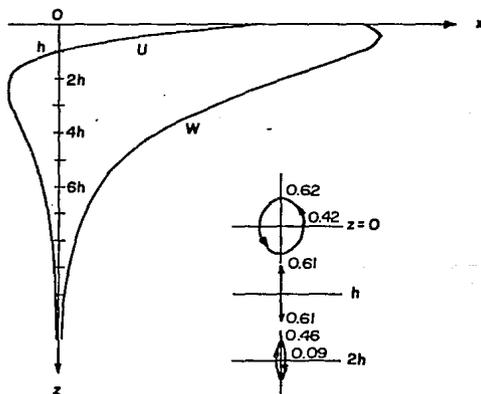


FIG.
2.6

DESPLAZAMIENTOS HORIZONTAL (U) Y VERTICAL (W)
PARA ONDAS RAYLEIGH

**EFFECTOS PRODUCIDOS POR MOMENTOS TORSIONANTES DINÁMICOS
EN ESTRUCTURAS RETICULARES.**

El criterio para ondas superficiales es que la amplitud del desplazamiento en el medio, decrece de manera exponencial con el incremento de la profundidad (Fig. 2.6), y tienden a ser cero cuando $z \rightarrow \infty$.

Se puede considerar un semiespacio elástico $z \geq 0$, y suponer que los desplazamientos estén representados por la parte real de las siguientes expresiones:

$$\begin{aligned} u &= A e^{-bz} [i k(x-ct)] \\ v &= 0 \\ w &= B e^{-bz} [i k(x-ct)] \end{aligned} \quad (2.14)$$

donde: i es la unidad imaginaria $\sqrt{-1}$, A y B son constantes y b es un coeficiente real y positivo.

Una solución general del tipo anterior que satisfaga las ecuaciones de movimiento, puede ser:

$$\begin{aligned} u &= Q \left[e^{-[\gamma_1 kz]} - \left[1 - \frac{c^2}{2\beta^2} \right] e^{-[\gamma_2 kz]} \right] \text{sen}(\omega t - kx) \\ v &= 0 \\ w &= Q \left[1 - \frac{c^2}{\alpha^2} \right]^{\frac{1}{2}} \left[-e^{-[\gamma_1 kz]} + \left[1 - \frac{c^2}{2\beta^2} \right]^{-1} e^{-[\gamma_2 kz]} \right] \text{cos}(\omega t - kx) \end{aligned} \quad (2.15)$$

donde:

$$\gamma_1 = \left[1 - \frac{c^2}{\alpha^2} \right]^{\frac{1}{2}} \quad \gamma_2 = \left[1 - \frac{c^2}{\beta^2} \right]^{\frac{1}{2}}$$

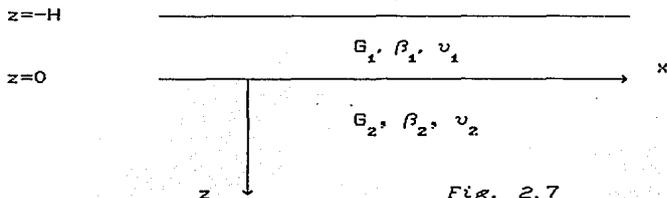
**EFFECTOS PRODUCIDOS POR MOMENTOS TORSIONANTES DINÁMICOS
EN ESTRUCTURAS RETICULARES.**

b). - Ondas "Love".

En 1911, el inglés A.H. Love, resolvió el problema de ondas propagándose en una capa superficial. Este tipo de ondas se encuentran polarizadas en un plano horizontal perpendicular a la dirección de propagación y se conocen como *ondas de Love*. A diferencia de las ondas de Rayleigh, no muestran movimiento vertical y se observan en las componentes horizontales de un sismograma.

Puede demostrarse que la propagación de ondas superficiales (que se atenúen con la profundidad) del tipo *SH* es imposible en un semiespacio homogéneo. No obstante, las ondas *SH* superficiales se presentan en la superficie de la tierra. Love demostró que una teoría suficiente para explicar las ondas *SH* superficiales puede desarrollarse, si se tiene un estrato homogéneo de espesor uniforme H con propiedades G_1 y β_1 sobre un semiespacio de propiedades G_2 y β_2 como se muestra en la *Fig. 2.7*.

Se puede considerar un semiespacio elástico, homogéneo e isótropo en el cual se coloca como referencias un sistema de coordenadas *Fig. 2.7* donde el eje x es horizontal y apunta a la derecha y el eje z es vertical y apunta hacia abajo. El plano $z=-H$ representa la superficie libre.



**EFFECTOS PRODUCIDOS POR MOMENTOS TORSIONANTES DINÁMICOS
EN ESTRUCTURAS RETICULARES.**

Al suponer que los desplazamientos son independientes de la coordenada y , y además que la variación con el tiempo está dada por $e^{i\omega t}$, el campo de desplazamientos en este medio se describe como:

$$v = v(x, z, t).$$

Las ecuaciones de movimiento se reducen a:

$$\frac{\partial^2 v_1}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_1}{\partial z^2} + k_{\beta 1}^2 v_1 = 0$$

para el estrato, y

$$\frac{\partial^2 v_2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_2}{\partial z^2} + k_{\beta 2}^2 v_2 = 0$$

para el semiespacio, donde:

$$k_{\beta i} = \frac{\omega}{\beta_i}, \quad i = 1, 2.$$

Al hacer uso de soluciones del tipo:

$$\begin{aligned} \phi &= A_0 e^{Mx} e^{Lz} e^{\Omega t} \\ \psi &= B_0 e^{Kx} e^{Lz} e^{\Omega t} \end{aligned}$$

se puede escribir que :

b.1). - Para $-H < z < 0$.

$$u = 0$$

$$v = \left[A e^{-[\gamma_1 kz]} + B e^{[\gamma_1 kz]} \right] e^{[i k(x-ct)]} \quad (2.16)$$

$$w = 0$$

**EFFECTOS PRODUCIDOS POR MOMENTOS TORSIONANTES DINÁMICOS
EN ESTRUCTURAS RETICULARES.**

donde:

$$\gamma_1 = \left[1 - \frac{c^2}{\beta_1^2} \right]^{\frac{1}{2}}$$

b.2). - Para $z > 0$.

$$u = 0$$

$$v = C e^{-[\gamma_2 kz]} e^{[i k(x-ct)]} \quad (2.17)$$

$$w = 0$$

donde:

$$\gamma_2 = \left[1 - \frac{c^2}{\beta_2^2} \right]^{\frac{1}{2}}$$

La ecuación para obtener la velocidad de las ondas Love es:

$$\tan \gamma_1 kH = i \frac{G_2 \gamma_2}{G_1 \gamma_1} = \frac{G_2 \left[1 - \frac{c^2}{\beta_2^2} \right]^{\frac{1}{2}}}{G_1 \left[\frac{c^2}{\beta_1^2} - 1 \right]^{\frac{1}{2}}} \quad (2.18)$$

**EFFECTOS PRODUCIDOS POR MOMENTOS TORSIONANTES DINÁMICOS
EN ESTRUCTURAS RETICULARES.**

2.5 CÁLCULO DEL ROTACIONAL PARA DIFERENTES TIPOS DE ONDAS.

DEFINICIÓN DE ROTACIONAL.

$$\text{rot } \vec{\delta} = \begin{vmatrix} i & j & k \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ u & v & w \end{vmatrix}$$

$$\text{rot } \vec{\delta} = \left[\frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial z} \right] i + \left[\frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial x} \right] j + \left[\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right] k$$

a). - Ondas de compresión "P".

$$\begin{aligned} u &= A \operatorname{sen} \frac{2\pi}{L} (x - c_1 t) \\ v &= 0 \\ w &= 0 \end{aligned} \tag{2.9}$$

donde:

$$c_1 = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)\rho}} \tag{2.10}$$

$$\frac{\partial u}{\partial y} = 0 \qquad \frac{\partial u}{\partial z} = 0$$

$$\frac{\partial v}{\partial x} = 0 \qquad \frac{\partial v}{\partial z} = 0$$

$$\frac{\partial w}{\partial x} = 0 \qquad \frac{\partial w}{\partial y} = 0$$

$$\vec{\text{rot } \delta} = 0 i + 0 j + 0 k$$

Las ondas "P" no tienen componente rotacional en dirección alguna.

**EFFECTOS PRODUCIDOS POR MOMENTOS TORSIONANTES DINÁMICOS
EN ESTRUCTURAS RETICULARES.**

b). - Ondas de cortante "S".

$$u = 0$$

$$v = A \operatorname{sen} \frac{2\pi}{L} (x - c_2 t) \quad (2.12)$$

$$w = 0$$

donde:

$$c_2 = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (2.7)$$

$$\frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad \frac{\partial u}{\partial z} = 0$$

$$\frac{\partial w}{\partial x} = 0 \quad \frac{\partial w}{\partial y} = 0$$

$$\frac{\partial v}{\partial x} = \frac{2\pi}{L} A \cos \frac{2\pi}{L} (x - c_2 t) \quad \frac{\partial v}{\partial z} = 0$$

$$\vec{\operatorname{rot}} \delta = 0 \, i + 0 \, j + \left[\frac{2\pi}{L} A \cos \frac{2\pi}{L} (x - c_2 t) \right] \, k$$

Las ondas "S" presentan componente vertical en el rotacional (paralela al eje z) y ocasionan torsión a los edificios.

c). - Ondas Rayleigh.

$$u = Q \left[e^{-[\gamma_1 k z]} - \left[1 - \frac{c^2}{2\beta^2} \right] e^{-[\gamma_2 k z]} \right] \text{sen}(\omega t - kx)$$

$$v = 0$$

(2.15)

$$w = Q \left[1 - \frac{c^2}{\alpha^2} \right]^{\frac{1}{2}} \left[-e^{-[\gamma_1 k z]} + \left[1 - \frac{c^2}{2\beta^2} \right]^{-1} e^{-[\gamma_2 k z]} \right] \text{cos}(\omega t - kx)$$

$$\frac{\partial u}{\partial y} = 0$$

$$\frac{\partial v}{\partial x} = 0$$

$$\frac{\partial v}{\partial z} = 0$$

$$\frac{\partial w}{\partial y} = 0$$

$$\frac{\partial u}{\partial z} = Q \left[-[\gamma_1 k] e^{-[\gamma_1 k z]} + \left[1 - \frac{c^2}{2\beta^2} \right] [\gamma_2 k] e^{-[\gamma_2 k z]} \right] \text{sen}(\omega t - kx)$$

$$\frac{\partial w}{\partial x} = Qk \left[1 - \frac{c^2}{\alpha^2} \right]^{\frac{1}{2}} \left[-e^{-[\gamma_1 k z]} + \left[1 - \frac{c^2}{2\beta^2} \right]^{-1} e^{-[\gamma_2 k z]} \right] \text{sen}(\omega t - kx)$$

$$\text{rot } \vec{\delta} = 0 \text{ } i + \dots$$

$$+ Q \text{ sen}(\omega t - kx) \left[\left[-\gamma_1 k \right] e^{-[\gamma_1 k z]} + \left[1 - \frac{c^2}{2\beta^2} \right] [\gamma_2 k] e^{-[\gamma_2 k z]} \right] -$$

$$- \left[k \left[1 - \frac{c^2}{\alpha^2} \right]^{\frac{1}{2}} \left[-e^{-[\gamma_1 kz]} + \left[1 - \frac{c^2}{2\beta^2} \right]^{-1} e^{-[\gamma_2 kz]} \right] \right] \quad \delta + 0 \text{ k}$$

Las ondas "R" presentan componente horizontal en el rotacional (paralela al eje y).

d). - Ondas Love.

d.1). - Para $-H < z < 0$

$$u = 0$$

$$v = \left[A e^{-[\gamma_1 kz]} + B e^{[\gamma_1 kz]} \right] e^{[i k(x-ct)]} \quad (2.16)$$

$$w = 0$$

donde:

$$\gamma_1 = \left[1 - \frac{c^2}{\beta_1^2} \right]^{\frac{1}{2}}$$

Al tomar solamente la parte real de la ecuación que define a v.

$$e^{i\theta} = \cos \theta + i \operatorname{sen} \theta$$

donde:

$$\theta = k(x-ct)$$

se obtiene:

$$e^{[i k(x-ct)]} = \cos [k(x-ct)]$$

y al sustituir:

$$v = \left[A e^{-[\gamma_1 kz]} + B e^{[\gamma_1 kz]} \right] \cos [k(x-ct)]$$

**EFFECTOS PRODUCIDOS POR MOMENTOS TORSIONANTES DINÁMICOS
EN ESTRUCTURAS RETICULARES.**

$$\frac{\partial u}{\partial y} = 0 \qquad \frac{\partial u}{\partial z} = 0$$

$$\frac{\partial w}{\partial x} = 0 \qquad \frac{\partial w}{\partial y} = 0$$

$$\frac{\partial v}{\partial x} = -k \left[A e^{-[\gamma_1 kz]} + B e^{[\gamma_1 kz]} \right] \text{sen} [k(x-ct)]$$

$$\frac{\partial v}{\partial z} = \left[-A [\gamma_1 k] e^{-[\gamma_1 kz]} + B [\gamma_1 k] e^{[\gamma_1 kz]} \right] \text{cos} [k(x-ct)]$$

$$\text{rot } \vec{\delta} = \left(\left[A e^{-[\gamma_1 kz]} - B e^{[\gamma_1 kz]} \right] [\gamma_1 k] \text{cos} [k(x-ct)] \right) i + \dots$$

$$\dots + 0 j + \left(-k \left[A e^{-[\gamma_1 kz]} + B e^{[\gamma_1 kz]} \right] \text{sen} [k(x-ct)] \right) k$$

d. 2). - Para $z > 0$.

$$\begin{aligned} u &= 0 \\ v &= C e^{-[\gamma_2 kz]} e^{[i k(x-ct)]} \\ w &= 0 \end{aligned} \qquad (2.17)$$

donde:

$$\gamma_2 = \left[1 - \frac{c^2}{\beta z^2} \right]^{\frac{1}{2}}$$

Al tomar solamente la parte real de la ecuación que define a v .

$$v = C e^{-[\gamma_2 kz]} \text{cos} [k(x-ct)]$$

**EFFECTOS PRODUCIDOS POR MOMENTOS TORSIONANTES DINÁMICOS
EN ESTRUCTURAS RETICULARES.**

$$\frac{\partial u}{\partial y} = 0 \qquad \frac{\partial u}{\partial z} = 0$$

$$\frac{\partial w}{\partial x} = 0 \qquad \frac{\partial w}{\partial y} = 0$$

$$\frac{\partial v}{\partial x} = -C k e^{-[\gamma_2 kz]} \text{sen} [k(x-ct)]$$

$$\frac{\partial v}{\partial z} = -C [\gamma_2 k] e^{-[\gamma_2 kz]} \text{cos} [k(x-ct)]$$

$$\begin{aligned} \text{rot } \vec{\delta} = & \left[C [\gamma_2 k] e^{-[\gamma_2 kz]} \text{cos} [k(x-ct)] \right] i + 0 j + \dots \\ & \dots + \left[-C k e^{-[\gamma_2 kz]} \text{sen} [k(x-ct)] \right] k \end{aligned}$$

Las ondas "L" generan componentes horizontal y vertical en el rotacional (paralela a los ejes x y z). Por lo tanto, también producen torsión a las estructuras.

En resumen, el cálculo anterior permite afirmar que las ondas "S" y las ondas "Love" producen efectos torsionantes a los edificios, cuyo efecto se analizará en capítulos posteriores.

CAPÍTULO III

RESULTADO DE MEDICIONES DURANTE SISMOS EN LA BASE DE UN EDIFICIO

EFFECTOS PRODUCIDOS POR MOMENTOS
TORSIONANTES DINÁMICOS EN
ESTRUCTURAS RETICULARES

3.1 ANTECEDENTES.

La instrumentación de edificios altos en el valle de México, busca obtener información sobre la respuesta estructural que presentan al generarse movimientos intensos provocados por sismos, lo cual ayude a los proyectistas de estructuras a desarrollar diseños más seguros, que sirvan mejor a su función, mediante la verificación y mejora de las técnicas de análisis, diseño y construcción.

El edificio seleccionado para ser instrumentado debería cumplir los siguientes requisitos:

- a). - Tener características comunes a otros edificios urbanos de la ciudad de México.
- b). - Contar con información en planos, memoria de cálculos, bitácora de construcción y propiedades de sus materiales, para generar un modelo matemático representativo de su comportamiento.
- c). - Seguridad, acceso y vigilancia del sistema de medición.
- d). - Estar localizado en la zona del valle en donde se han registrado los valores máximos de aceleración superficial.
- e). - Contar con la aprobación de los propietarios para instalar y mantener en operación el sistema de medición.

3.2 CARACTERÍSTICAS DEL EDIFICIO SELECCIONADO.

Un edificio de concreto reforzado fue seleccionado para instalar un sistema automático de medición de aceleraciones debidas a sismos que afectan a la ciudad de México, el cual consta de 17 niveles, planta baja y sótano.

La estructura está apoyada sobre 266 pilotes de fricción, de sección triangular, que penetran 27 mts. dentro del subsuelo. El sótano no tiene muros de concreto reforzado en su perímetro.

En los primeros cinco niveles, la estructura tiene 10 plantas de estacionamiento en distintas alturas, con una planta de forma rectangular; el área transversal del edificio se reduce a partir de la décima losa y se transforma en una torre de 12 niveles.

El edificio fue reconstruido debido a los daños que sufrió durante los sismos de septiembre de 1985; se construyeron muros de refuerzo de concreto, los cuales se extienden desde la losa del sótano hasta la azotea.

Actualmente la torre superior del edificio se destina para oficinas, cuyos ocupantes han sentido claramente los movimientos sísmicos que han ocurrido recientemente.

A continuación se presenta un esquema con la elevación del edificio y la planta rectangular de la torre donde se aprecia la distribución de los muros de refuerzo (Fig. 3.1).

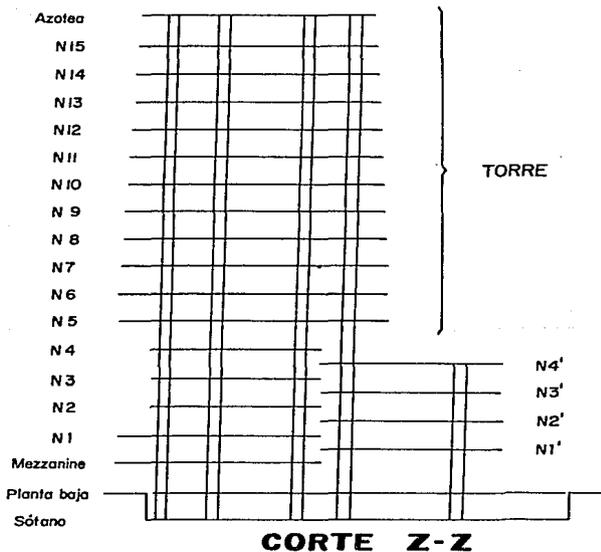
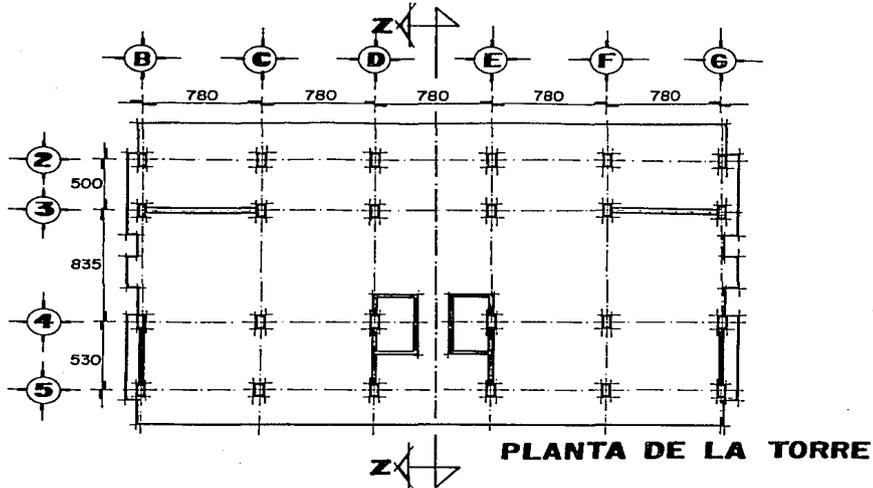


FIG.

3.1

PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS DE LA SUPERESTRUCTURA DEL EDIFICIO

325

3.3 MODELO MATEMÁTICO.

Antes de instalar los acelerómetros en el edificio, se buscó establecer las formas características de vibrar, en modos de alta coherencia, que consideren efectos de flexión y torsión, así como rotación y desplazamiento en la base.

El modelo que se estableció, se obtuvo de los planos estructurales del edificio, de los cuales se definió la estructuración, el material usado, la distribución de masas en el edificio, las irregularidades en algunas zonas y las características de la cimentación.

Para modelar la superestructura, el edificio se consideró formado por 14 marcos planos, 9 en dirección Norte Sur y 5 en dirección Este Oeste, en la Fig. 3.1 aparecen solo algunos. Para representar a la cimentación se consideró un piso ficticio.

Para modelar al conjunto, se usó el programa de análisis tridimensional elástico lineal TABS-77. El programa obtuvo los periodos y formas características para distintos valores de las constantes del piso ficticio, los cuales variaron desde rigidez infinita, hasta valores correspondientes a estratigrafías del subsuelo existente en la zona.

3.4 INSTRUMENTACIÓN SELECCIONADA.

Del conocimiento del comportamiento dinámico del modelo del edificio, se seleccionaron diversos puntos del mismo, para instalar 11 instrumentos con los cuales se registran simultáneamente tres componentes ortogonales en cada punto seleccionado.

La distribución de los equipos de registro que se muestra en la Fig. 3.2, intenta establecer información de cada evento sísmico importante, a fin de conocer:

- a).- Modos de vibrar en flexión, torsión y bamboleo.
- b).- Impedancia de la cimentación del modelo, representativo de cada modo.
- c).- Movimiento vertical de la estructura.
- d).- Efecto de la irregularidad en el nivel 4.
- e).- Movimiento tridimensional de la base.
- f).- Relación con mediciones en una estación de registro aledaño.

Se colocaron en el sótano tres aparatos de registro (PCSO, PCSE y PCSC), para registrar rotación y bamboleo del edificio.

En el nivel 4 se colocaron cuatro aparatos de registro (PCEC, PCEO, PCE7 y PCE8), para obtener información sobre el movimiento de entrada a la torre y para observar el movimiento diferencial de una columna que ha experimentado daños en sismos previos.

En el cuerpo de la torre se instalaron dos aparatos en el nivel 10 (PC6C y PC6E), a fin de conocer las formas características de los modos de vibrar.

**EFFECTOS PRODUCIDOS POR MOMENTOS TORSIONANTES DINÁMICOS
EN ESTRUCTURAS RETICULARES.**

En la azotea se colocaron dos aparatos *CPCAC* y *PCAED*, así como una antena para recibir señales de excitación del sistema operado por el Instituto de Ingeniería U.N.A.M. y para recibir la señal Omega de navegación, para control y sincronización de tiempo.

Todos los aparatos se encuentran interconectados mediante cables, en una configuración maestro-esclavo, donde el aparato *PC6C* opera como maestro. Cuando el movimiento del edificio rebasa el umbral de disparo de este aparato en cualesquiera de sus tres direcciones todos los demás aparatos se excitan, para obtener un registro síncrono en todo el edificio. Cada aparato puede iniciar su operación de manera autónoma, cuando se sobrepasa el umbral de disparo programado, a fin de lograr una alta confiabilidad de registro.

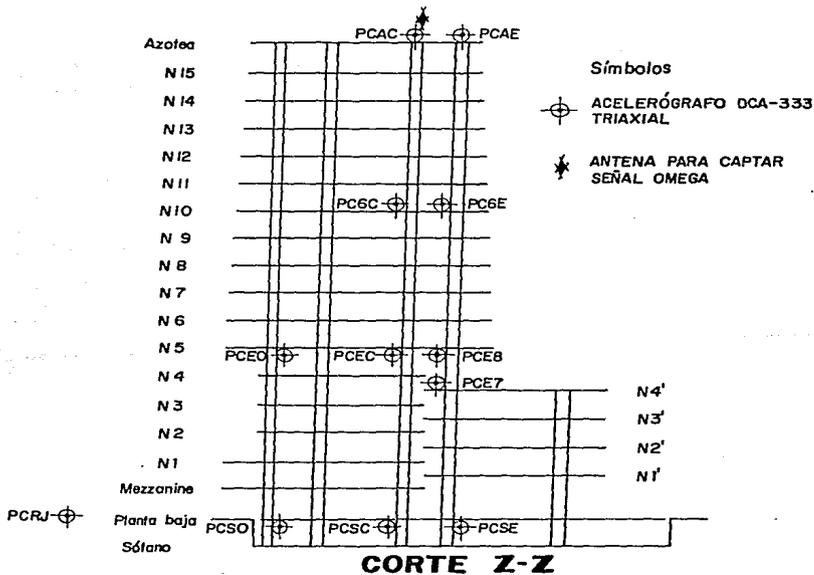
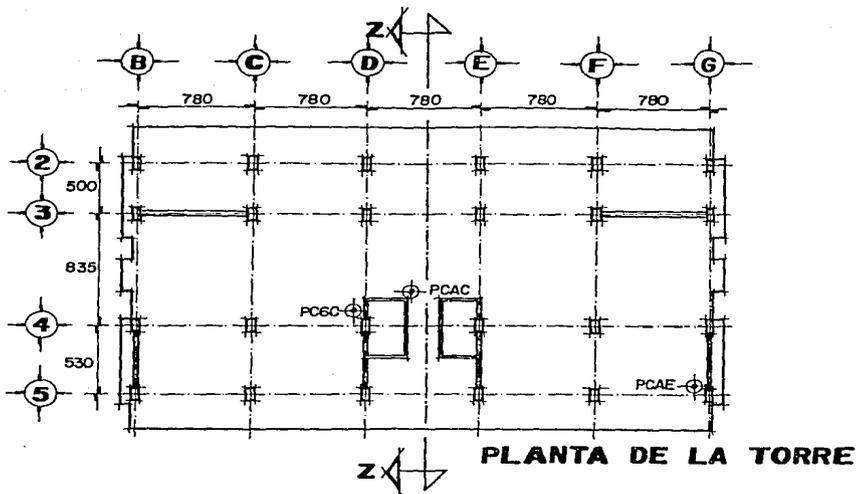


FIG.

3.2

DISTRIBUCIÓN DE ACELERÓMETROS
INSTALADOS EN EL EDIFICIO

3.5 PROPIEDADES DINÁMICAS DE LA ZONA.

El subsuelo presenta una estratigrafía típica de la zona del lago del valle de México, con un relleno superficial de 2 m.; la formación arcillosa superior de 30 m.; un estrato de 2 m. de arena y 3 m. de limo, bajo el cual se localiza la formación arcillosa inferior con 10 m. de espesor (Fig. 3.3).

El periodo natural de vibración del suelo es de 2.4 seg., obtenido de mediciones de vibración ambiental; para revisar este valor, se filtró la señal obtenida durante un sismo, mediante el programa de computadora *SHAKE*, cuyos espectros superficiales se muestran en la Fig. 3.4, donde se ha marcado el periodo del suelo.

Por otra parte, se han revisado los registros obtenidos durante varios eventos sísmicos en la estación 56, que la Fundación Javier Barros Sierra controla, instalada en la Escuela Secundaria 18, situada a 0.5 km. del edificio en estudio. Los espectros de Fourier de sismos registrados muestran que el periodo se mantiene en la vecindad de 2.4 seg, sin modificaciones sustanciales, durante sismos de magnitud comprendidas entre 4.5 y 6.9.

Después de realizar una medición de propiedades dinámicas mediante vibración ambiental, se obtuvo una velocidad de ondas de cortante en la base del modelo, próximas a 58 m/seg, lo cual resulta común para las arcillas blandas de esa zona.

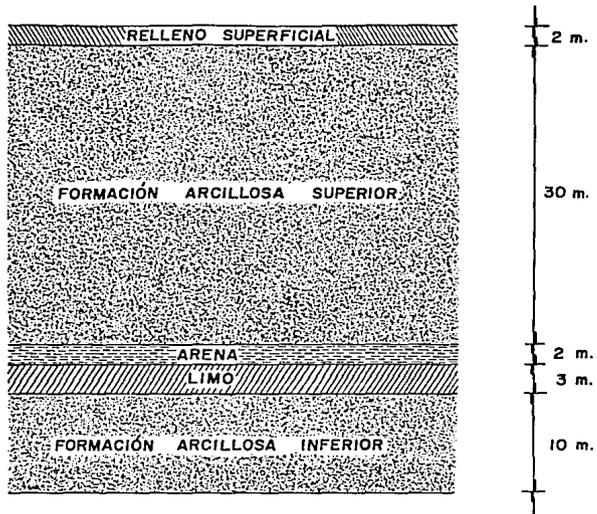
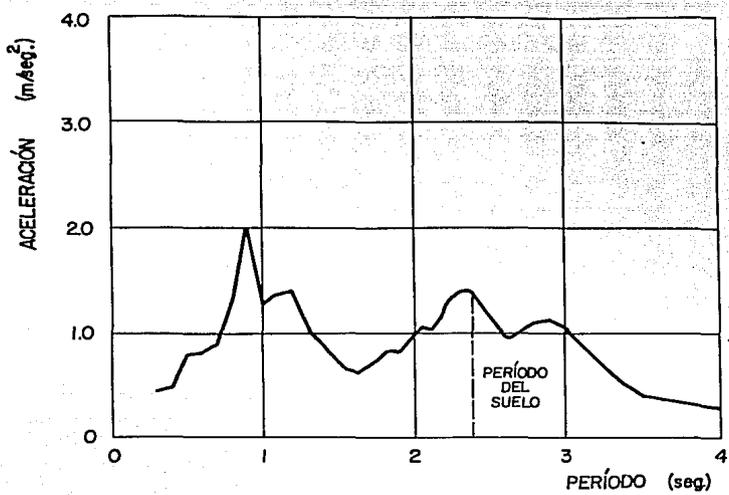


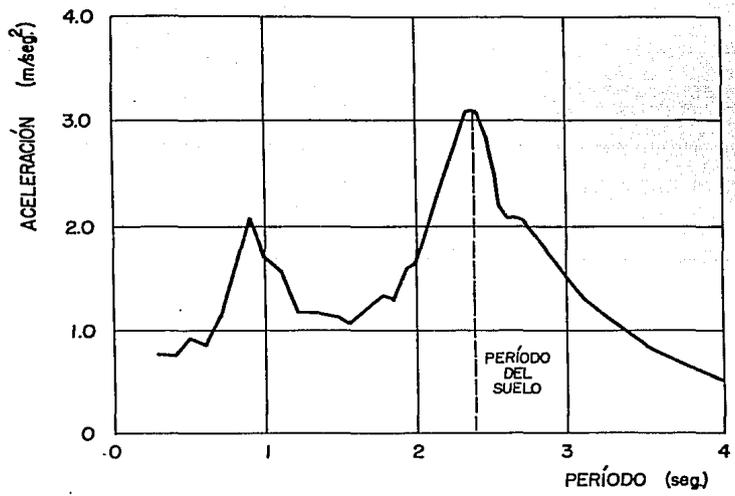
FIG.

3.3

ESTRATIGRAFÍA DE LA ZONA



a) Componente E-W



b) Componente N-S

FIG.
3.4

ESPECTROS DE RESPUESTA RESULTANTES
DE USAR LOS REGISTROS DE UN SISMO

EFFECTOS PRODUCIDOS POR MOMENTOS TORSIONANTES DINÁMICOS EN ESTRUCTURAS RETICULARES.

3.6 COMPORTAMIENTO DINÁMICO DEL SUELO.

Es importante conocer las propiedades dinámicas del suelo, ya que de éstas, depende la respuesta sísmica de la cimentación de una estructura, para lo cual es necesario investigar cada uno de los estratos que lo forman hasta alcanzar la base firme.

En sedimentos saturados compresibles, los efectos más importantes del movimiento sísmico son los producidos por las ondas de esfuerzo cortante con velocidad:

$$v_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}}$$

donde G , es la rigidez dinámica del suelo o módulo de elasticidad al esfuerzo cortante, y ρ , la masa unitaria. El valor de G , puede determinarse de probetas de suelo inalterado representativas de cada uno de los estratos del subsuelo.

Al conocer la velocidad de onda de cortante en cada estrato, podrá calcularse aproximadamente el período fundamental del suelo. Si se conoce la estratigrafía y los valores de G y ρ de cada uno de los estratos que lo forman. Sea v_{si} y d_i la velocidad de la onda y espesor del estrato i , respectivamente. El tiempo que la onda tarda en atravesar dicho estrato es:

$$\Delta t_i = \frac{d_i}{v_{si}}$$

Al trasladarse la onda de la base firme a la superficie del suelo donde será reflejada nuevamente hacia la base firme, el tiempo transcurrido será 1/4 del período fundamental, así también, la distorsión total del suelo en la superficie representará la amplitud del movimiento.

**EFFECTOS PRODUCIDOS POR MOMENTOS TORSIONANTES DINÁMICOS
EN ESTRUCTURAS RETICULARES.**

Por consiguiente:

$$\frac{1}{4} T_{s_1} = \sum_1^n \frac{d_i}{V_{s_i}}$$

o bien:

$$T_{s_1} = 4 \sum_1^n \frac{d_i}{V_{s_i}}$$

De acuerdo a la estratigrafía mostrada en la Fig. 3.3 y al proceder de la manera antes descrita, se puede obtener el período fundamental del suelo.

ESTRATO	d	γ	ρ	G	Vs	Δt
A	2.00	1.66	0.169	585	58.83	0.034
B	30.00	1.20	0.122	650	73.00	0.411
C	2.00	1.60	0.163	1200	85.80	0.023
D	3.00	1.80	0.183	1500	90.54	0.033
E	10.00	1.25	0.127	1120	93.91	0.106
SUMA						0.607

Por lo tanto:

$$T_{s_1} = 4 (0.607) = 2.428 \text{ seg.}$$

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{2.428} = 0.412 \text{ hertz}$$

Al observar la componente horizontal de los registros del sismo del 11 de mayo de 1990, se obtiene que el período de las ondas de Love es aproximadamente 20 seg., es decir, $f = 0.05$ hertz.

3.8 ESPECTROS OBTENIDOS EN EL EDIFICIO INSTRUMENTADO.

En las siguientes figuras, aparecen los *ESPECTROS DE FOURIER DE DESPLAZAMIENTO*, obtenidos del análisis de los registros del sismo ocurrido el 11 de mayo de 1990, en el edificio instrumentado.

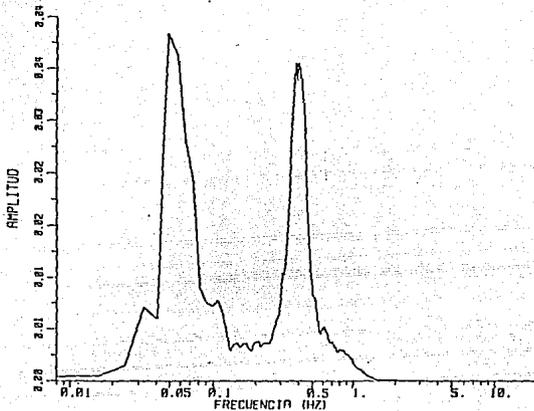
En ellos se puede observar que se presentan dos picos, los que se repiten en todo el edificio, no importa el nivel que se analice. Los picos coinciden con las frecuencias de 0.412 Hz. y 0.05 Hz.; la primera frecuencia corresponde a la frecuencia natural del suelo medida en una estación vecina del edificio.

Esta frecuencia corresponde también a *ondas de cortante* analizadas con el programa *SHAKE*, al introducir en la base de los estratos profundos una perturbación sísmica.

Por eliminación, la segunda frecuencia de 0.05 Hz. debe corresponder a las *ondas de Love* previamente analizadas.

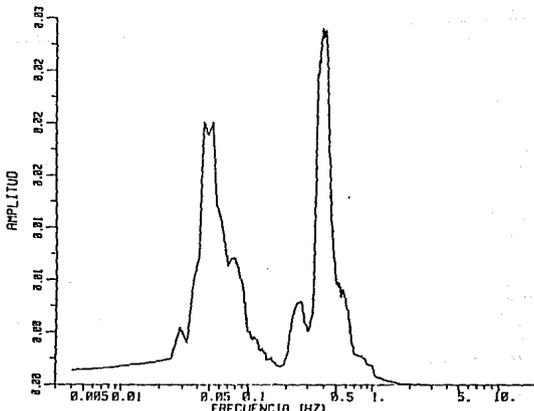
SISMO	0000000	REGISTRO	RSC-SENSI IAL.T	METODO	CORRECCION
DATOS	0000	ESTA	0000	FILTRO	0.030 0.033 13.0 15.0
FECHA	000000	INST		AT	0.030
HORA	0: 0: 0	COMP		MAX ACEL	3.59 -3.36
EPIC	0.000 0.000	HORA	0: 0: 0	MAX VEL	0.03 -1.12
H	0	DIST	110.47	MAX DESP	0.30 -0.76

ESPECTRO DE FOURIER DE DESPLAZAMIENTO



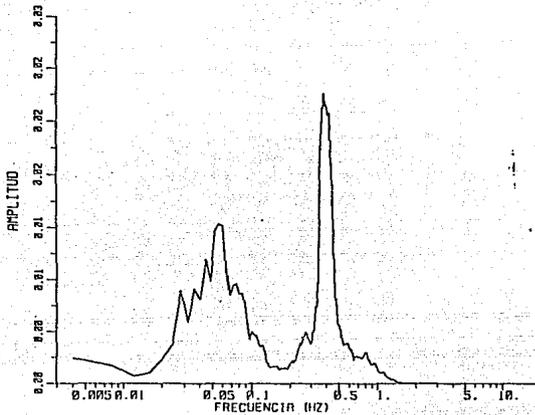
SISMO	0000000	REGISTRO	RSO-SENSI IAL.T	METODO	CORRECCION
DATOS	0000	ESTA	0000	FILTRO	0.030 0.033 13.0 15.0
FECHA	000000	INST		AT	0.030
HORA	0: 0: 0	COMP		MAX ACEL	4.79 -5.03
EPIC	0.000 0.000	HORA	0: 0: 0	MAX VEL	1.56 -1.18
H	0	DIST	207.14	MAX DESP	0.40 -0.90

ESPECTRO DE FOURIER DE DESPLAZAMIENTO



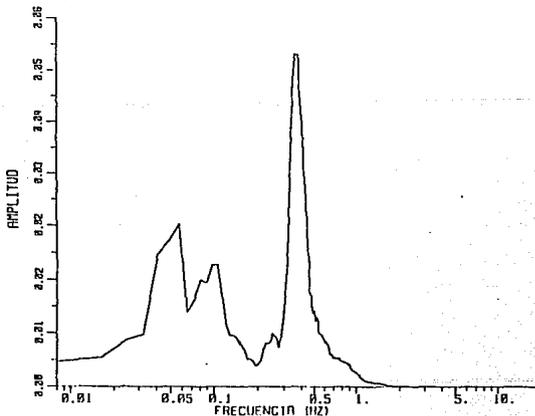
SISMO		REGISTRO		RSD-SE051A1.T	CORRECCION	
DATOS	0000000	ESTR	INST	0000	METODO	CALTECH.
FECHA	000000	INST	COM		FILTRO	0.030 0.033 13.0 15.0
HORA	0: 0: 0	COM	HORA	0: 0: 0	ΔT	0.030
EPIC	0.000 0.000	HORA	DUR	207.14	MAX ACEL	3.40. -3.51
M	0 0	DUR	DIST	0	MAX VEL	0.37. -0.75
H	0 0	DIST			MAX DESP	0.31. -0.27

ESPECTRO DE FOURIER DE DESPLAZAMIENTO



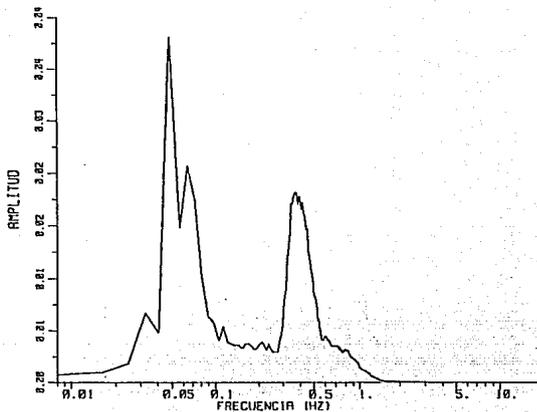
SISMO		REGISTRO		RSC-SE051A1.T	CORRECCION	
DATOS	0000000	ESTR	INST	0000	METODO	CALTECH.
FECHA	000000	INST	COM		FILTRO	0.030 0.033 13.0 15.0
HORA	0: 0: 0	COM	HORA	0: 0: 0	ΔT	0.030
EPIC	0.000 0.000	HORA	DUR	110.47	MAX ACEL	3.19. -2.96
M	0 0	DUR	DIST	0	MAX VEL	1.03. -1.04
H	0 0	DIST			MAX DESP	0.47. -0.39

ESPECTRO DE FOURIER DE DESPLAZAMIENTO



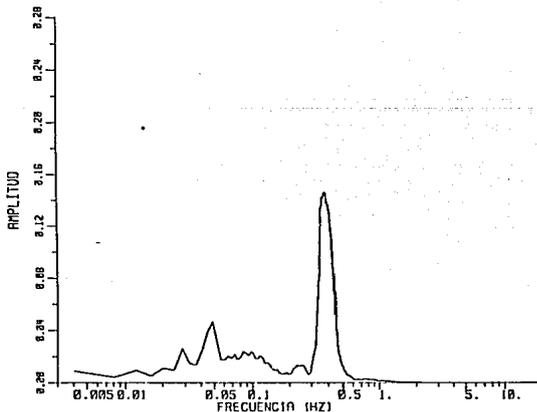
SISMO	00000000	REGISTRO	RSC-000511AT.T	METODO	CORRECCION
DATOS	0000	ESTA	0000	CON.TECH.	
FECHA	000000	INST		FILTRO	0.030 0.033 13.0 15.0
HORA	0: 0: 0	COMP		Δt	0.030
EPTC	0.000 0.000	HORA	0: 0: 0	MAX ACEL	2.56 -2.50
M	0.0	DUR	119.47	MAX VEL	0.76 -0.64
H	0	DIST	0	MAX DESP	0.25 -0.31

ESPECTRO DE FOURIER DE DESPLAZAMIENTO



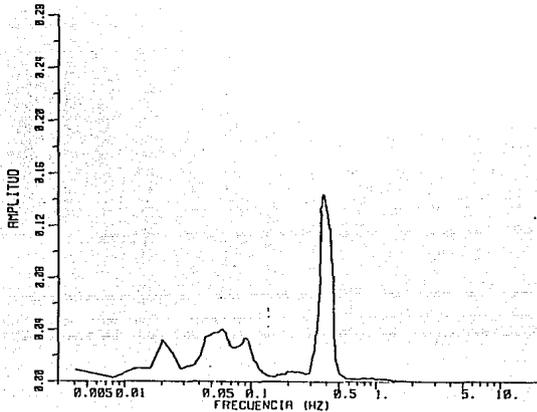
SISMO	00000000	REGISTRO	REC-EB0511AL.T	METODO	CORRECCION
DATOS	0000	ESTA	0000	CON.TECH.	
FECHA	000000	INST		FILTRO	0.030 0.033 13.0 15.0
HORA	0: 0: 0	COMP		Δt	0.030
EPTC	0.000 0.000	HORA	0: 0: 0	MAX ACEL	7.72 -7.00
M	0.0	DUR	122.97	MAX VEL	3.05 -2.91
H	0	DIST	0	MAX DESP	1.13 -1.10

ESPECTRO DE FOURIER DE DESPLAZAMIENTO



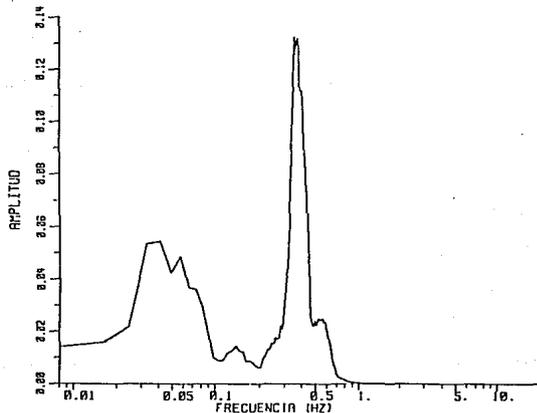
SISMO	00000000	REGISTRO	REC-GEOSI IAL.T	CORRECCION
DATOS	0000	ESTA	0000	CALTECH.
FECHA	000000	INST		FILTRO 0.020 0.023 13.0 15.0
HORA	0: 0: 0	COMP		ΔT 0.030
EPIC	0.000 0.000	HORA	0: 0: 0	MAX ACCL 0.57 -0.23
H	0	DUR	122.97	MAX VEL 2.33 -2.47
		DIST	0	MAX DESP 0.02 -1.03

ESPECTRO DE FOURIER DE DESPLAZAMIENTO



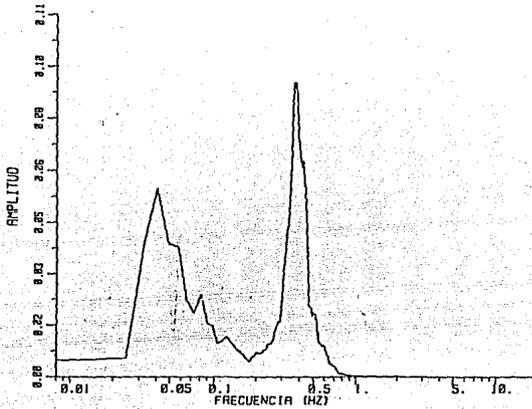
SISMO	00000000	REGISTRO	REC-GEOSI IAL.T	CORRECCION
DATOS	0000	ESTA	0000	CALTECH.
FECHA	000000	INST		FILTRO 0.030 0.033 13.0 15.0
HORA	0: 0: 0	COMP		ΔT 0.030
EPIC	0.000 0.000	HORA	0: 0: 0	MAX ACCL 6.77 -6.66
H	0	DUR	121.09	MAX VEL 2.40 -2.40
		DIST	0	MAX DESP 0.97 -1.00

ESPECTRO DE FOURIER DE DESPLAZAMIENTO



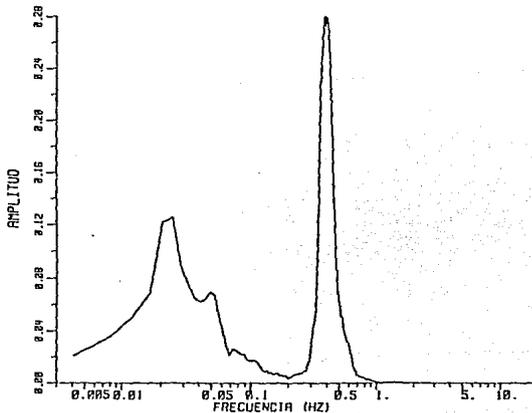
SISMO	0000000	REGISTRO	RGC-GEOSIAT.T	METODO	CORRECCION
DATOS	0000	ESTA	0000	FILTRO	CALTECH.
FECHA	00000	INST		ΔT	0.030 13.0 15.0
HORA	0: 0: 0	COMP		MAX ACEL	5.43. -5.75
EPIC	0.000 0.000	HORA	0: 0: 0	MAX VEL	1.86. -1.96
H	0 0	DUR	121.89	MAX DESP	0.56. -0.71
		DIST	0		

ESPECTRO DE FOURIER DE DESPLAZAMIENTO



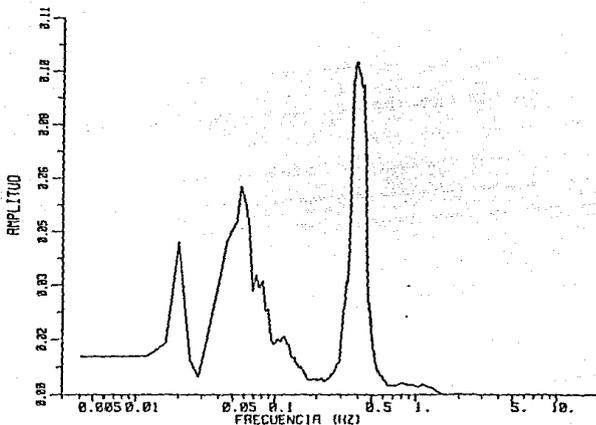
SISMO	0000000	REGISTRO	RAC-GEOSIAT.T	METODO	CORRECCION
DATOS	0000	ESTA	0000	FILTRO	CALTECH.
FECHA	00000	INST		ΔT	0.025 13.0 15.0
HORA	0: 0: 0	COMP		MAX ACEL	39.66. -39.15
EPIC	0.000 0.000	HORA	0: 0: 0	MAX VEL	11.94. -11.76
H	0 0	DUR	215.27	MAX DESP	4.57. -4.76
		DIST	0		

ESPECTRO DE FOURIER DE DESPLAZAMIENTO



SISMO	00000000	REGISTRO	RAC-AE0511AT.1	CORRECCION	
ORIGOS	0000	ESTR	0000	METODO	CALTECH.
FECHA	000000	INST		FILTRD	0.020 0.020 13.0 15.0
HORA	0: 0: 0	COMP		AT	0.030
EPIC	0.000 0.000	HORA	0: 0: 0	MAX ACEL	11.00. -13.00
N	0.0	DUR	215.27	MAX VEL	3.95. -3.03
H	0	DIST	0	MAX DESP	1.09. -1.10

ESPECTRO DE FOURIER DE DESPLAZAMIENTO



CAPÍTULO IV

ESPECTRO SIMPLIFICADO PARA EL ANÁLISIS POR TORSIÓN EN LA BASE DE UN EDIFICIO

EFECTOS PRODUCIDOS POR MOMENTOS
TORSIONANTES DINÁMICOS EN
ESTRUCTURAS RETICULARES

EFFECTOS PRODUCIDOS POR MOMENTOS TORSIONANTES DINÁMICOS EN ESTRUCTURAS RETICULARES.

4.1 ANTECEDENTES.

La respuesta torsional en una estructura sujeta a una excitación sísmica es generalmente atribuida a la asimetría de la estructura. Recientemente, se reconoció que considerar la respuesta torsional debería hacerse también para edificios simétricos a causa de la componente rotacional del movimiento del terreno. La importancia de esta componente del movimiento del suelo en la respuesta torsional de varios edificios, fue observada durante el temblor de 1971 en San Fernando, California.

Desde la fecha en que todos los sismógrafos de movimiento fuerte fueron diseñados para registrar solamente los tres movimientos perpendiculares de traslación, ningún registro actual de la componente rotacional de sismos ha sido obtenido. El efecto de esta componente es usualmente sintetizado basados en los registros de medición de aceleraciones. De las relaciones fundamentales en la teoría de la elasticidad, la rotación alrededor de un eje vertical puede encontrarse por derivación espacial de los desplazamientos horizontales.

Desafortunadamente, los instrumentos de medición de movimiento fuerte están localizados muy lejos, aparte que la diferencia en los registros del mismo evento sísmico, no solamente se debe a la componente rotacional, sino también al efecto de la geología local de los sitios donde los instrumentos están localizados. Por lo tanto, ellos no pueden ser usados con facilidad para estimar la componente rotacional del movimiento del terreno.

EFFECTOS PRODUCIDOS POR MOMENTOS TORSIONANTES DINÁMICOS EN ESTRUCTURAS RETICULARES.

Para superar esta dificultad, los investigadores han hecho la suposición de que la superficie de los movimientos del suelo puede tratarse como una superposición de dos ondas no dispersivas propagándose. Desde que la forma de la onda no cambie de un punto a otro, la derivación espacial puede entonces ser aproximada por la diferencia de movimientos del suelo en puntos vecinos. Alternativamente, uno puede directamente reemplazar la derivada espacial con respecto al tiempo del movimiento del suelo dividida entre la velocidad de onda cortante del suelo medio.

Una forma conveniente de representar el efecto de la componente rotacional del movimiento del terreno en estructuras, es la construcción del espectro torsional. En una manera más directa, esto puede obtenerse al aplicar un registro de aceleración rotacional en la base de un sistema torsional de un grado de libertad. Para obtener los registros de aceleración rotacional, es necesario derivar los registros de aceleración lineal. Para la mayoría de los sismos, los registros de aceleración lineal son ya funciones del tiempo, y fluctúan altamente. Otra derivación en estos registros involucraría grandes errores numéricos, a menos que sean usados incrementos de tiempo muy pequeños en la descripción de los registros de aceleración rotacional sintetizados.

EFFECTOS PRODUCIDOS POR MOMENTOS TORSIONANTES DINÁMICOS EN ESTRUCTURAS RETICULARES.

4.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

Considérese que O es el sitio donde se localiza un sismógrafo de movimiento fuerte, y se miden movimientos en las direcciones x y y simultáneamente. Si los movimientos del suelo en O son el resultado de una onda plana de cortante que proviene del epicentro hacia O . La dirección epicentral X forma un ángulo θ con respecto al eje x mostrado en la Fig. 4.1.

Los desplazamientos del suelo en las direcciones X y Y son:

$$u_x(t) = g(X - ct) \quad (1)$$

$$u_y(t) = f(X - ct) \quad (2)$$

donde c es la velocidad de la onda cortante.

La rotación alrededor del eje Z está dada por:

$$\phi(t) = \frac{1}{2} \left[\frac{\partial u_y}{\partial X} - \frac{\partial u_x}{\partial Y} \right] \quad (3)$$

Mediante las ecuaciones (1) y (2).

$$\phi(t) = \frac{1}{2} f'(X - ct) = -\frac{1}{2c} \dot{u}_y(t) \quad (4)$$

donde el punto sobre la u denota derivada respecto al tiempo.

El movimiento en las direcciones X y Y , se puede obtener de los movimientos en las direcciones x y y , por la relación:

$$u_x(t) = u_x(t) \cos \theta + u_y(t) \sin \theta \quad (5a)$$

$$u_y(t) = -u_x(t) \sin \theta + u_y(t) \cos \theta \quad (5b)$$

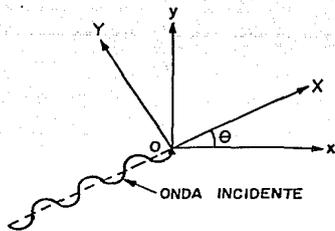


FIG.

4.1

MOVIMIENTO DE UNA ONDA SUPERFICIAL

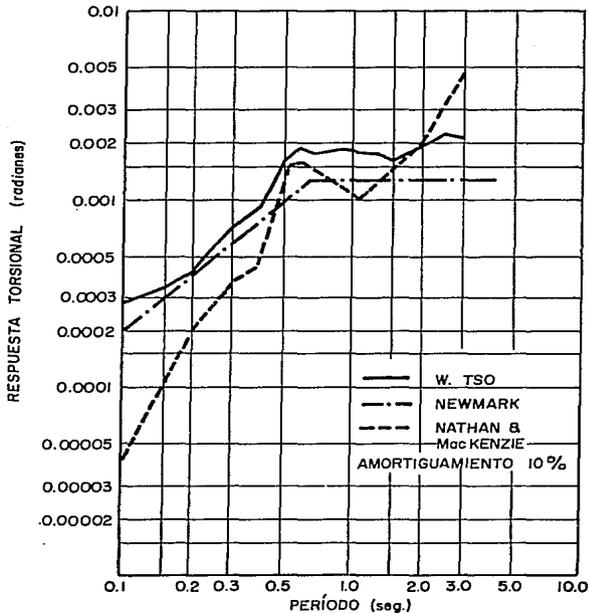


FIG.

4.2

COMPARACIÓN DE ESPECTROS TORSIONALES PARA EL SISMO EL CENTRO (1940)

**EFFECTOS PRODUCIDOS POR MOMENTOS TORSIONANTES DINÁMICOS
EN ESTRUCTURAS RETICULARES.**

Mediante la ecuación (5b) se obtiene:

$$\phi(t) = \frac{1}{2c} [\dot{u}_x(t) \operatorname{sen} \theta - \dot{u}_y(t) \operatorname{cos} \theta] \quad (6a)$$

$$\dot{\phi}(t) = \frac{1}{2c} [\ddot{u}_x(t) \operatorname{sen} \theta - \ddot{u}_y(t) \operatorname{cos} \theta] \quad (6b)$$

$$\ddot{\phi}(t) = \frac{1}{2c} [\dddot{u}_x(t) \operatorname{sen} \theta - \dddot{u}_y(t) \operatorname{cos} \theta] \quad (6c)$$

Una vez calculada la aceleración rotacional $\ddot{\phi}(t)$, el espectro torsional de respuesta puede calcularse por la siguiente ecuación de movimiento.

$$\ddot{\psi}(t) + 2 \xi \omega_n \dot{\psi}(t) + \omega_n^2 \psi(t) = - \ddot{\phi}(t) \quad (7)$$

donde $\psi(t)$ es el desplazamiento rotacional relativo del oscilador torsional, ξ es la fracción de amortiguamiento crítico y ω_n es la frecuencia natural.

Una desventaja de la propuesta anterior es la necesidad de calcular $\ddot{\phi}(t)$, la cual involucra derivar los registros de medida de $\ddot{u}_x(t)$ y $\ddot{u}_y(t)$.

Al definir el desplazamiento rotacional total del oscilador torsional $\psi_0(t)$ por:

$$\psi_0(t) = \psi(t) + \phi(t) \quad (8)$$

La ecuación (7) puede entonces ser escrita como:

$$\ddot{\psi}_0(t) + 2 \xi \omega_n \dot{\psi}_0(t) + \omega_n^2 \psi_0(t) = 2 \xi \omega_n \dot{\phi}(t) + \omega_n^2 \phi(t) \quad (9)$$

Por lo tanto, el desplazamiento rotacional total $\psi_0(t)$ puede ser calculado basado en el conocimiento de $\phi(t)$ y $\dot{\phi}(t)$ solamente. De las ecuaciones (6a) y (6b), $\phi(t)$ y $\dot{\phi}(t)$ pueden obtenerse por una apropiada combinación lineal de los registros de aceleración y velocidad. Estos registros están disponibles para un gran número de sismos.

EFECTOS PRODUCIDOS POR MOMENTOS TORSIONANTES DINÁMICOS EN ESTRUCTURAS RETICULARES.

Se puede obtener la respuesta $\psi_0(t)$ por un procedimiento numérico paso a paso y el desplazamiento rotacional relativo en cualquier instante puede obtenerse por:

$$\psi(t) = \psi_0(t) - \phi(t) \quad (10)$$

El espectro torsional de desplazamientos se puede obtener por:

$$R_d = |\psi(t)|_{\max} \quad (11a)$$

El espectro torsional de pseudo-velocidad R_v está definido por:

$$R_v = \omega_n R_d \quad (11b)$$

y el espectro de pseudo-aceleración por:

$$R_a = \omega_n^2 R_d \quad (11c)$$

Un procedimiento similar ha sido usado para calcular la respuesta debida a los movimientos de traslación del suelo.

4.3 ESPECTRO TORSIONAL PARA EL SISMO OCURRIDO EN EL CENTRO, CAL.

Desde que fué obtenido el espectro torsional para el sismo de El Centro 1940, es un ejemplo útil de comparación. Hart calculó el espectro para una velocidad de onda cortante $c = 570 \text{ ft/s}$ (174 m/s). La dirección epicentral fué determinada al unir el sitio instrumental del epicentro del sismo, aunque el valor actual de θ usado en el cálculo no estuvo en el intervalo.

Recientemente, Penzien y Watabe (ref. 13) notaron que basados en los registros de mediciones, se puede obtener un juego de direcciones principales y se observa que una de las direcciones principales apunta hacia la dirección del epicentro del sismo.

**EFFECTOS PRODUCIDOS POR MOMENTOS TORSIONANTES DINÁMICOS
EN ESTRUCTURAS RETICULARES.**

Se han calculado los espectros torsionales para el sismo ocurrido en El Centro, California (1940), cuando la onda se propaga a lo largo de la dirección X; sus valores fueron comparables a los obtenidos cuando la onda se propaga en la dirección Y. Esto confirma las aproximaciones hechas por Newmark que los dos términos $\partial u_y / \partial X$ y $\partial u_x / \partial Y$ en la ecuación (3), son del mismo orden de magnitud.

Para estimar el espectro torsional, Newmark usó la relación:

$$\phi(t) \approx \frac{\partial u_x}{\partial y} \quad (12)$$

en lugar de la ecuación (3).

Con el propósito de calcular el espectro torsional, se supone que el movimiento de la superficie del suelo es una superposición de dos ondas no dispersivas independientes propagándose a lo largo de dos direcciones principales perpendiculares.

El efecto rotacional total en la estructura, es igual a la suma de los efectos rotacionales debidos a cada onda individual. Basándose en esta suposición, se construyó una curva del espectro que representa la suma de los dos espectros; uno, calculado en base a los registros de $\ddot{u}_x(t)$ y el otro, en los de $\ddot{u}_y(t)$. Al usar una velocidad de onda de cortante de 1000 ft/s y un 7 % de amortiguamiento crítico y al aplicar las fórmulas propuestas, se puede hacer una comparación con el espectro torsional calculado por Newmark para los registros del sismo de El Centro 1940 (Fig. 4.2). La curva del espectro calculada por Nathan y MacKenzie (ref 13) al usar un 10 % de amortiguamiento también se presenta.

EFECTOS PRODUCIDOS POR MOMENTOS TORSIONANTES DINÁMICOS EN ESTRUCTURAS RETICULARES.

Se puede observar que las formas de la curva calculada y la curva de Newmark son similares. Esta última subestima el espectro de respuesta rotacional para el sismo de El Centro, aproximadamente por un 40 %. La curva de Nathan y MacKenzie da un valor muy bajo en el intervalo de períodos cortos y muy alto para períodos largos.

4.4 ESPECTRO TORSIONAL DE DISEÑO PARA EL SISMO DE EL CENTRO, CAL.

En las Figuras 4.3 y 4.4, se presentan los espectros de diseño para análisis por torsión calculados con el procedimiento descrito, para el sismo de El Centro, Cal. (1940).

4.5 ESPECTRO SIMPLIFICADO PARA ANÁLISIS POR TORSIÓN.

De los espectros mostrados en el capítulo 3, se observa que el espectro de diseño debe hacerse tratando de cubrir los dos picos que se presentan en ellos.

Se tomó como referencia el registro resta (PCSO-PCSE) que se presenta en la base del edificio instrumentado y descrito en el capítulo anterior, se elaboró en forma simplificada el espectro de desplazamiento angular de diseño que se presenta en la Fig. 4.5.

En las Figuras 4.6 y 4.7 se presentan los espectros de pseudo-aceleración angular de diseño, calculados a partir de la Fig. 4.5, en el primero se grafican en el eje de las abscisas las frecuencias y en el segundo los períodos, éste último se utilizó para el modelo matemático del edificio que se describe en el siguiente capítulo.

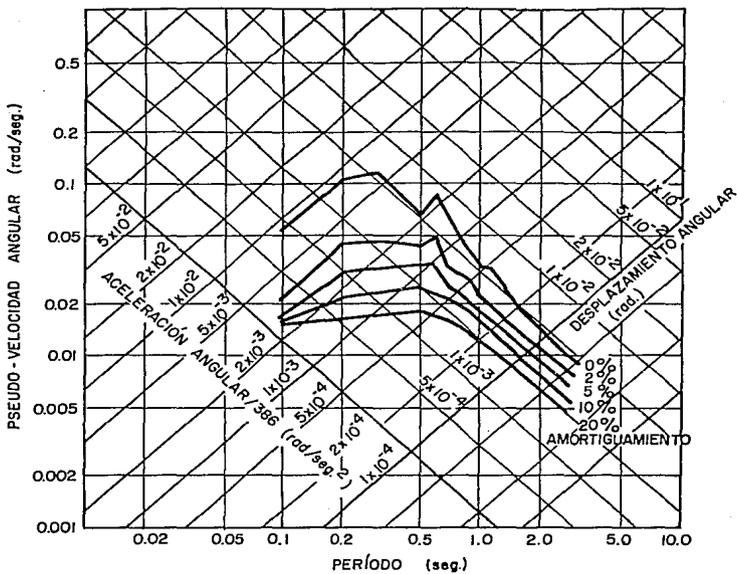


FIG.

4.3

ESPECTRO TORSIONAL PROMEDIO

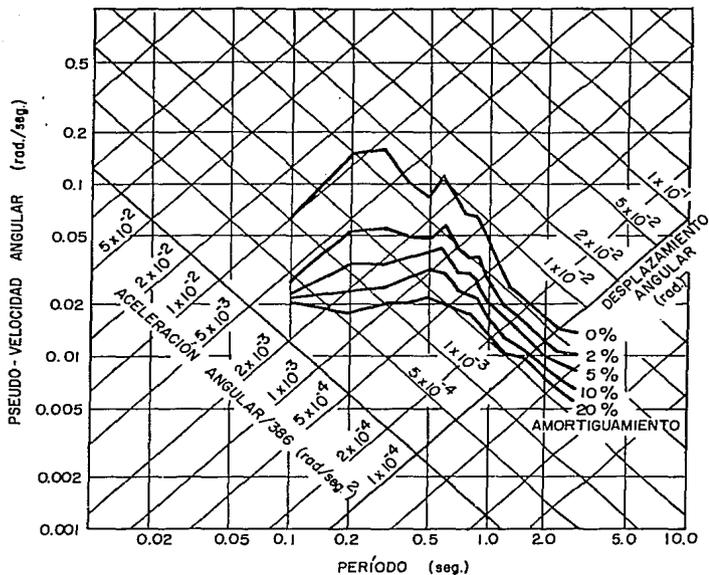


FIG.

4.4

ESPECTRO TORSIONAL PROMEDIO
MÁS UNA DESVIACIÓN STANDARD

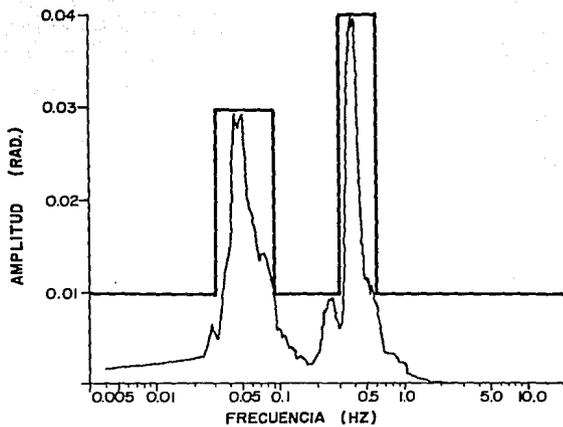


FIG.

4.5

ESPECTRO SIMPLIFICADO PARA ANÁLISIS POR TORSIÓN

ACELERACIÓN
ANGULAR
(RAD/SEG²)

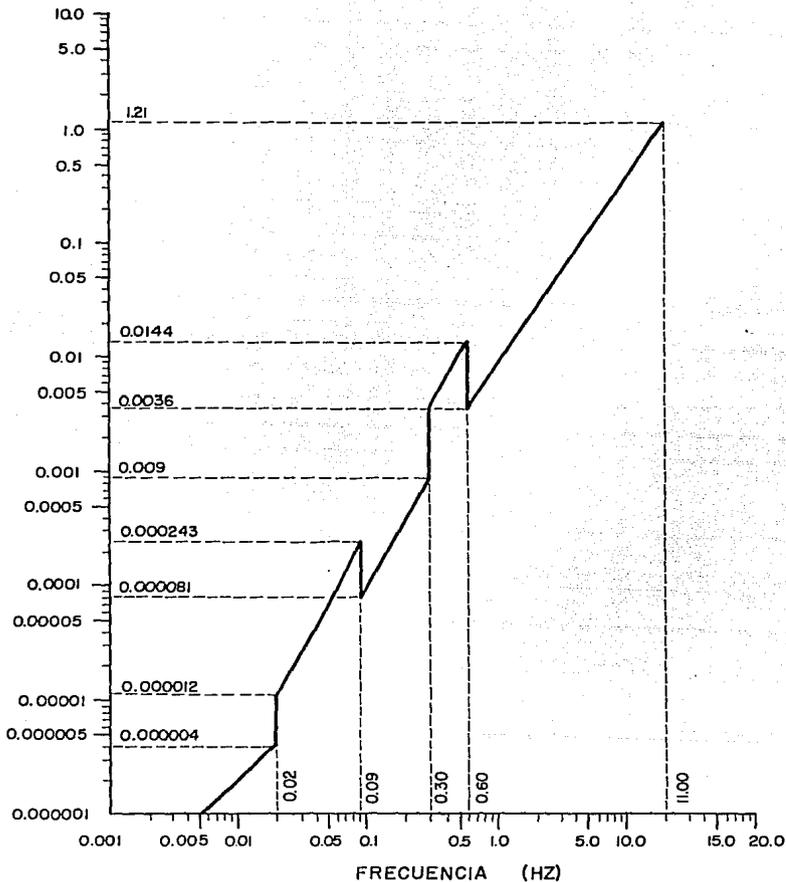


FIG.

4.6

ESPECTRO DE PSEUDO-ACELERACIÓN
PARA ANÁLISIS POR TORSIÓN

ACELERACIÓN
ANGULAR
(RAD/SEG²)

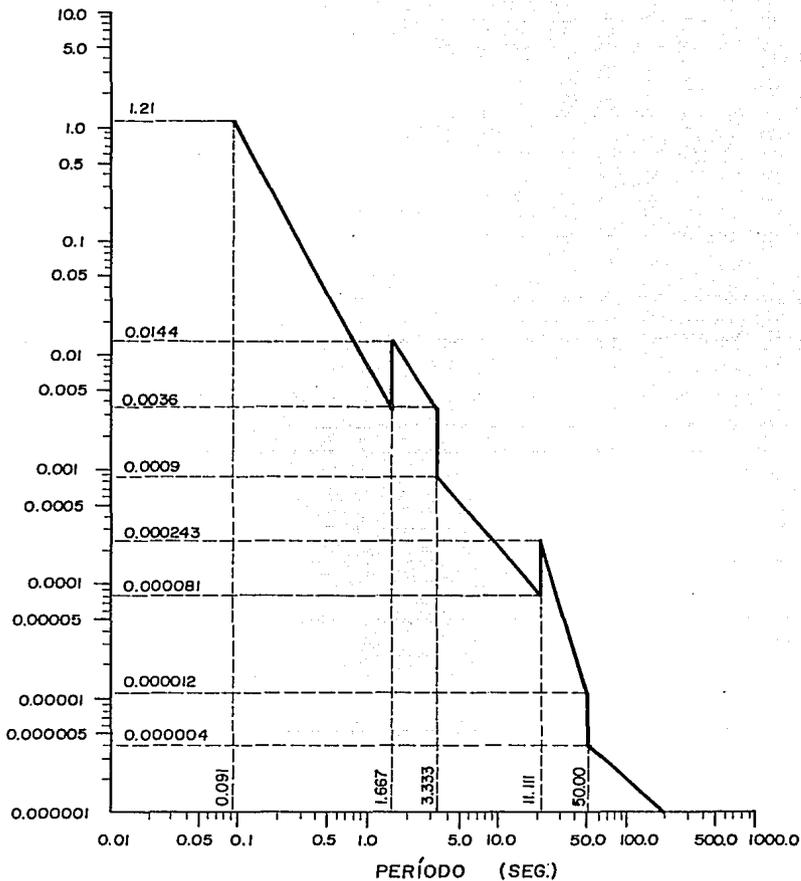


FIG.

4.7

ESPECTRO DE PSEUDO-ACELERACIÓN
PARA ANÁLISIS POR TORSIÓN

CAPÍTULO V

**ANÁLISIS DE LOS EFECTOS PRODUCIDOS EN
UN EDIFICIO DE TRES NIVELES POR MOMENTOS
TORSIONANTES EN LA BASE**

**EFECTOS PRODUCIDOS POR MOMENTOS
TORSIONANTES DINÁMICOS EN
ESTRUCTURAS RETICULARES**

EFFECTOS PRODUCIDOS POR MOMENTOS TORSIONANTES DINÁMICOS EN ESTRUCTURAS RETICULARES.

5.1 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL MODELO MATEMÁTICO UTILIZADO.

Para observar el comportamiento de una estructura al ser sometida a momentos torsionantes aplicados en su base, se consideró un modelo matemático (Figuras 5.1 y 5.2) analizado con el programa de análisis tridimensional *SUPER-ETABS*.

La estructura estudiada es simétrica en planta y tiene 3 niveles; en las Figuras 5.1 y 5.2, se presentan sus características. Se consideró la existencia de un piso ficticio para representar los efectos de interacción suelo-estructura; se supuso que el edificio se quisiera construir en terreno zona III en la ciudad de México, a una profundidad de desplante de 47 mts. y un período del suelo de 2.40 seg., valores similares a los encontrados para el edificio descrito en el capítulo 3.

Se supusieron dimensiones de los elementos estructurales (trabes y columnas), para obtener un período fundamental acorde a las fórmulas empíricas que recomienda el Reglamento del Distrito Federal (1987). Primero, se revisó el período de la estructura al considerarla empotrada en su base, y posteriormente, se consideró el efecto de interacción suelo-estructura. En el primer caso, se obtuvo un período fundamental de 0.305 seg. y en el segundo, de 0.425 seg.

En la Figura 5.3, se presenta la numeración que se les dió a las trabes y columnas del edificio. Se supuso una carga uniformemente distribuida de 1.00 Ton/m^2 , que actúa verticalmente en toda la estructura; con este valor, se calculó la masa de cada nivel.

EFFECTOS PRODUCIDOS POR MOMENTOS TORSIONANTES DINÁMICOS EN ESTRUCTURAS RETICULARES.

Se introdujo como dato el espectro para análisis por torsión que se presentó en el capítulo anterior (Fig. 4.7), y se hizo variar la posición del centro de giro sobre la diagonal, desde la columna 1 hasta el centroide de la planta del edificio (Fig. 5.4).

Finalmente, para representar el momento torsionante, se consideró que en la base del edificio actúa un par de fuerzas, como el que se muestra en la Fig. 5.5.

ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA

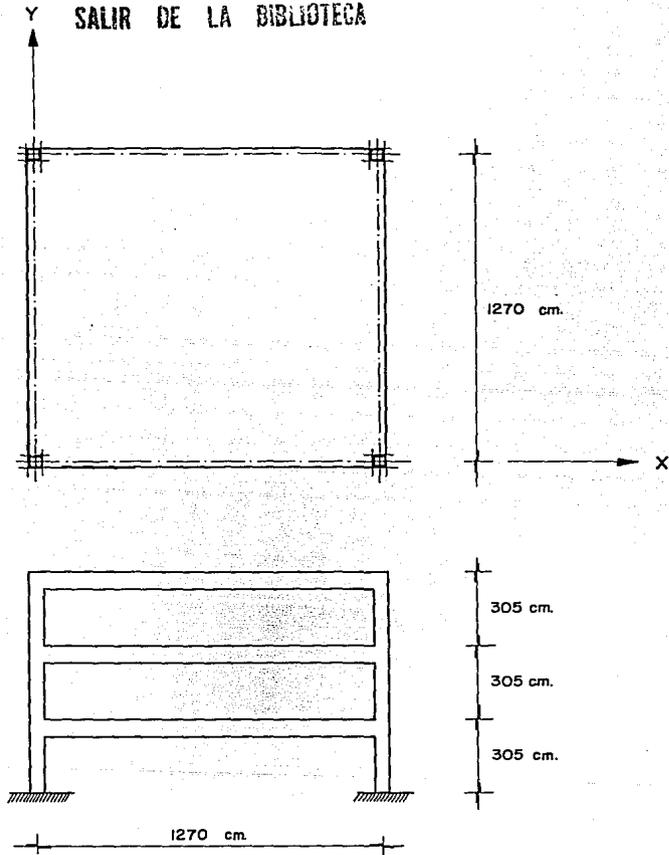


FIG.

5.1

PLANTA Y ELEVACIÓN DE LA ESTRUCTURA EN ESTUDIO

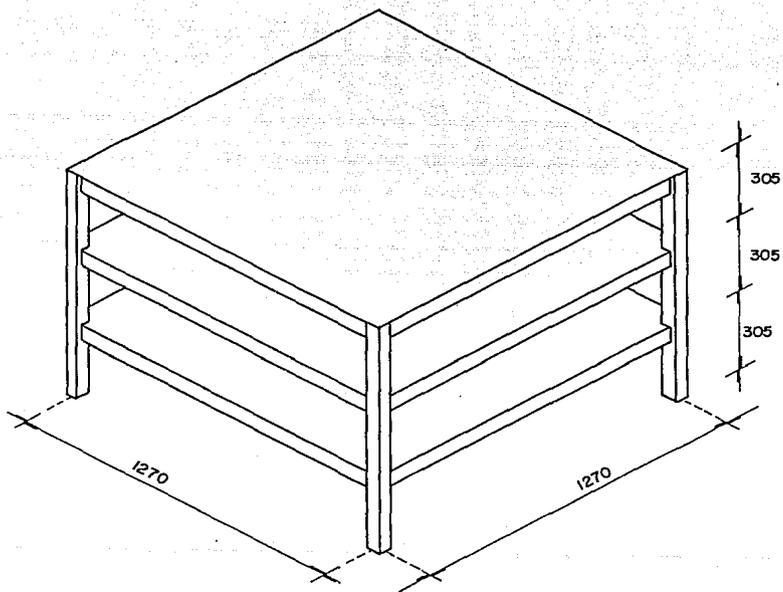


FIG.

5.2

PERSPECTIVA DE LA ESTRUCTURA EN ESTUDIO

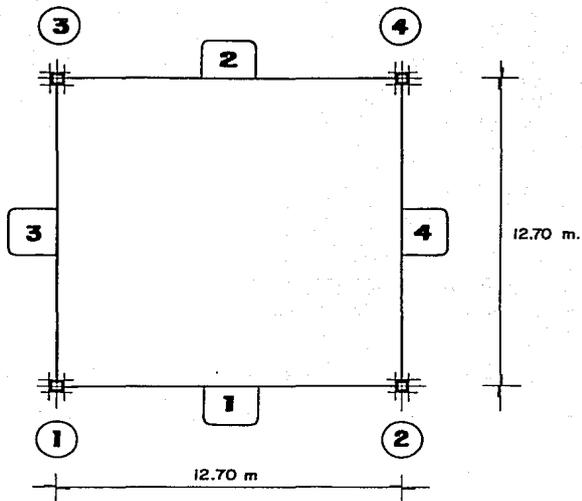


FIG.

5.3

IDENTIFICACIÓN DE TRABES Y COLUMNAS

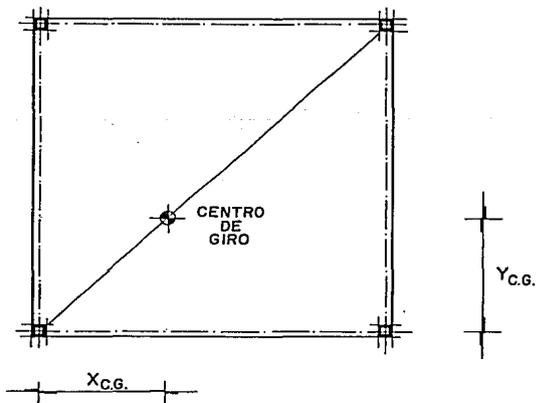


FIG.

5.4

VARIACIÓN DE LA POSICIÓN DEL CENTRO DE GIRO

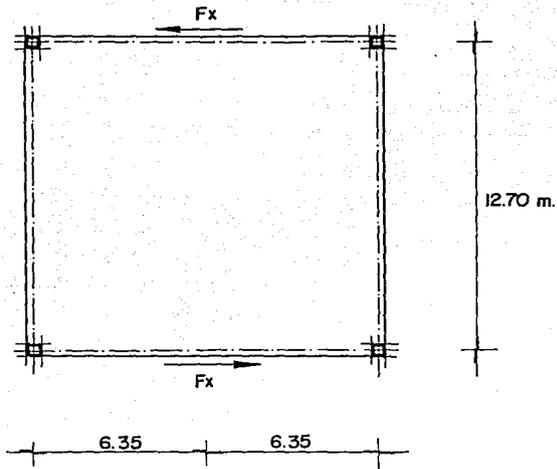


FIG.

5.5

MOMENTO TORSIONANTE
APLICADO EN LA BASE DEL EDIFICIO

CAPÍTULO VI

EFEECTO DEL CAMBIO DEL CENTRO DE GIRO EN LA BASE DE LA ESTRUCTURA

EFECTOS PRODUCIDOS POR MOMENTOS
TORSIONANTES DINÁMICOS EN
ESTRUCTURAS RETICULARES

6.1 TORSIÓN EN EL PISO FICTICIO.

Sea el piso que se muestra en la Fig. 6.1.a, con las columnas que se indican. Las columnas tendrán las propiedades E , I_{xx} , I_{yy} , h , con A muy grande (para evitar deformaciones axiales). Si se considera que las trabes son infinitamente rígidas, entonces, la rigidez lateral de cada columna será:

$$k_{col} = \frac{12 EI}{h^3} \quad (6.1)$$

por lo tanto, la rigidez lateral del sistema será la suma de las rigideces laterales de las columnas = $\sum k_{col i}$

$$k_x = \sum \frac{12 EI_{yyi}}{h^3} \quad (6.2)$$

$$k_y = \sum \frac{12 EI_{xxi}}{h^3} \quad (6.3)$$

De la Fig. 6.1.a:

$$\bar{\Delta}_i = \vartheta |\bar{r}_i| \hat{s}_i$$

donde:

$\bar{\Delta}_i$ = es el vector de desplazamiento de la columna i .

ϑ = es el ángulo que giró el piso en su plano (ϑ peq).

\bar{r}_i = vector de posición de la columna i .

(respecto al centro de giro).

\hat{s}_i = vector unitario perpendicular a \bar{r}_i . (paralelo a $\bar{\Delta}_i$).

Si:

$$\bar{r}_i = x'_i \hat{i} + y'_i \hat{j}$$

entonces:

$$|\bar{r}_i| = \sqrt{x_i'^2 + y_i'^2}$$

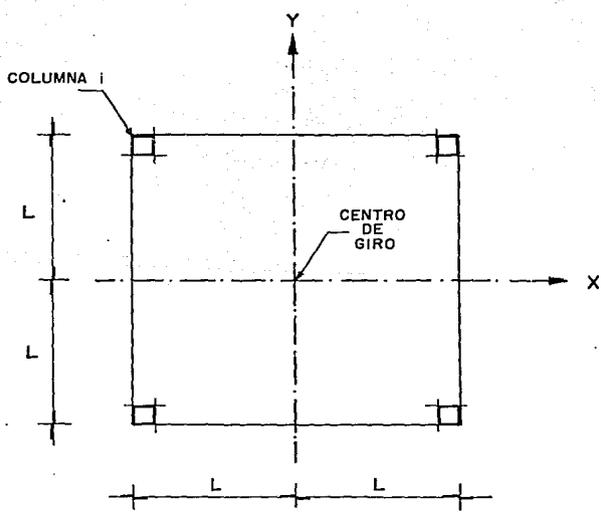
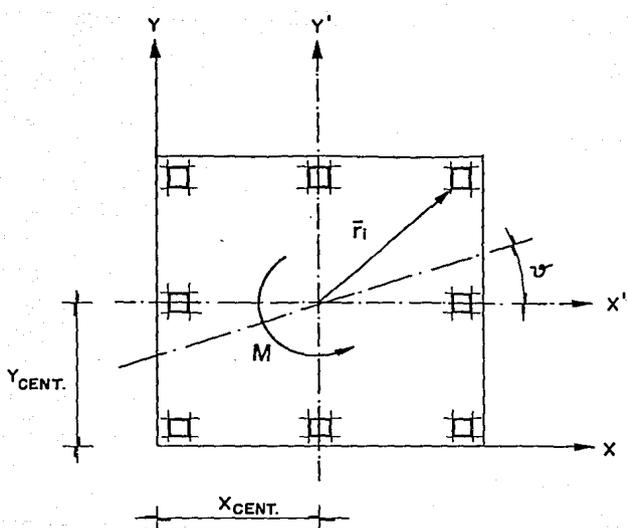


FIG.
6.1

PLANTA PISO FICTICIO

**EFFECTOS PRODUCIDOS POR MOMENTOS TORSIONANTES DINÁMICOS
EN ESTRUCTURAS RETICULARES.**

Por definición:

$$|\hat{s}_i| = 1 \quad \text{y} \quad \hat{s}_i \cdot \hat{r}_i = 0$$

$$\hat{s} = \frac{-y'_i \hat{i} + x'_i \hat{j}}{\sqrt{x_i'^2 + y_i'^2}}$$

Las componentes del vector $\hat{\Delta}_i$ serán:

$$\Delta_{xi} = \vartheta |\hat{r}_i| \hat{s} \cdot \hat{i} = \vartheta (-y'_i \hat{i} + x'_i \hat{j}) \cdot (\hat{i} + 0 \hat{j}) = -\vartheta y' \quad (6.4)$$

$$\Delta_{yi} = \vartheta |\hat{r}_i| \hat{s} \cdot \hat{j} = \vartheta (-y'_i \hat{i} + x'_i \hat{j}) \cdot (0 \hat{i} + \hat{j}) = \vartheta x' \quad (6.5)$$

El momento M que produce el desplazamiento angular ϑ será igual a:

$$M = \sum_{V_i} k_{xi} |\Delta_{xi}| |y'_i| + \sum_{V_i} k_{yi} |\Delta_{yi}| |x'_i|$$

Al sustituir en las ecuaciones (6.4), (6.5) y (6.1) se llega a:

$$M = \sum_{V_i} k_{xi} \vartheta y_i'^2 + \sum_{V_i} k_{yi} \vartheta x_i'^2$$

entonces:

$$k_r = \frac{M}{\vartheta} = \sum_{V_i} \frac{12 EI_{yyi}}{h^3} y_i'^2 + \sum_{V_i} \frac{12 EI_{xxi}}{h^3} x_i'^2 \quad (6.6)$$

Para que lo anterior sea válido, el centro de giro debe estar en las coordenadas que se supuso $(X_{CENT.}, Y_{CENT.})$, para ello:

$$\sum k_{xi} \Delta_{xi} = 0$$

Al sustituir y eliminar constantes:

$$\sum I_{yyi} y_i' = 0 \quad (6.7)$$

**EFFECTOS PRODUCIDOS POR MOMENTOS TORSIONANTES DINÁMICOS
EN ESTRUCTURAS RETICULARES.**

Para la otra dirección:

$$\sum I_{xxi} x'_i = 0 \quad (6.8)$$

Si el piso ficticio tuviera solamente 4 columnas, dispuestas de acuerdo con la Fig. 6.1.b, se podrán encontrar expresiones más sencillas para la modelación que se desea realizar.

Si c_r , c_x y c_y se definen como:

$$c_r = k_r \left[\frac{h^3}{12 E} \right], \quad c_x = k_x \left[\frac{h^3}{12 E} \right] \quad \text{y} \quad c_y = k_y \left[\frac{h^3}{12 E} \right]$$

A partir de las ecuaciones (6.2), (6.3), (6.6), (6.7) y (6.8) se obtiene L , I_{xxi} e I_{yyi} en función de las rigideces de los resortes de interacción: k_x , k_y y k_r .

$$L = \sqrt{\frac{c_r}{c_x + c_y}}, \quad I_{yyi} = \frac{c_r}{4} \quad \text{y} \quad I_{xxi} = \frac{c_y}{4}$$

El piso aquí propuesto es sencillo y fácil de calcular para simular los resortes laterales y de torsión para interacción del suelo.

EFFECTOS PRODUCIDOS POR MOMENTOS TORSIONANTES DINÁMICOS EN ESTRUCTURAS RETICULARES.

6.2 ROTACIONES DE PISO.

Al variar la posición del centro de giro, se obtuvieron las rotaciones de piso que se muestran en las *Tablas 6.1* y *6.3*, cuyos valores normalizados aparecen en las *Tablas 6.2* y *6.4*.

En las *Tablas 6.1* y *6.2*, se presentan los resultados de considerar los momentos de inercia rotacional correspondiente a las coordenadas del centro de giro en estudio; mientras que las *Tablas 6.3* y *6.4*, contienen los resultados de considerar un momento de inercia rotacional constante, referido a los ejes centroidales de la planta del edificio.

En las *Figuras 6.2* y *6.3*, aparecen graficados los valores de las *Tablas 6.1* y *6.3* respectivamente. En las gráficas y en las tablas, se observa que las máximas rotaciones se presentaron cuando el centro de giro se encontraba lo más alejado del centroide de la planta del edificio.

Según los datos encontrados, se observó un efecto amplificador en la rotación; así, en el nivel 4, la rotación resulta del orden de tres veces superior a la obtenida en el primer nivel; en el nivel 3, el aumento fluctuó entre 2 y 2.5; y en el nivel 2, la rotación se amplificó en promedio un 50 %. Efectos similares a los ya descritos han sido observados en edificios reales.

TABLA No. 6.1
ROTACIONES DE PISO

POSICIÓN DEL CENTRO DE GIRO			NIVEL			
NUM.	X	Y	1	2	3	4
1	0.00	0.00	0.0011	0.0017	0.0026	0.0034
2	1.59	1.59	0.0010	0.0015	0.0023	0.0030
3	3.18	3.18	0.0007	0.0011	0.0017	0.0022
4	4.77	4.77	0.0004	0.0005	0.0008	0.0011
5	5.47	5.47	0.0002	0.0003	0.0005	0.0006
6	6.35	6.35	0	0	0	0

TABLA No. 6.2
ROTACIONES DE PISO

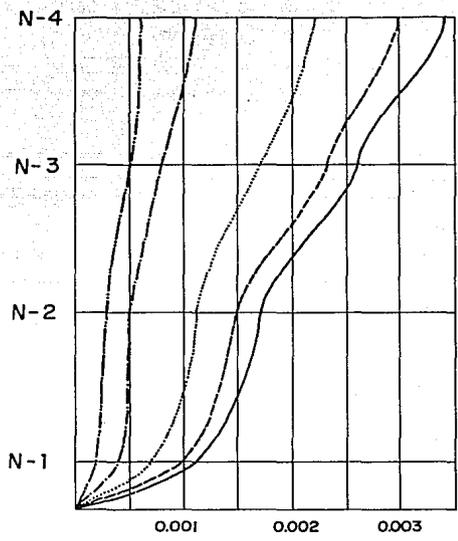
POSICIÓN DEL CENTRO DE GIRO			NIVEL			
NUM.	X	Y	1	2	3	4
1	0.00	0.00	1.000	1.545	2.364	3.091
2	1.59	1.59	1.000	1.500	2.300	3.000
3	3.18	3.18	1.000	1.571	2.429	3.143
4	4.77	4.77	1.000	1.250	2.000	2.750
5	5.47	5.47	1.000	1.500	2.500	3.000
6	6.35	6.35	0	0	0	0

TABLA No. 6.3
ROTACIONES DE PISO

POSICIÓN DEL CENTRO DE GIRO			NIVEL			
NUM.	X	Y	1	2	3	4
1	0.00	0.00	0.0010	0.0016	0.0024	0.0031
2	1.59	1.59	0.0008	0.0013	0.0020	0.0026
3	3.18	3.18	0.0006	0.0009	0.0014	0.0019
4	4.77	4.77	0.0003	0.0005	0.0008	0.0010
5	5.47	5.47	0.0002	0.0003	0.0005	0.0006
6	6.35	6.35	0	0	0	0

TABLA No. 6.4
ROTACIONES DE PISO

POSICIÓN DEL CENTRO DE GIRO			NIVEL			
NUM.	X	Y	1	2	3	4
1	0.00	0.00	1.000	1.600	2.400	3.100
2	1.59	1.59	1.000	1.625	2.500	3.250
3	3.18	3.18	1.000	1.500	2.333	3.167
4	4.77	4.77	1.000	1.667	2.667	3.333
5	5.47	5.47	1.000	1.500	2.500	3.000
6	6.35	6.35	0	0	0	0



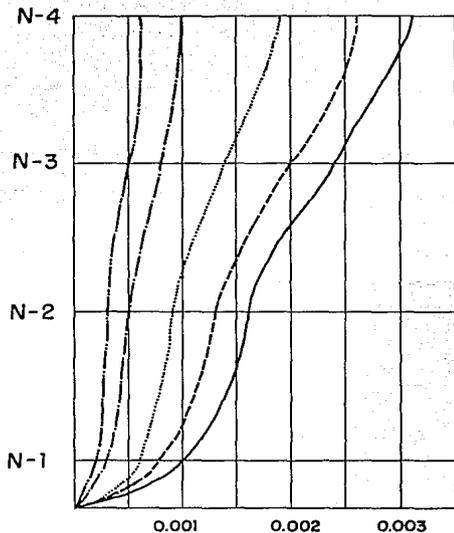
Nomenclatura:

COORDENADAS DEL CENTRO DE GIRO		
	X	Y
—————	0.00	0.00
-----	1.59	1.59
.....	3.18	3.18
-----	4.77	4.77
-----	5.47	5.47

FIG.

6.2

ROTACIONES DE PISO



Nomenclatura:

	COORDENADAS DEL CENTRO DE GIRO	
	X	Y
—	0.00	0.00
- - -	1.59	1.59
· · ·	3.18	3.18
- · -	4.77	4.77
- - - -	5.47	5.47

FIG.

6.3

ROTACIONES DE PISO

CAPÍTULO VII

ELEMENTOS MECÁNICOS MÁS DESFAVORABLES DURANTE EL MOVIMIENTO TORSIONAL DE LA ESTRUCTURA

EFECTOS PRODUCIDOS POR MOMENTOS TORSIONANTES DINÁMICOS EN ESTRUCTURAS RETICULARES

ELEMENTOS MECÁNICOS EN LA COLUMNA 4 NIVEL 1

POSICIÓN DEL CENTRO DE GIRO	MOMENTO TORSIONANTE	MOMENTO FLEXIONANTE				FUERZA AXIAL	FUERZA CORTANTE		
		EJE MAYOR		EJE MENOR			EJE MAYOR	EJE MENOR	
		SUPERIOR	INFERIOR	SUPERIOR	INFERIOR				
1. 0.00	0.00	0	39.5795	40.3688	39.5795	40.3688	132.9454	79.9399	79.9399
2. 1.59	1.59	0	35.8764	36.8299	35.8764	36.8299	132.9454	72.6978	72.6978
3. 3.18	3.18	0	34.2123	35.4642	34.2123	35.4642	132.9454	69.6703	69.6703
4. 4.77	4.77	0	38.3468	39.8931	38.3468	39.8931	132.9454	78.1831	78.1831
5. 5.47	5.47	0	41.4176	42.9540	41.4176	42.9540	132.9454	84.3694	84.3694
6. 6.35	6.35	0	64.4605	66.6591	0	0	132.9454	131.1171	0

12

ELEMENTOS MECÁNICOS EN LA COLUMNA 4 NIVEL 2

POSICIÓN DEL CENTRO DE GIRO	MOMENTO TORSIONANTE	MOMENTO FLEXIONANTE				FUERZA AXIAL	FUERZA CORTANTE		
		EJE MAYOR		EJE MENOR			EJE MAYOR	EJE MENOR	
		SUPERIOR	INFERIOR	SUPERIOR	INFERIOR				
1. 0.00	0.00	25.2979	52.3849	187.6705	52.3849	187.6705	72.8222	67.1334	67.1334
2. 1.59	1.59	22.0483	49.4274	174.4251	49.4274	174.4251	72.8222	61.9862	61.9862
3. 3.18	3.18	16.2790	49.2584	170.6402	49.2584	170.6402	72.8222	60.1083	60.1083
4. 4.77	4.77	8.2752	55.5108	192.1899	55.5108	192.1899	72.8222	67.6053	67.6053
5. 5.47	5.47	4.5793	59.4833	206.7882	59.4833	206.7882	72.8222	72.8547	72.8547
6. 6.35	6.35	0	91.4114	319.7439	0	0	72.8222	112.9351	0

ELEMENTOS MECÁNICOS EN LA COLUMNA 4 NIVEL 3

POSICIÓN DEL CENTRO DE GIRO	MOMENTO TORSIONANTE	MOMENTO FLEXIONANTE				FUERZA AXIAL	FUERZA CORTANTE		
		EJE MAYOR		EJE MENOR			EJE MAYOR	EJE MENOR	
		SUPERIOR	INFERIOR	SUPERIOR	INFERIOR				
1. 0.00	38.6857	38.2876	75.0950	38.2876	75.0950	49.7855	53.6272	53.6272	
2. 1.59	33.6165	34.9427	70.2398	34.9427	70.2398	49.7855	49.7692	49.7692	
3. 3.18	24.8519	33.2896	69.2330	33.2296	69.2330	49.7855	48.5869	48.5869	
4. 4.77	4.77	12.6683	37.2021	77.8861	37.2021	77.8861	49.7855	54.6627	54.6627
5. 5.47	5.47	7.0162	40.2190	83.6776	40.2190	83.6776	49.7855	58.8502	58.8502
6. 6.35	6.35	0	62.6820	129.4182	0	0	49.7855	91.0910	0

56

TABLA No. 7.4

ELEMENTOS MECÁNICOS EN LA COLUMNA 4 NIVEL 4

POSICIÓN DEL CENTRO DE GIRO	MOMENTO TORSIONANTE	MOMENTO FLEXIONANTE				FUERZA AXIAL	FUERZA CORTANTE		
		EJE MAYOR		EJE MENOR			EJE MAYOR	EJE MENOR	
		SUPERIOR	INFERIOR	SUPERIOR	INFERIOR				
1. 0.00	0.00	35.1895	53.6055	18.0612	53.6055	18.0612	22.9169	32.3629	32.3629
2. 1.59	1.59	30.4459	49.7064	16.9015	49.7064	16.9015	22.9169	30.1992	30.1592
3. 3.18	3.18	22.5210	48.4413	16.5101	48.4413	16.5101	22.9169	29.6224	29.6224
4. 4.77	4.77	11.5078	54.4833	18.3463	54.4833	18.3463	22.9169	33.2907	33.2907
5. 5.47	5.47	6.3781	58.6773	19.6985	58.6773	19.6985	22.9169	35.8048	35.8048
6. 6.35	6.35	0	90.8735	30.4177	0	0	22.9169	55.3432	0

ELEMENTOS MECÁNICOS EN LA COLUMNA 4 NIVEL 1

POSICIÓN DEL CENTRO DE GIRO	MOMENTO TORSIONANTE	MOMENTO FLEXIONANTE				FUERZA AXIAL	FUERZA CORTANTE		
		EJE MAYOR		EJE MENOR			EJE MAYOR	EJE MENOR	
		SUPERIOR	INFERIOR	SUPERIOR	INFERIOR				
1. 0.00	0.00	0	33.3460	34.2878	33.3460	34.2878	132.3454	67.5935	67.5935
2. 1.59	1.59	0	33.7464	34.8804	33.7464	34.8804	132.3454	68.5887	68.5887
3. 3.18	3.18	0	34.4549	35.8113	34.4549	35.8113	132.3454	70.2612	70.2612
4. 4.77	4.77	0	38.6974	40.1983	38.6974	40.1983	132.3454	78.0930	78.0930
5. 5.47	5.47	0	41.4968	43.0340	41.4968	43.0340	132.3454	84.5286	84.5286
6. 6.35	6.35	0	64.4605	66.6594	0	0	132.3454	131.1171	0

TABLA No. 7.6

ELEMENTOS MECÁNICOS EN LA COLUMNA 4 NIVEL 2

POSICIÓN DEL CENTRO DE GIRO	MOMENTO TORSIONANTE	MOMENTO FLEXIONANTE				FUERZA AXIAL	FUERZA CORTANTE		
		EJE MAYOR		EJE MENOR			EJE MAYOR	EJE MENOR	
		SUPERIOR	INFERIOR	SUPERIOR	INFERIOR				
1. 0.00	0.00	23.1335	46.5622	163.5281	46.5622	163.5281	72.8222	57.9538	57.9538
2. 1.59	1.59	19.4024	48.0369	167.5779	48.0369	167.5779	72.8222	59.1629	59.1629
3. 3.18	3.18	14.0999	49.8102	172.5415	49.8102	172.5415	72.8222	60.6001	60.6001
4. 4.77	4.77	7.7877	55.9334	193.7365	55.9334	193.7365	72.8222	68.1666	68.1666
5. 5.47	5.47	4.4829	59.5741	207.1197	59.5741	207.1197	72.8222	72.9794	72.9794
6. 6.35	6.35	0	91.4114	319.7139	0	0	72.8222	112.9354	0

ELEMENTOS MECÁNICOS EN LA COLUMNA 4 NIVEL 3

POSICIÓN DEL CENTRO DE GIRO	MOMENTO TORSIONANTE	MOMENTO FLEXIONANTE				FUERZA AXIAL	FUERZA CORTANTE		
		EJE MAYOR		EJE MENOR			EJE MAYOR	EJE MENOR	
		SUPERIOR	INFERIOR	SUPERIOR	INFERIOR				
1	0.00 0.00	35.0751	32.4620	65.8007	32.4620	65.8007	49.7855	46.5824	46.5824
2	1.59 1.59	29.5134	32.8549	67.5004	32.8549	67.5004	49.7855	47.6470	47.6470
3	3.18 3.18	21.6455	33.3809	69.7067	33.3809	69.7067	49.7855	48.9047	48.9047
4	4.77 4.77	11.9326	37.5264	78.4888	37.5264	78.4888	49.7855	55.0958	55.0958
5	5.47 5.47	6.8700	40.2930	83.8106	40.2930	83.8106	49.7855	58.9460	58.9460
6	6.35 6.35	0	62.6820	129.1182	0	0	49.7855	91.0910	0

75

ELEMENTOS MECÁNICOS EN LA COLUMNA 4 NIVEL 4

TABLA No. 7.8

POSICIÓN DEL CENTRO DE GIRO	MOMENTO TORSIONANTE	MOMENTO FLEXIONANTE				FUERZA AXIAL	FUERZA CORTANTE		
		EJE MAYOR		EJE MENOR			EJE MAYOR	EJE MENOR	
		SUPERIOR	INFERIOR	SUPERIOR	INFERIOR				
1	0.00 0.00	31.5391	46.4984	15.5112	46.4984	15.5112	22.9169	28.2187	28.2187
2	1.59 1.59	26.5557	47.5327	15.7387	47.5327	15.7387	22.9169	28.8786	28.8786
3	3.18 3.18	19.7058	48.7380	16.5247	48.7380	16.5247	22.9169	29.7668	29.7668
4	4.77 4.77	10.8449	54.9141	18.5132	54.9141	18.5132	22.9169	33.5501	33.5501
5	5.47 5.47	6.2456	58.7733	19.7372	58.7733	19.7372	22.9169	35.8627	35.8627
6	6.35 6.35	0	90.8735	30.4177	0	0	22.9169	55.3432	0

CAPÍTULO VIII

COMENTARIOS FINALES

**EFFECTOS PRODUCIDOS POR MOMENTOS
TORSIONANTES DINÁMICOS EN
ESTRUCTURAS RETICULARES**

EFFECTOS PRODUCIDOS POR MOMENTOS TORSIONANTES DINÁMICOS EN ESTRUCTURAS RETICULARES.

Este trabajo constituye un primer esfuerzo por entender el comportamiento de las estructuras, sujetas a la acción de momentos torsionantes inducidos por los sismos.

Las investigaciones sobre este tema deben continuar, para evitar la pérdida de vidas y el colapso de edificios en un futuro próximo y estar en posibilidades de incluir en la legislación correspondiente, un capítulo adicional para el análisis de las estructuras por torsión.

Es importante la labor que realizan los centros de investigación citados en el primer capítulo, ya que através del conocimiento de la forma en que se propagan las ondas sísmicas, la amplificación que presentan en el ciudad de México y el comportamiento de las estructuras ante esta excitación, se lograrán métodos de análisis más apegados a la realidad.

En la actualidad, el análisis torsional de los edificios no se lleva al cabo y se subestiman sus efectos que llegan a ser de consideración, aún para edificios simétricos, en los cuales se podría pensar que no se generan momentos torsionantes, los cuales son producidos por las ondas secundarias y de Love lo cual se demostró matemáticamente en el capítulo 2.

El espectro para análisis por torsión de edificios presentado en el capítulo 4, no debe tomarse como un espectro de diseño, se presentó solamente como una primera idea para analizar los efectos que se producen en la estructura seleccionada como ejemplo, cuando se acepta la existencia de giros localizados en la base, alrededor de diversos ejes de giro.

EFFECTOS PRODUCIDOS POR MOMENTOS TORSIONANTES DINÁMICOS EN ESTRUCTURAS RETICULARES.

Será necesario ampliar la información, a fin de contar con datos estadísticos que provengan de mediciones de campo.

De las tablas mostradas en los capítulos 6 y 7, se aprecia que al situarse el centro de giro en una de las esquinas del edificio se generan las mayores rotaciones de piso, así como los momentos torsionantes más grandes.

De las tablas mencionadas, se observa que los momentos flexionantes en la columna 4 experimentan la siguiente variación: su valor máximo se presentó cuando el centro de giro se supuso en el centroide de la planta del edificio, disminuye conforme se hace variar el centro de giro hacia una de las esquinas y aumenta nuevamente al colocar dicho centro muy cerca o aún en la esquina; por lo que, si se colocara el centro de giro afuera de la planta del edificio probablemente se generen valores aún mayores, ya que se observa una tendencia semejante.

La fuerza axial se mantuvo constante al variar la posición del centro de giro. Algo parecido a lo descrito para el momento flexionante sucede en la fuerza cortante.

El centro de giro para un edificio en particular variará de acuerdo con las propiedades del suelo sobre el cual se desplante, por lo que cada caso merece atención especial.

CAPÍTULO IX
REFERENCIAS

**EFFECTOS PRODUCIDOS POR MOMENTOS
TORSIONANTES DINÁMICOS EN
ESTRUCTURAS RETICULARES**

EFFECTOS PRODUCIDOS POR MOMENTOS TORSIONANTES DINÁMICOS
EN ESTRUCTURAS RETICULARES.

- 1.- Ben-Menahem Ari y S. Jit Singh (1981). "Seismic Waves and Sources". Springer Verlag, New York.
- 2.- Ghali A. y Neville A. "Análisis Estructural". Editorial Diana.
- 3.- Fung Y.C. "Foundations of Solid Mechanics". Prentice Hall, Inc. New Jersey. 1965.
- 4.- Love A.E.H. "A Treatise on the Mathematical Theory of Elasticity". 1944. Dover Publications.
- 5.- Maison Bruce F. y Neuss Carl F. "SUPER - ETABS". J.G.Bouwkamp, Inc. Berkeley California. 1983.
- 6.- Reinoso Eduardo y coautores. "Estudio de los datos registrados por la red de la ciudad de México para temblores ocurridos en la brecha de Guerrero". Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica. 1990.
- 7.- Richart F.E., y coautores. "Vibrations of Soils and Foundations". Prentice Hall, Inc. New Jersey.
- 8.- Rodríguez Cuevas Neftalí y Quaas Weppen Roberto. "Respuesta estructural de un edificio instrumentado en la ciudad de México, durante sismos recientes". Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica. 1990.
- 9.- Quaas Weppen Roberto. "Nueva red sísmica para observación y registro de temblores fuertes en México. Acelerogramas del temblor de mayo 31, 1990". Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica. 1990.
- 10.- Sánchez Sesma Francisco J. "Propagación de ondas elásticas en un medio semi-infinito". Instituto de Ingeniería, U.N.A.M.

EFFECTOS PRODUCIDOS POR MOMENTOS TORSIONANTES DINÁMICOS
EN ESTRUCTURAS RETICULARES.

11. - Sauter Franz. "Introducción a la Sismología". Editorial Tecnológica de Costa Rica.
12. - Timoshenko S y Goodier J.N. "Theory of Elasticity". Mc Graw Hill Book Co. 1951.
13. - Tso W.K. y Hsu T.I. "Torsional Spectrum for Earthquake Motions". Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 6. 1978.
14. - "Uniform Building Code". (1979). International Conference of Building Officials.
15. - Wakabayashi Minoru y Martínez Romero Enrique. "Diseño de Estructuras Sismorresistentes". Mc Graw Hill.
16. - Wilson E.L., Hollings J.P. y Dovey H.H. "Three Dimensional Analysis of Building Systems (extended version) Report N° UBC/EERC 75-13". Earthquake Engineering Research Center. University of California. Berkeley, Cal. U.S.A. 1975.
17. - Woof John P. "Dynamic Soil-Structure Interaction". Prentice Hall.
18. - Zeevaert Wiechers Leonardo. "Respuesta sismo-dinámica de cimentaciones monolíticas". Diseño Sísmico de Estructuras Especiales. Memorias del XII Curso Internacional de Ingeniería Sísmica.(1986) División de Educación Continúa de la Facultad de Ingeniería.UNAM.