

EVALUACION ESTRUCTURAL DE EDIFICIOS EN LA CIUDAD DE MEXICO



Neftalí Rodríguez Cuevas *

RESUMEN

Los sismos de 1985 en la Ciudad de México hicieron necesario evaluar las condiciones estructurales de gran número de edificios de concreto reforzado mediante el uso de técnicas auxiliares.

En este artículo se presentan los resultados obtenidos al utilizar vibraciones ambientales, hacer pruebas con pulsos ultrasónicos, la obtención de corazones de concreto y el análisis de los movimientos del subsuelo.

Estas técnicas proporcionan datos útiles para generar modelos tridimensionales de las estructuras de los edificios con propiedades dinámicas similares a las medidas en el lugar. A partir de los modelos obtenidos es fácil evaluar su respuesta, obtener información relativa a los elementos mecánicos y crear nuevas condiciones para un mejor comportamiento de los edificios.

También se proporciona información relativa a los resultados obtenidos utilizando las técnicas auxiliares que se mencionan en el texto en algunos edificios que sufrieron daños durante las perturbaciones sísmicas de 1985.

Se mencionan también las limitaciones observadas en el uso de los métodos auxiliares y se hacen comentarios sobre la interpretación de los resultados obtenidos mediante las técnicas citadas en el texto.

* Investigador, Instituto de Ingeniería, UNAM.
Profesor, Facultad de Ingeniería, UNAM.

INTRODUCCION

Los fuertes sismos de septiembre de 1985, originados en la zona de subducción de la costa del Pacífico de México, produjeron movimientos intensos en los edificios de la Ciudad. Las dudas que surgieron acerca del estado final de los edificios de concreto reforzado hicieron necesario desarrollar sistemas para evaluar su comportamiento estructural y evaluar posibles daños en su capacidad para soportar nuevas perturbaciones sísmicas.

Se encontró que el siguiente esquema es útil para entender el estado en que se encuentran los edificios de concreto construidos en la ciudad de México, donde las condiciones del subsuelo son únicas:

- a) Una inspección visual cuidadosa para detectar daños localizados, agrietamiento de miembros estructurales, movimientos de la cimentación y daños en los elementos no estructurales.
- b) La medición de las vibraciones ambientales, con objeto de definir los valores y las formas características del edificio; estas mediciones permiten la identificación de los parámetros dinámico-estructurales del edificio y de su cimentación.
- c) Pruebas no destructivas en las columnas y sistemas de piso, con el fin de encontrar la variación espacial de las velocidades ultrasónicas de pulso y obtener así información sobre la resistencia y el módulo dinámico del concreto.
- d) Recopilación de la información del diseño estructural original del edificio, contenida en los planos estructurales y en memorias esquemáticas de cálculo.
- e) Información sobre las características estratigráficas del sitio, las propiedades dinámicas de los suelos y su respuesta ante cargas monotónicas.
- f) Cuando es posible, el uso de los resultados de vibraciones forzadas del edificio que da información relativa al comportamiento cinemático y al amortiguamiento de la estructura, así como al de otras propiedades dinámicas.
- g) Generación de un modelo tridimensional de la estructura mediante el uso de las propiedades de los materiales, similares a las obtenidas de pruebas, con un comportamiento dinámico cuyos valores y formas características son cercanas a las obtenidas por medio de mediciones.

En este artículo se describen brevemente como se utilizó el procedimiento mencionado para evaluar varios edificios de concreto reforzado de la ciudad de México.

INSPECCION VISUAL

Proporciona una visión clara del nivel de daños en una estructura, y su distribución conduce a comprender los movimientos inducidos por la acción sísmica.

Constituye una de las mejores técnicas de evaluación estructural si la lleva a cabo un ingeniero estructural entrenado. Para realizar una inspección visual es muy útil contar con un informe escrito que identifique el tipo y la localización de los daños, así como su extensión, lo que facilita el proceso posterior de toma de decisiones.

Para tipificar la información, se pueden preparar formatos especiales que son de gran ayuda al describir los daños; proporcionan la información inicial para la investigación completa del edificio y, junto con la información numérica adicional, obtenida de la nivelación de sus partes y de las diferencias verticales de alineamiento, dan una imagen clara del estado del edificio después de un sismo intenso.

La evolución de los movimientos de un edificio, permite descubrir tendencias hacia procesos inestables en su comportamiento.

Para dar un ejemplo de lo anterior, la figura no. 1 contiene información sobre la evolución de los desplazamientos verticales de un edificio a través de un periodo de seis meses de observación. Durante los primeros cuatro meses mostró movimientos que incrementaron los asentamientos diferenciales. Medidas correctivas, consistentes en la disminución de la carga y en una demolición parcial mostraron su importancia, revirtiendo el signo de los movimientos así, en los últimos meses de observación se eliminó el comportamiento inestable.

Debe investigarse la información disponible relativa a la cimentación con objeto de entender el comportamiento del contacto entre la base del edificio y el subsuelo. En algunos casos se requiere excavar abajo de los edificios para identificar problemas en las pilas y en el subsuelo. Debido a que los problemas de cimentación son difíciles y costosos de resolver, el autor cree que las cimentaciones dañadas requieren medidas extremas, tales como demoliciones parciales o totales del edificio, basadas en la experiencia del ingeniero estructural.

En la ciudad de México es también importante observar el posible golpeteo entre edificios adyacentes. Aproximadamente el 40 por ciento de los edificios altos dañados en el centro de la ciudad de México (Ref. 1) sufrieron daño en los pisos superiores debido al golpeteo generado por el movimiento tridimensional de los edificios causado por ondas superficiales de Tipo Rayleigh o al efecto acoplado de los modos de translación y cabeceo, que debido a la flexibilidad del suelo son significativos. Estos modos son excitados por ondas HP y P. Si la cimentación de los edificios altos no tiene suficiente rigidez rotacional, las separaciones usuales entre edificios recomendadas por el reglamento pueden ser insuficientes; esto se puede juzgar a partir de los daños observados en un recorrido alrededor de la construcción y de los datos sobre nivelaciones.



a) Fotografía del edificio después del temblor

Desplazamiento vertical en cada punto, en cm.	Diciembre	Enero	Febrero	Marzo	1º Mayo	1º Junio	30 Junio
	11					+6	-2
12					+6	-1	
13					+5	+1	
14					+5	+2	
15					+4	+3	
20					-4	+4	
21					-5	+9	
22					+2	+8	
23					-4	+8	
24					0	+7	
25					+3	+5	
26					+3	+5	
27					+4	+4	
28					+5	-1	
29					+6	-1	
30					+7	-2	

b) Desplazamientos verticales en la base del edificio.

FIG. 1 Edificio después de los sismos de 1985, y evolución de asentamientos de 16 puntos localizados en el perímetro del edificio, en planta baja.

MEDICIONES DE VIBRACION AMBIENTAL

Los edificios en la ciudad de México están siempre en movimiento debido a las condiciones únicas de su subsuelo y a fuentes de vibración tales como el tránsito de automotores. Este movimiento es amplificado por los edificios, generando una combinación de modos que incluye la interacción con el subsuelo.

La medición de pequeñas aceleraciones de un edificio se puede usar estadísticamente para definir parámetros de identificación mediante un análisis en el dominio de frecuencias, con el uso de la transformada rápida de Fourier. Esta técnica ha sido útil para la identificación de valores y formas características de las estructuras, así como para definir la impedancia suelo-estructura asociada a cada modo de vibración (Ref. 2).

La figura no. 2 muestra los espectros estadísticos obtenidos para un edificios del centro de la ciudad de México, con el mismo contenido de frecuencias en varias mediciones, lo que permite su identificación en el transcurso del tiempo.

Una vez que la frecuencia relativa a cada modo se ha identificado y se ha desarrollado un modelo matemático del edificio, es posible conocer las propiedades de impedancia del suelo y las propiedades dinámicas del edificio.

La distribución de la masa de un edificio se puede obtener y, mediante un proceso matemático, es posible evaluar la rigidez de un edificio. Si la rigidez es constante durante cierto periodo de tiempo y su distribución de masa es invariante, es posible asegurar propiedades dinámicas constantes.

Cuando una perturbación sísmica afecta un edificio y lo daña, el cambio que experimenta su frecuencia se puede utilizar como una medida del cambio de su rigidez. En la referencia 2, se establece una escala para estimar los daños (tabla no. 1), que se ha corroborado en mediciones realizadas en varios edificios de la ciudad de México.

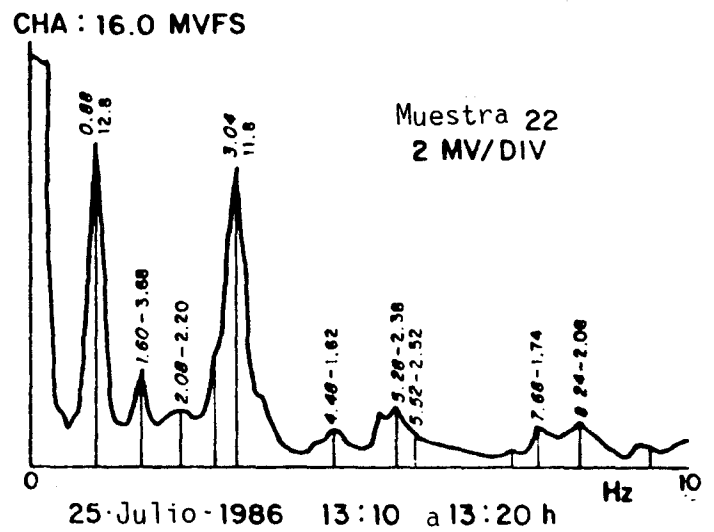
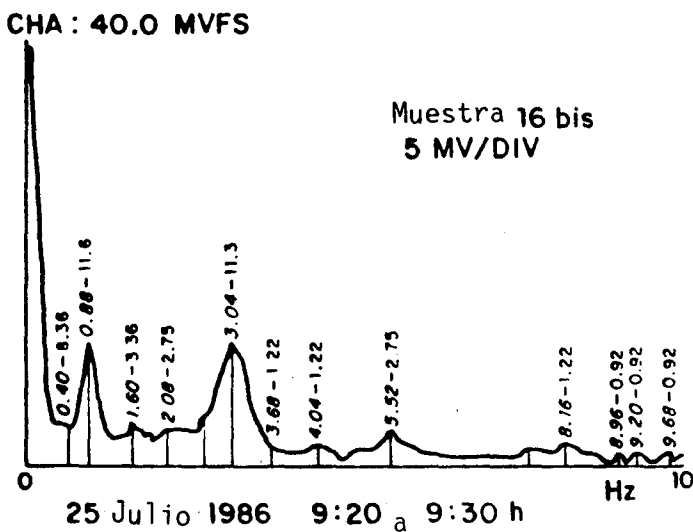
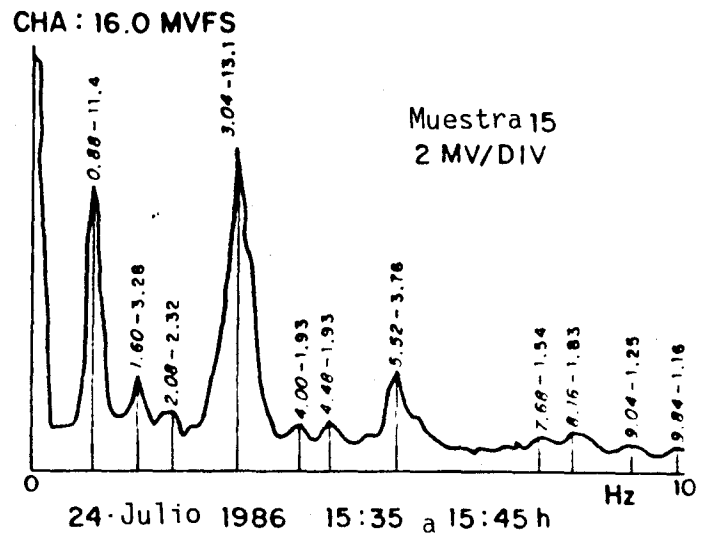
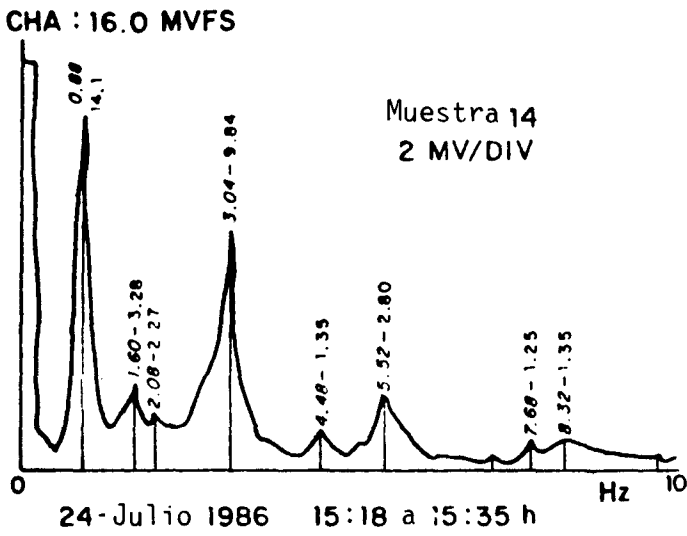
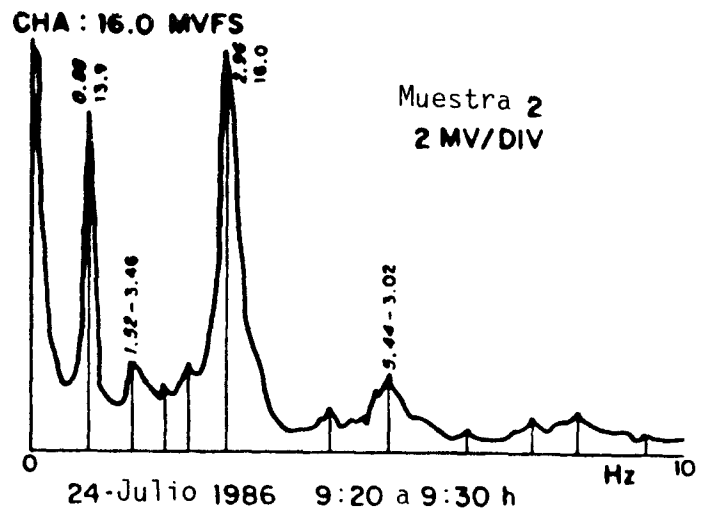
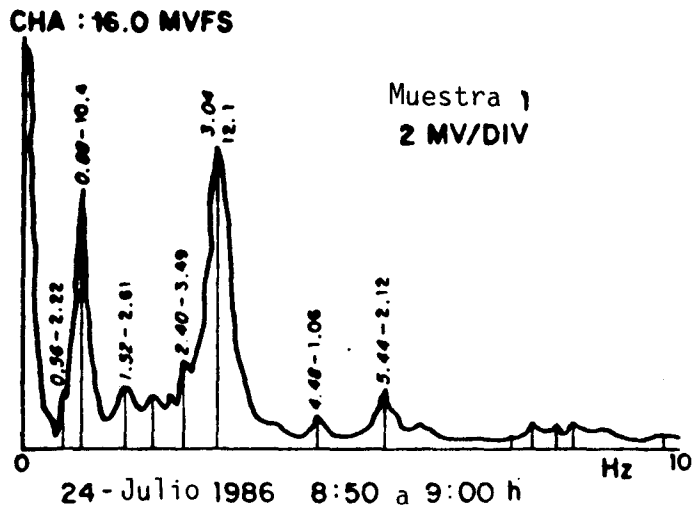


Fig 2 Espectros de aceleración obtenidos en el techo del edificio; cada espectro se obtuvo en diferente momento, en la dirección Este.

TABLA 1

Clasificación del nivel de daños

Daño observado	cambio en rigidez (en por ciento)
Libre de daño	0 a 10
Daño mínimo	10 a 20
Daño en elementos no estructurales	20 a 30
Daño estructural ligero	30 a 40
Daño estructural intermedio	40 a 50
Daño estructural severo	50 a 70

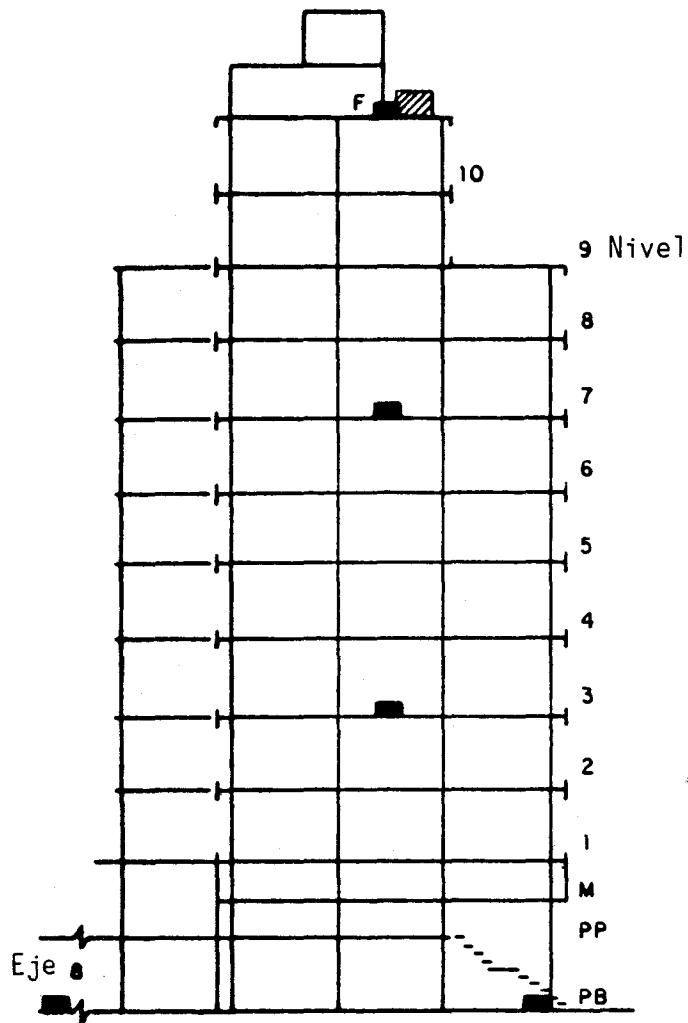
La figura 3 da una visión esquemática de un edificio que fue estudiado en 1979 y después del sismo de 1985. Mostró las propiedades dinámicas siguientes en dos direcciones ortogonales:

- Periodo medido en 1979 1.52 s
- Periodo medido en 1986 1.5 s

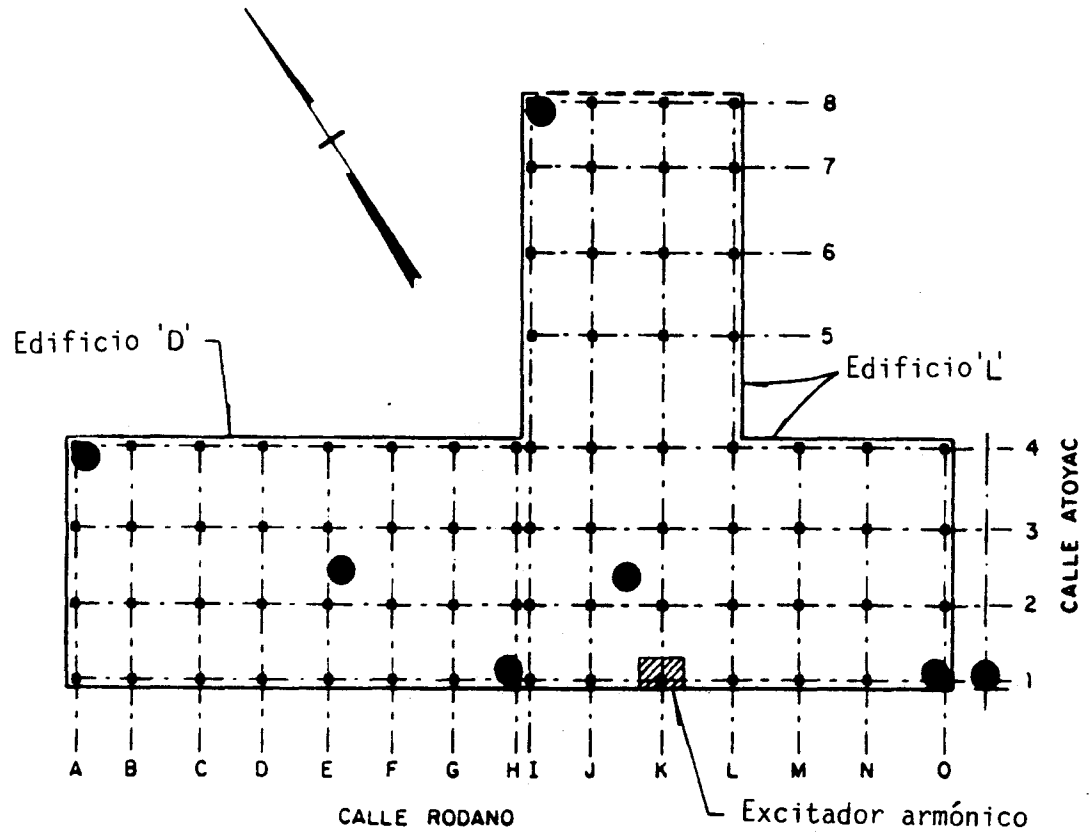
Estos resultados indican que la estructura del edificio no se deterioró después de sismos sucesivos de importancia. Una evidencia similar se muestra en las referencias 3 a 5, lo que ilustra que las mediciones antes y después de una perturbación importante se pueden utilizar para estimar el daño estructural de un edificio cuando las propiedades de suelo son estables.

En algunos edificios, como el que se muestra en la figura 4, se utilizó una máquina de excitación armónica para forzar un movimiento dinámico con el fin de obtener sus propiedades dinámicas y de disipación de energía.

Las vibraciones ambientales también se pueden utilizar para estudiar el efecto que producen los cambios que provocan en la estructura los sismos intensos. La figura 5 muestra como influye la modificación de la estructura de un edificio al incrementar su rigidez debido al refuerzo de sus columnas: su periodo se modifica claramente debido al procedimiento del refuerzo y aparta al edificio de la zona de resonancia con el subsuelo en la zona en que el edificio se construyó.

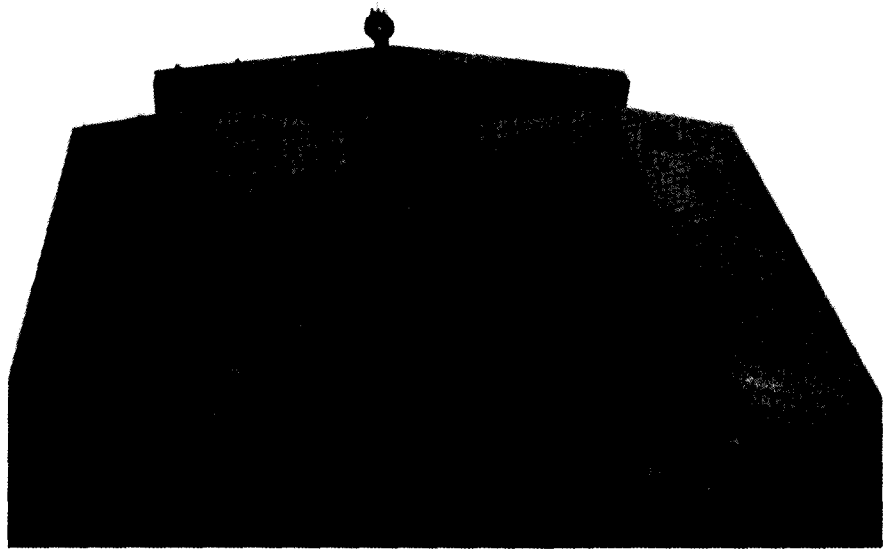


a) Vista vertical

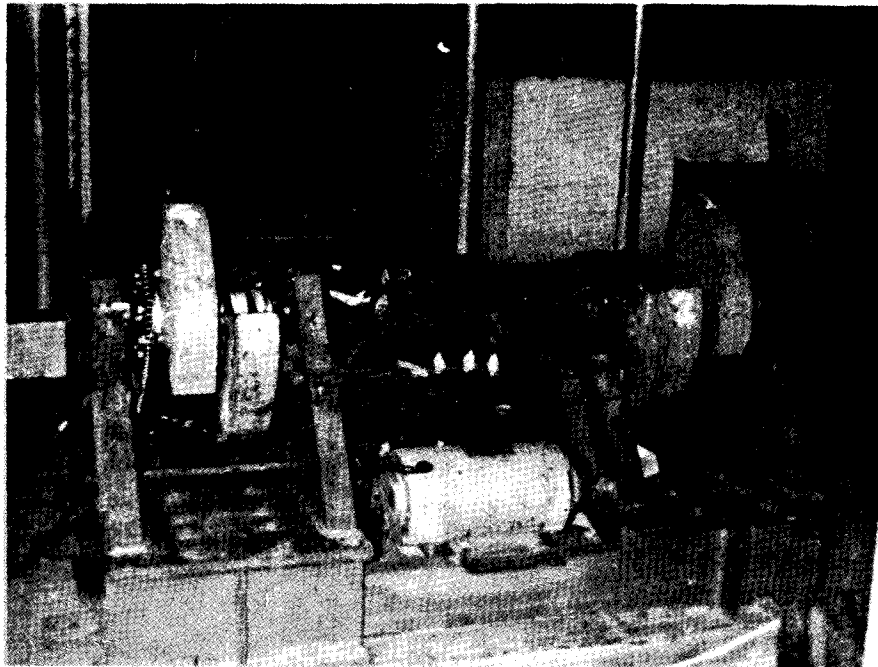


b) Nivel del techo

Fig 3 Distribución de puntos de medición, para aceleraciones verticales y horizontales inducidas por vibraciones ambientales.

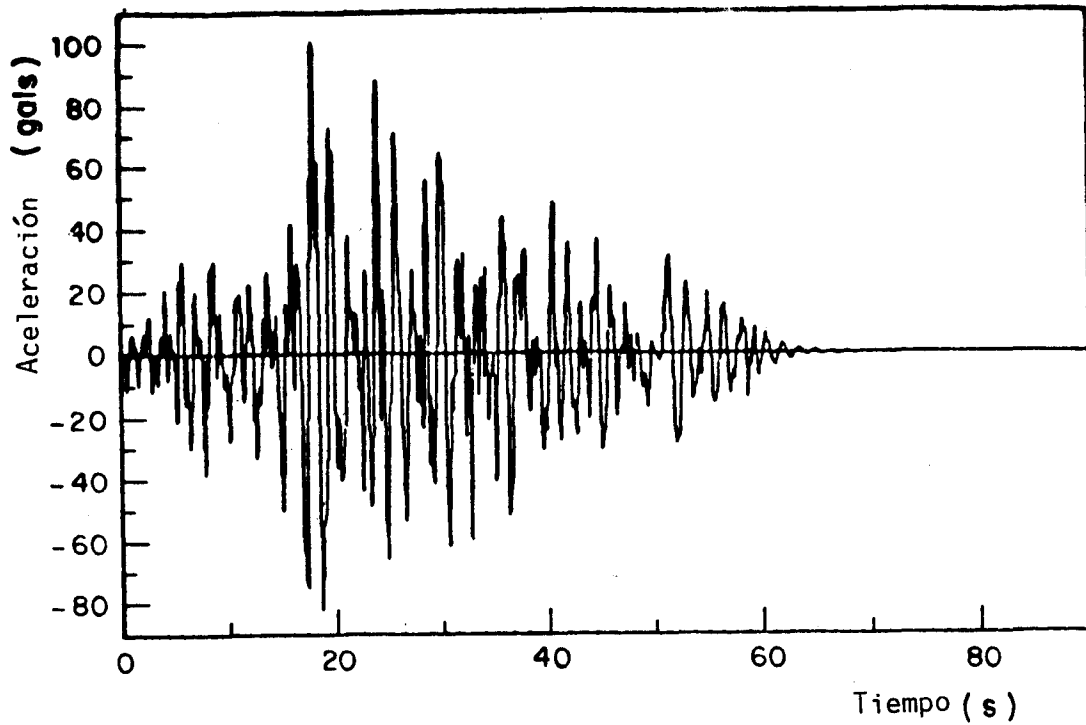


a) Vibrador armónico hacia el techo del edificio.

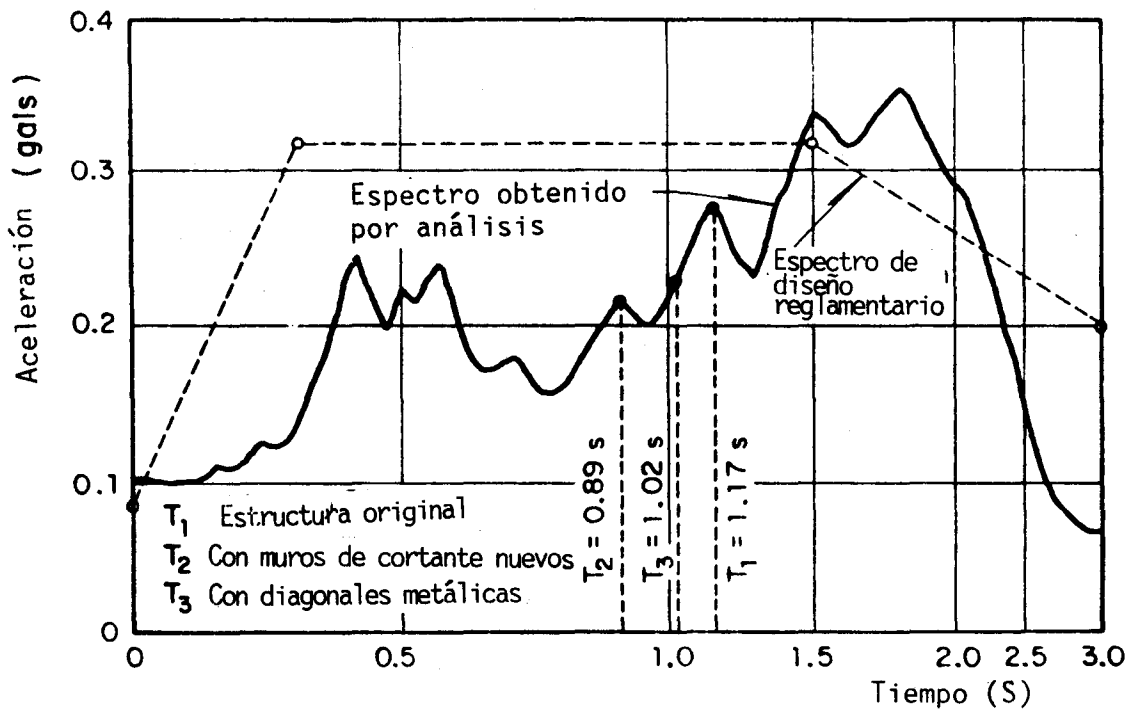


b) Excitador en el techo del edificio.

FIG. 5 Vibrador armónico utilizado durante la vibración de un edificio alto de la ciudad de México.

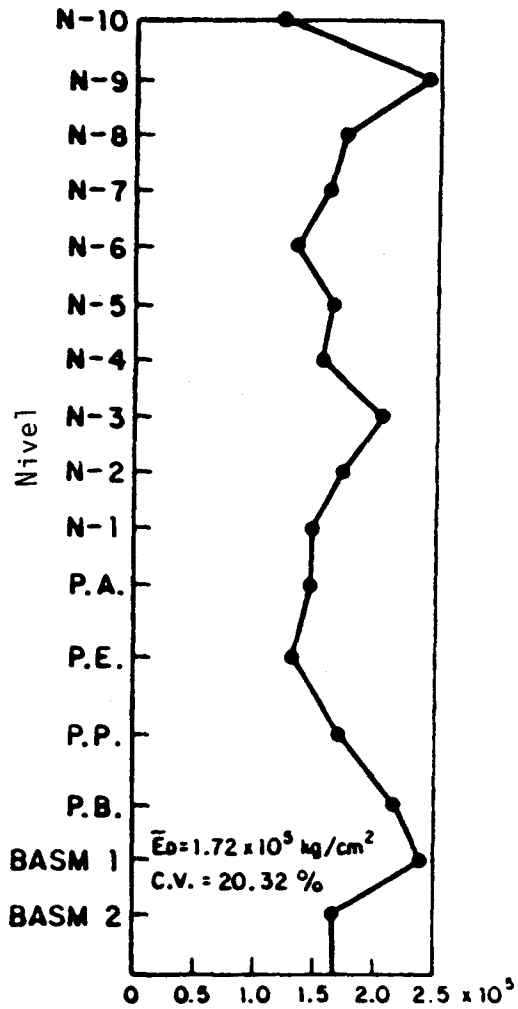


a) Señal sísmica obtenida con el programa SHAKE, sobre el terreno, en la base del edificio.

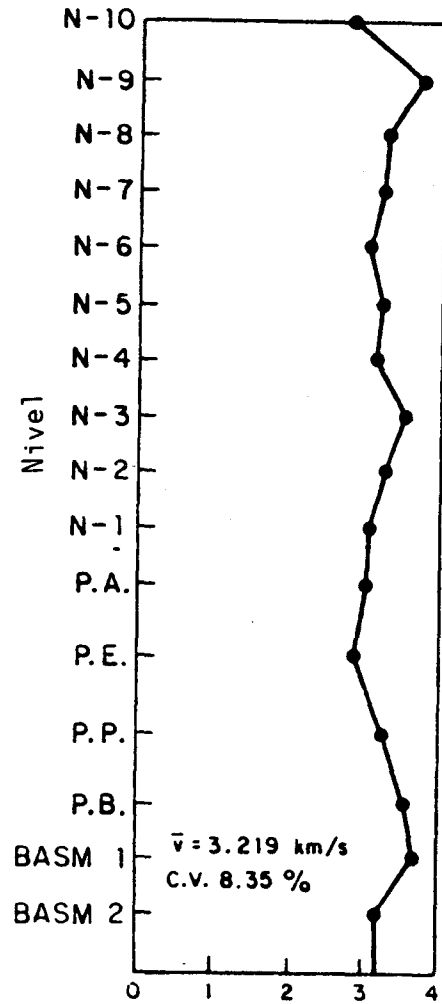


b) Espectro obtenido y alternativas estudiadas

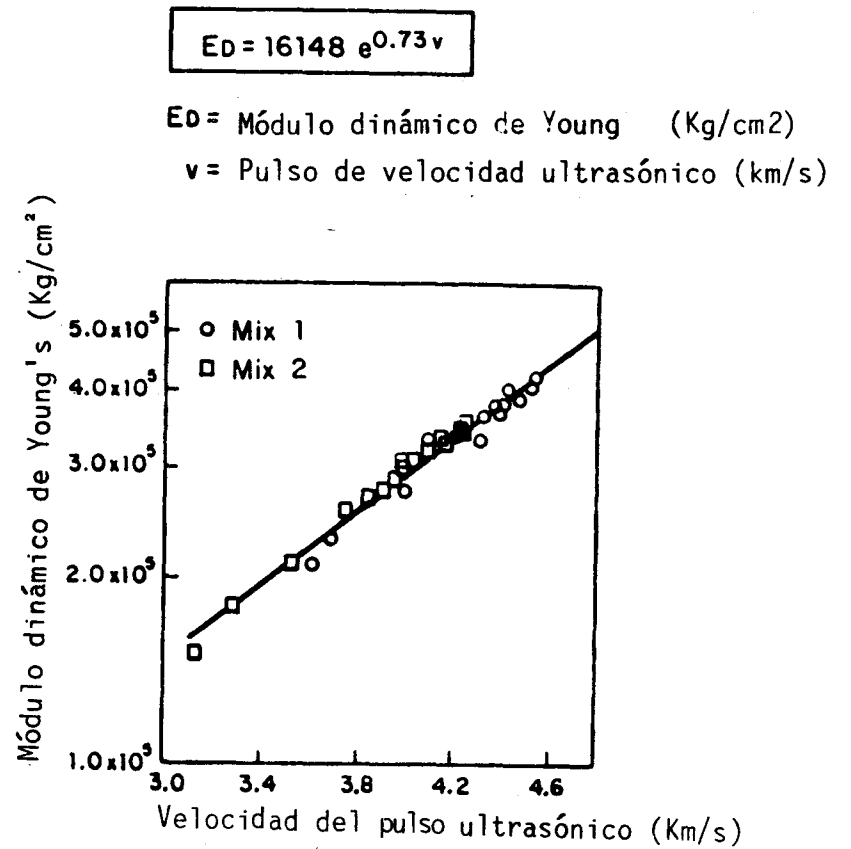
Fig 4 Resultados obtenidos de cálculos de aceleraciones de suelo y espectro de respuesta obtenidos en un edificio reforzado,



a) Módulo dinámico de Young's (Kg/cm²)



b) Velocidad del pulso, Km/s



c) Relación entre velocidad del pulso y el módulo dinámico de Young (ref 6)

Fig.6 Resultados obtenidos de pruebas ultrasónicas en un edificio de dieciseis pisos localizado en la Ciudad Universitaria, en México.

PRUEBAS NO DESTRUCTIVAS

Se han desarrollado varios procedimientos para determinar la resistencia del concreto en el lugar que proporcionan información útil en relación con sus propiedades, por comparación, con los resultados de las mediciones realizadas en corazones de muestra. La comparación puede dar información para fines de aceptación o rechazo. Entre las pruebas no destructivas es común utilizar:

- a) El esclerómetro, que puede proporcionar una buena idea de la resistencia del concreto cuando es manejado por técnicos bien entrenados; el rebote del martillo de acero es mayor, a medida que la resistencia del concreto crece.
- b) La pistola de Windsor, que utiliza la penetración de un dispositivo metálico impulsado con una cantidad controlada de pólvora; es una buena prueba comparativa.
- c) La prueba de extracción de una varilla de acero también puede proporcionar evidencia cualitativa de la resistencia del concreto.
- d) La prueba de pulsos ultrasónicos, que permite medir la velocidad de un pulso ultrasónico (20,000 Hz) entre dos sensores colocados a una distancia conocida, proporciona información acerca de las propiedades dinámicas del material que forma a una estructura.

En ocho edificios de la ciudad de México se realizaron pruebas ultrasónicas para evaluar las propiedades del concreto; los resultados fueron satisfactorios en la estimación del módulo dinámico de Young y en la variación espacial de las velocidades de pulso; en las figuras 6 a 8 se muestran algunos resultados, histograma y variaciones observadas, así como la estimación del módulo de Young como se menciona en la referencia 6.

Es interesante observar, en la figura 6, la información obtenida de un edificio de 32 años de edad, construido en la Ciudad Universitaria; en el cual la variación espacial de la velocidad ultrasónica es pequeña debido a que el edificio soportó el sismo de 1985 sin ningún daño estructural visible. Las pruebas ultrasónicas dieron información numérica (figura 6-b) relativa al módulo de Young; alimentando con estos datos un programa para ordenador digital, fue posible reproducir las propiedades dinámicas con una buena aproximación, como se observa en la tabla 2. Debe mencionarse que los valores numéricos son confiables cuando los pulsos de velocidad no son menores a 3 kilómetros por segundo; la figura 7 muestra las variaciones de los pulsos ultrasónicos obtenidos en cuatro edificios de 6 pisos de altura en la

Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) en diferentes niveles; estos edificios fueron construidos hacia 1952.

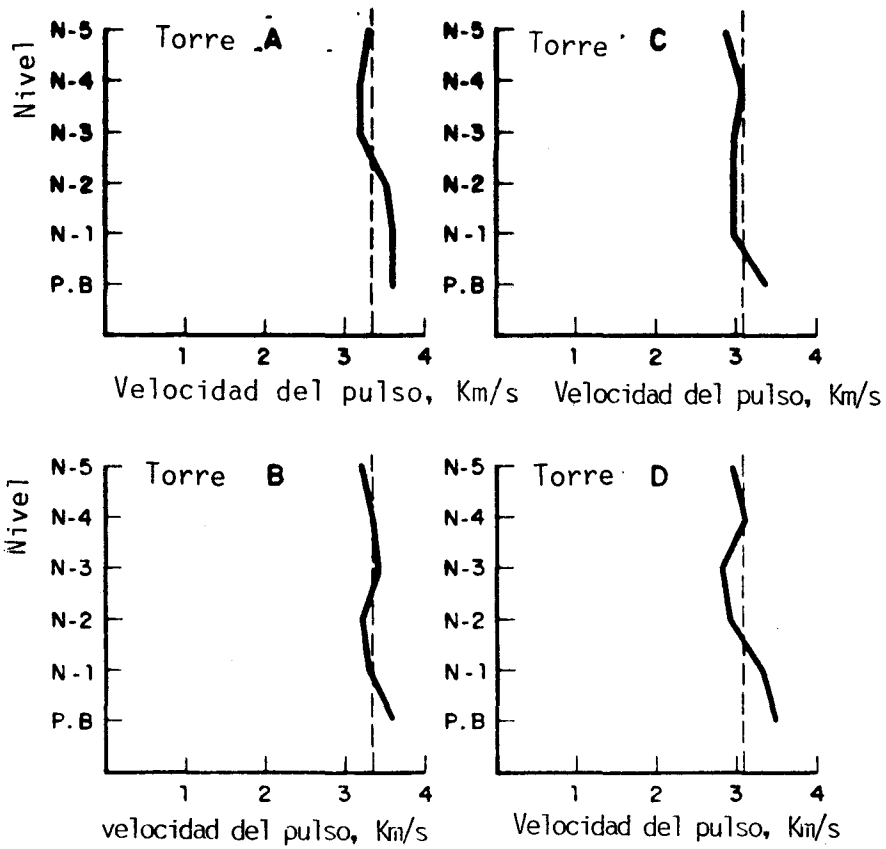
TABLA 2

Cambio en el periodo natural de vibración en una dirección, con propósitos de cálculo, al considerar diferentes elementos del edificio.

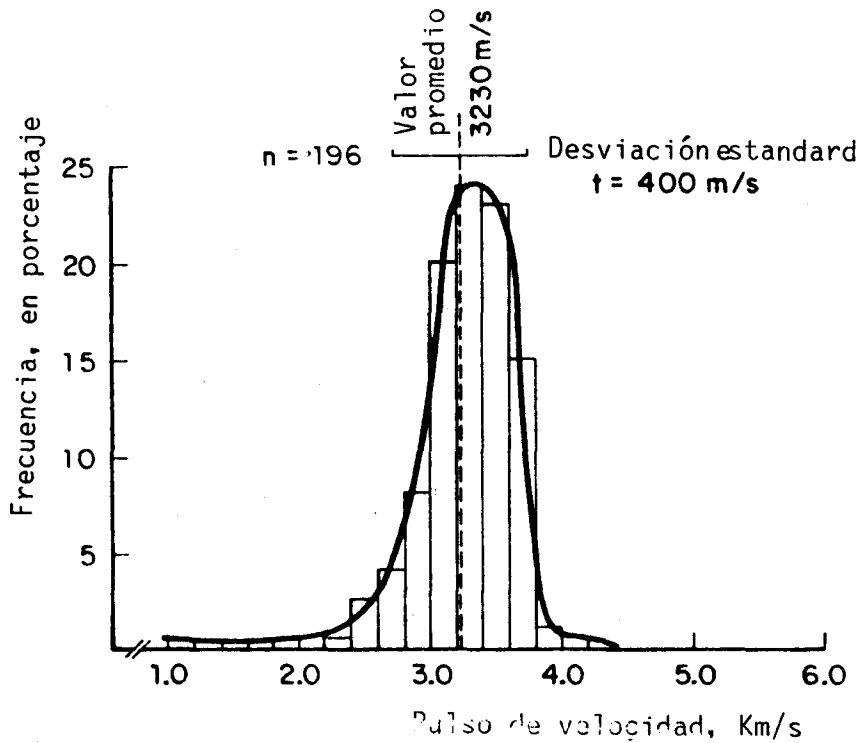
Tipo de modelo	Periodo fundamental calculado	Cociente entre el periodo calculado y el medido
1. Modelo calibrado, considerando todos los elementos estructurales	1.23	1.00
2. Sin muros en elevadores y escaleras	1.45	1.18
3. Sin escaleras	1.27	1.03
4. Sin muros exteriores en las cuatro fachadas	1.24	1.02
5. Con la carga viva recomendada en el reglamento	1.48	1.20
6. Sin zona rígida en la unión trabe - columna	1.50	1.22
7. Sin carga de máquinas de elevadores, ni tanque de agua en el techo	1.21	0.98
8. Usando el módulo de Young obtenido de pruebas estáticas	1.40	1.14
9. Sólo estructura reticular	2.75	2.24

Se puede observar que los pulsos de velocidad son aproximadamente similares en esos edificios, y que la distribución de frecuencia muestra un histograma bien definido, indicando poca variación la velocidad de los pulsos.

Con objeto de ilustrar las diferentes formas de los histogramas de pulsos de velocidad ultrasónica, la figura 8 muestra el resultado de las mediciones realizadas en un edificio de estacionamientos dañado, de doce pisos, construido en 1952. Se puede observar la gran dispersión de los valores y la diferencia en la velocidad de pulso promedio en trabe y columnas.

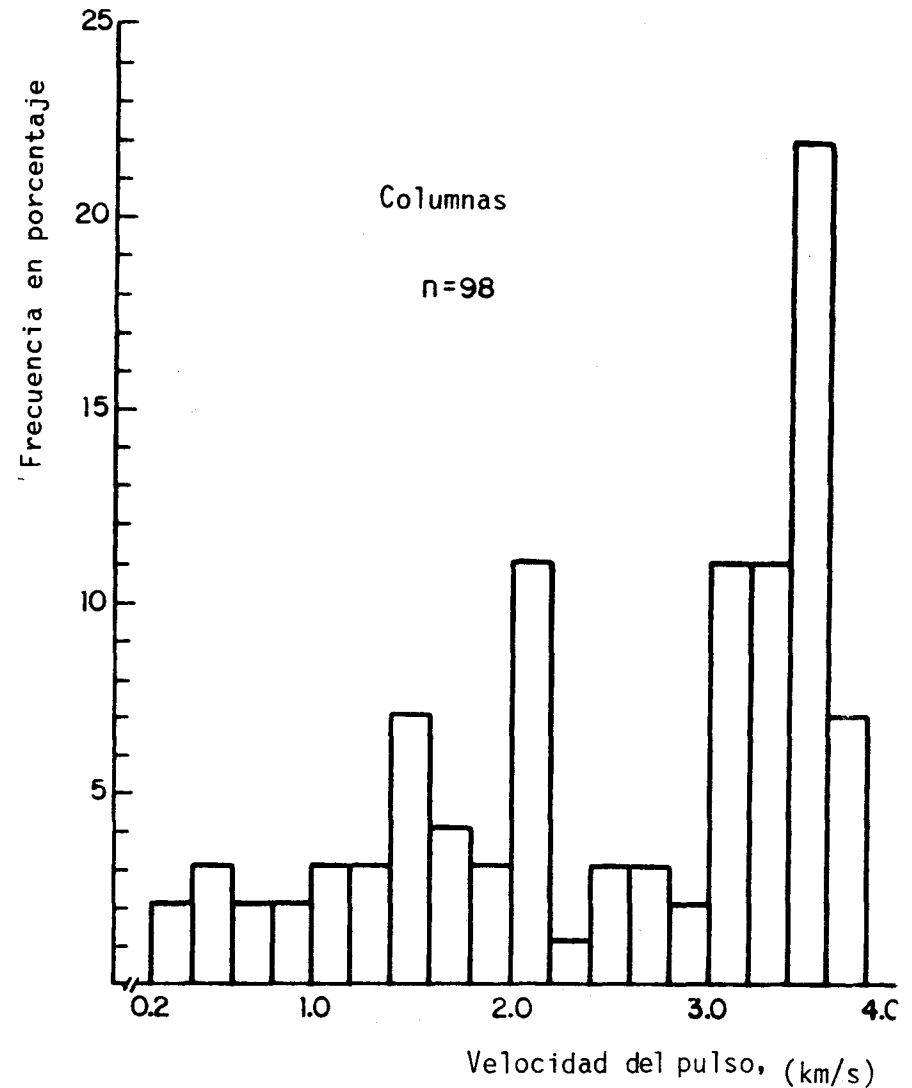
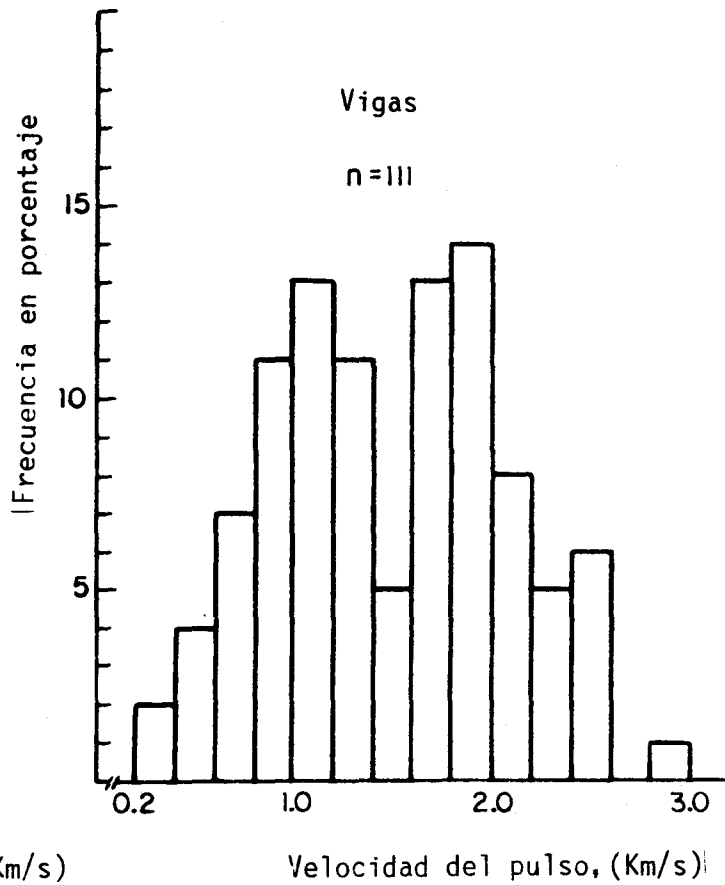
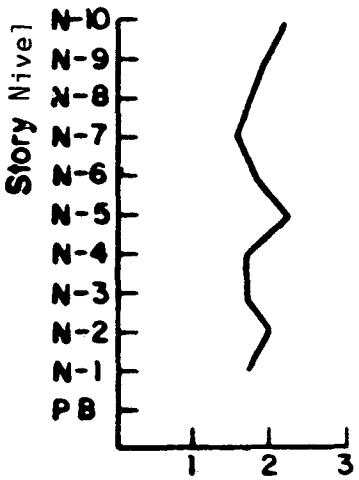
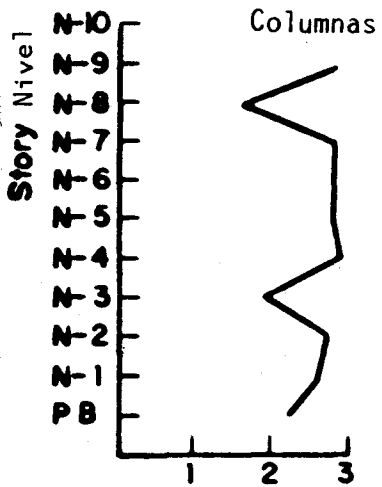


o) Velocidad promedio del pulso en las columnas de cada nivel



b) Distribución de frecuencias en elementos de concreto del edificio

Fig.7 Resultados obtenidos de pruebas ultrasónicas en cuatro edificios de seis pisos de S.T.C., México.



Velocidad del pulso, (Km/s)

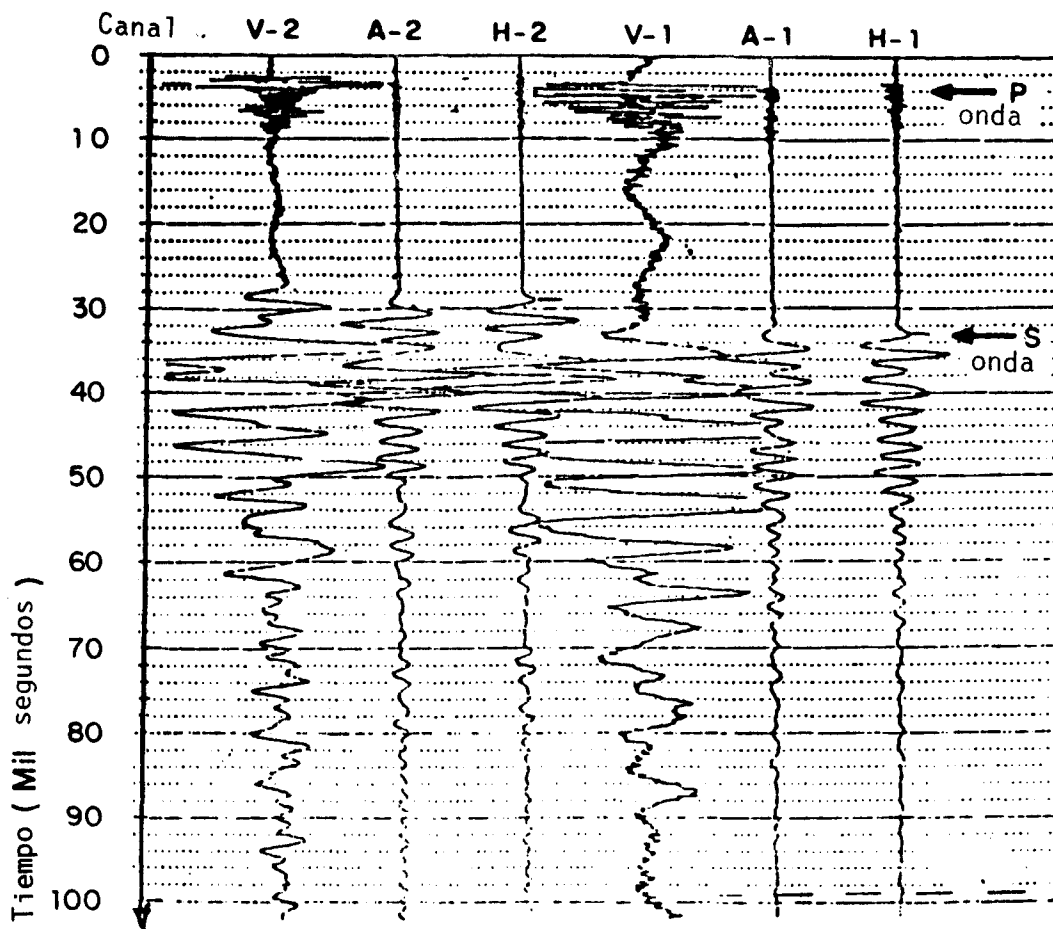
Velocidad del pulso, (Km/s)

Velocidad del pulso, (km/s)

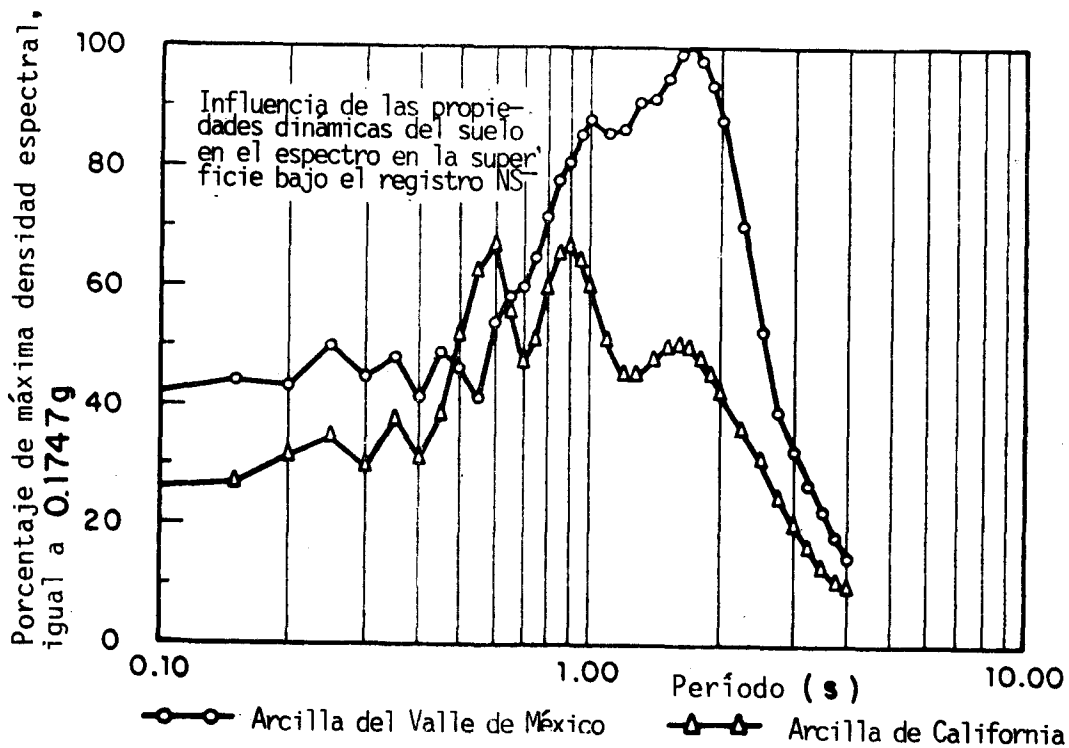
a) Variación con la altura

b) Distribución de frecuencia en vigas y columnas

Fig. 8 Resultados de pruebas ultrasónicas en un edificio de concreto severamente dañado, en el centro de la Ciudad de México



a) Registro de una prueba para definir la velocidad de ondas de cortante en el edificio de la S.C.T.



b) Espectro obtenido con el programa SHAKE con diferentes suelos, bajo la misma señal registrada en Ciudad Universitaria

Fig. 9 Propiedades del subsuelo obtenidas de pruebas dinámicas y espectros de aceleración calculados para dos suelos distintos bajo el mismo sismo.

Muestra también grandes variaciones verticales, con valores pequeños en los niveles 3 y 8, donde las columnas sufrieron gran daño durante los sismos de 1985, en parte debido a la falta de confinamiento del acero vertical de refuerzo por una separación excesiva en los estribos. Estos ejemplos ilustran el uso de la técnica de pulsos ultrasónicos como una herramienta útil para la detección de daños. También se puede relacionar con las propiedades de resistencia: cuando la velocidad del pulso ultrasónico es pequeña, la resistencia a la compresión de los corazones tomados del edificio es baja.

BUSQUEDA DE INFORMACION DE LA ESTRUCTURA Y DE LA CIMENTACION

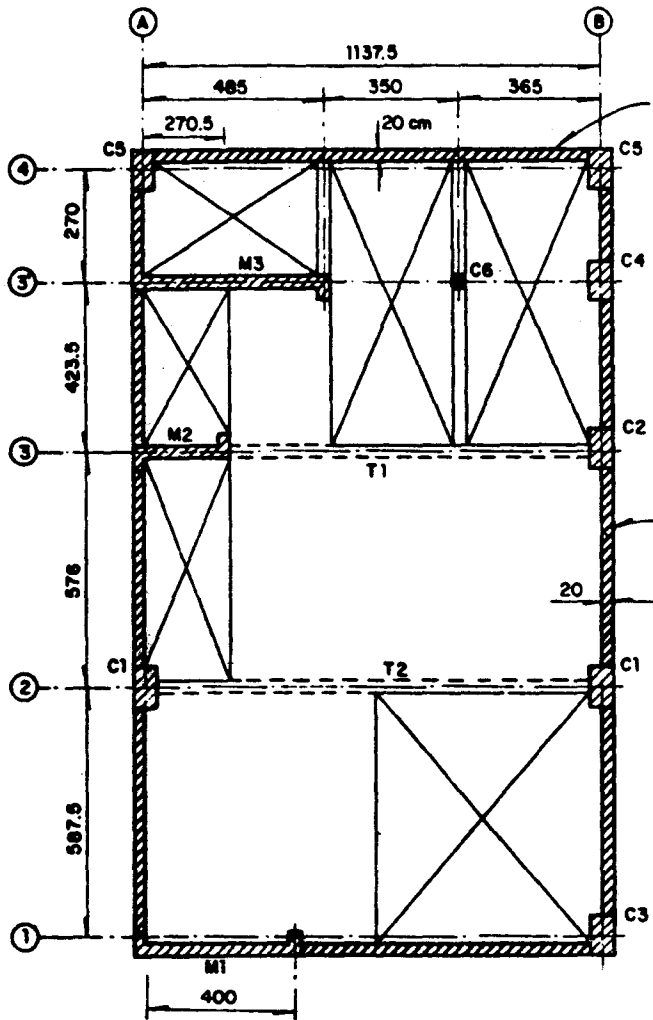
Es práctica común en la ciudad de México, contar con los planos estructurales que fueron utilizados durante la construcción del edificio y también con los cálculos que se realizaron para el diseño. Cada ingeniero responsable guarda esa información y se puede conseguir para la evaluación del edificio. Con frecuencia, las autoridades guardan también los dibujos autorizados que pueden, asimismo, obtenerse para la evaluación.

Es importante contar con esta información dado que un análisis estructural permitirá encontrar los desplazamientos y los elementos mecánicos de la estructura que se evalúa; cuando los datos obtenidos de análisis son iguales o menores que los valores permisibles dados por el reglamento, se puede suponer un buen comportamiento. En caso negativo se debe proceder a una rigidización para incrementar la resistencia del edificio y definir posibles cambios de la distribución de sus elementos estructurales.

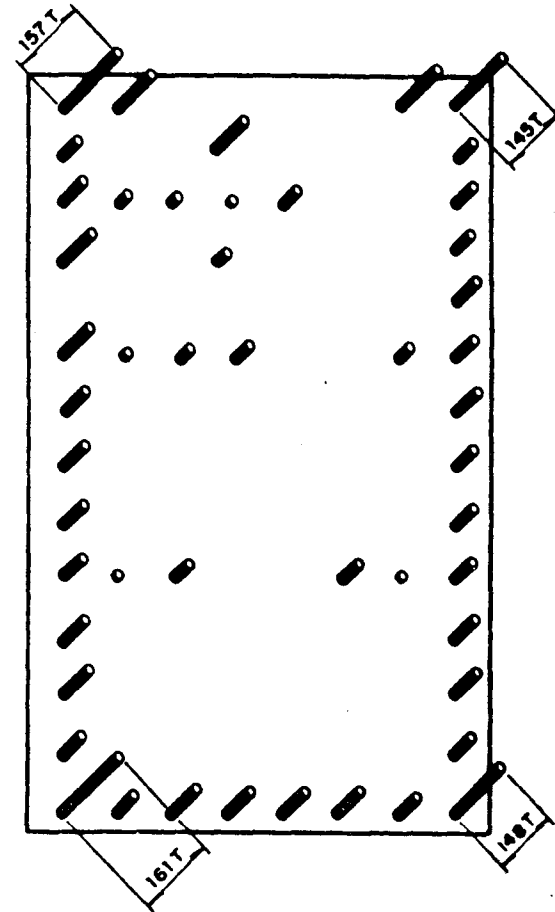
La información obtenida de los planos, de los sondeos, y de las características de la cimentación, es también importante cuando se realiza un análisis de estabilidad en busca de un buen comportamiento del edificio.

La información geotécnica de los estratos del suelo, la velocidad de las ondas de cortante y los espectros obtenidos a través de un filtrado viscoelástico de señales de sismos obtenidos digitalmente, resultan muy útiles para determinar la interacción del suelo con la estructura.

La figura 9a muestra los resultados obtenidos con un instrumento suspendido dentro de un estrato colocado a 44 metros bajo la superficie del lugar del edificio de la SCT; a partir de estos datos de las propiedades dinámicas del suelo bajo la cimentación, fue posible comparar los espectros obtenidos mediante un proceso de cómputo para el mismo movimiento sísmico, en dos subsuelos diferentes.



a) Vista en planta de un edificio de once pisos



b) Distribución de cargas en pilotes bajo carga vertical

Fig 10 Carga en los pilotes de la cimentación de un edificio esbelto que se inclinó durante los sismos de 1985

Resulta evidente de la figura 9b que el subsuelo de la ciudad de México produce una importante amplificación de las aceleraciones que generaron los sismos de 1985.

Por otro lado, el conocimiento de la distribución de los pilotes bajo los edificios esbeltos ayuda a comprender la distribución no lineal de cargas dependiendo del tipo de distribución de pilotes, de la longitud y de las condiciones del subsuelo; la figura 10 muestra una solución obtenida para un edificio específico del centro de la ciudad de México.

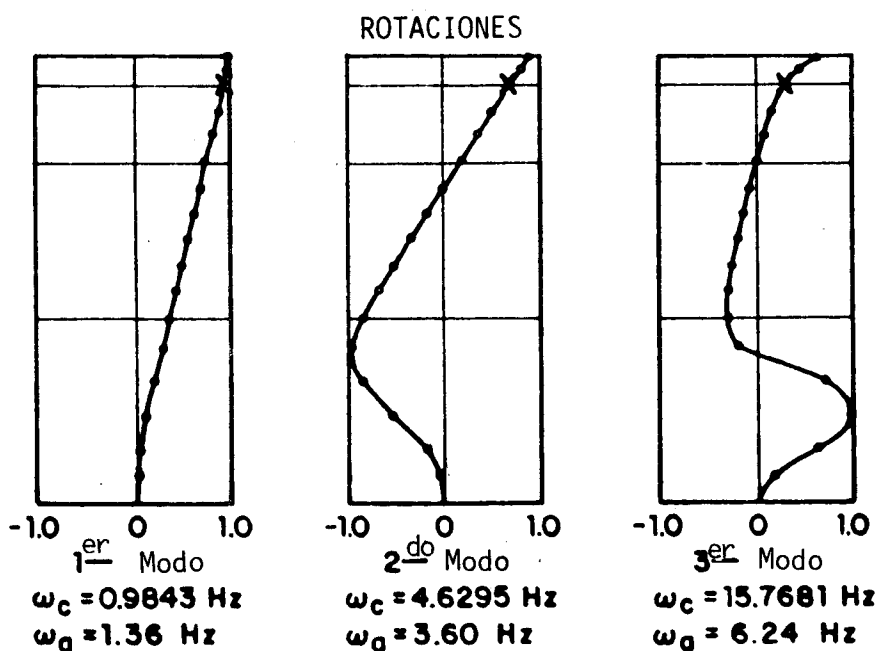
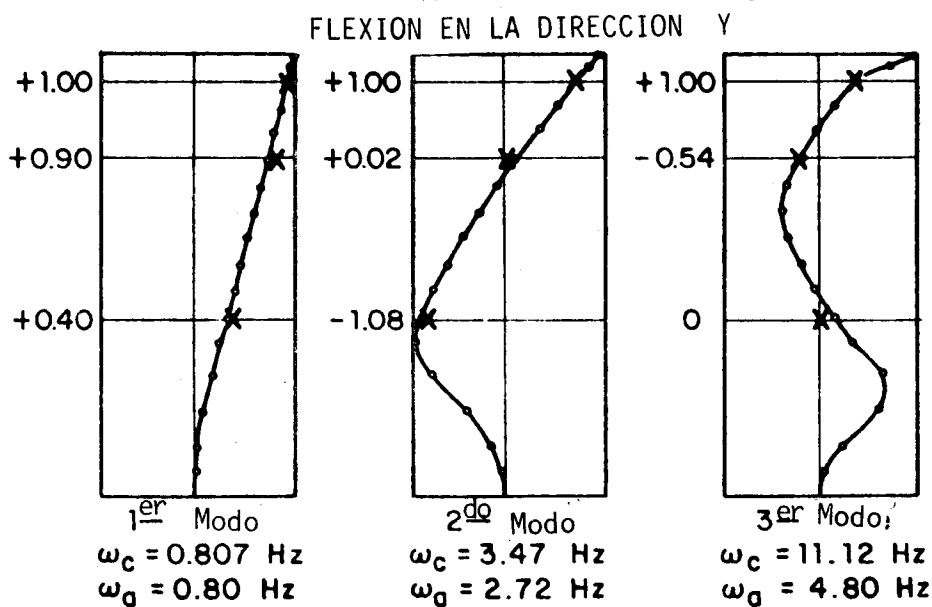
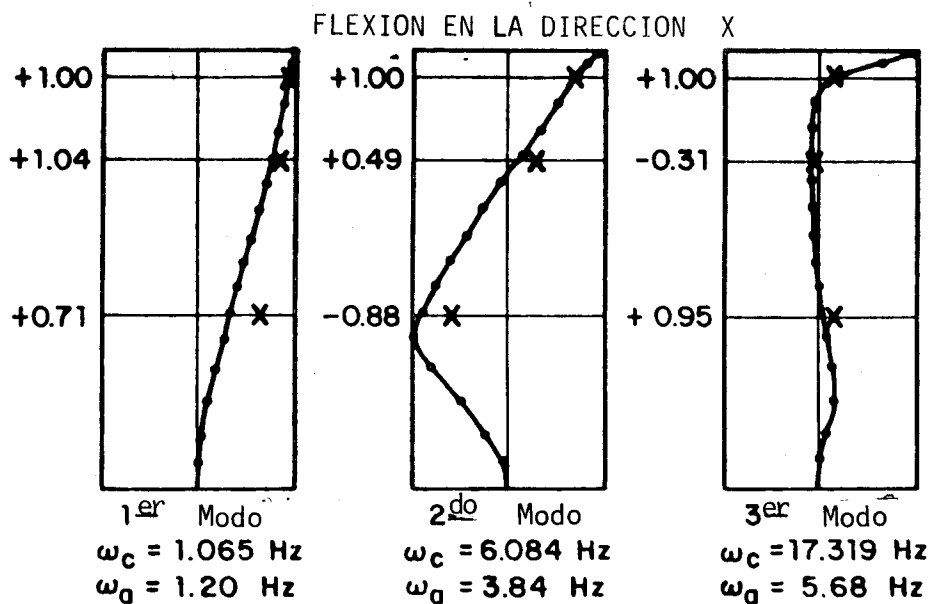
MODELO TRIDIMENSIONAL

Con la información antes mencionada es posible generar el modelo tridimensional de un edificio, con características dinámicas similares a las medidas en el lugar.

El uso de programas para microordenadores (por ejemplo SUPER ETABS) es un procedimiento útil para generar un modelo matemático del edificio en el que todas las características topológicas de la estructura se reproducen, así como las propiedades de los materiales, con el objeto de obtener propiedades dinámicas similares a las obtenidas mediante mediciones.

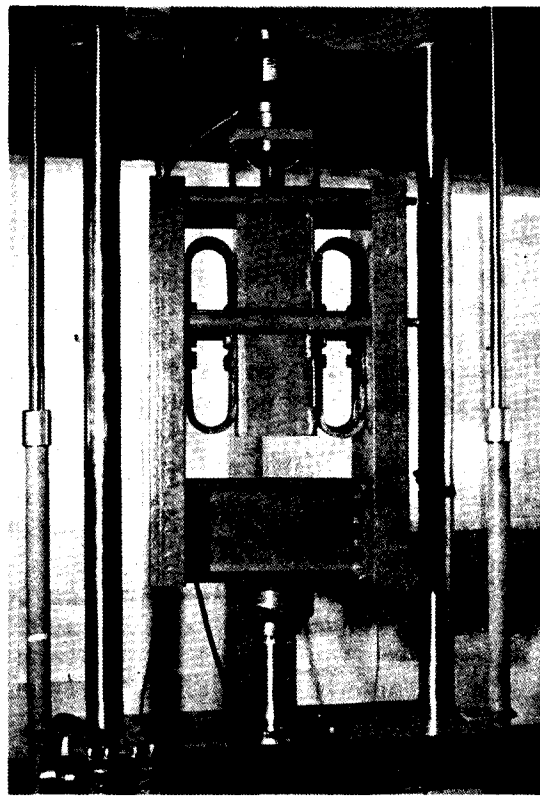
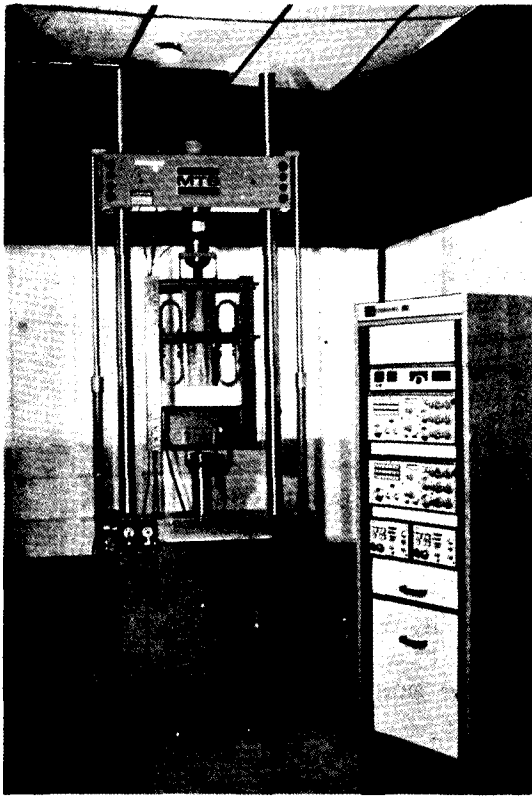
Es importante considerar una distribución de masas correcta, el módulo dinámico de Young adecuado y una similitud geométrica con la estructura, para obtener un modelo representativo de ella. La tabla 2 muestra la importancia de los diferentes parámetros considerados y la aproximación obtenida a partir de los cálculos de los periodos fundamentales de la estructura.

En muchos casos es necesario tener en cuenta en las propiedades dinámicas del edificio y de las características de rigidez de la interacción suelo-estructura, como se muestra en la figura 10.

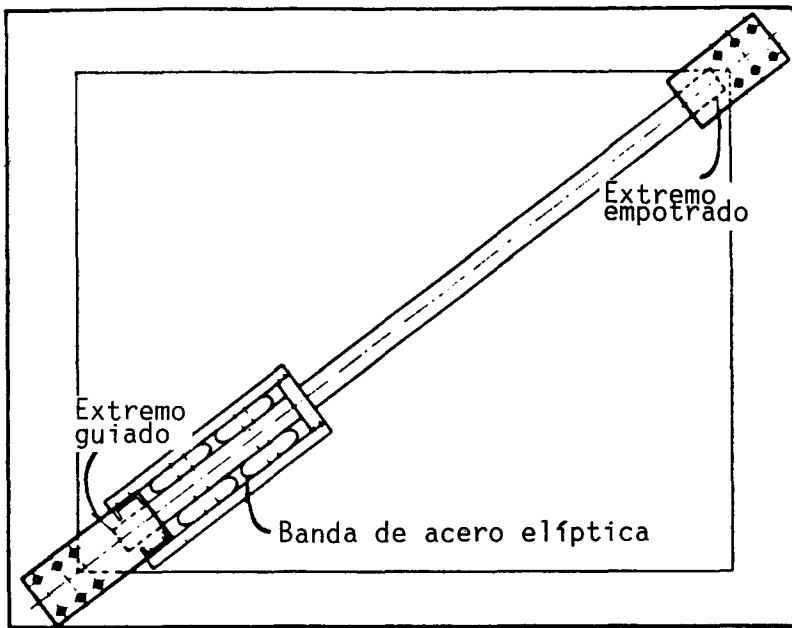


- Valores calculados con SUPER E-TABS
- X Medidas de vibración ambiental
- ω_c Frecuencia calculada
- ω_a Frecuencia medida por vibración ambiental

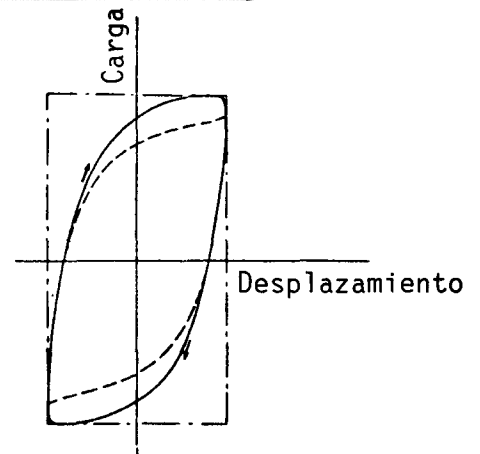
Fig. II Formas de los modos obtenidos de mediciones de aceleración en un edificio sobre lava, en Ciudad Universitaria



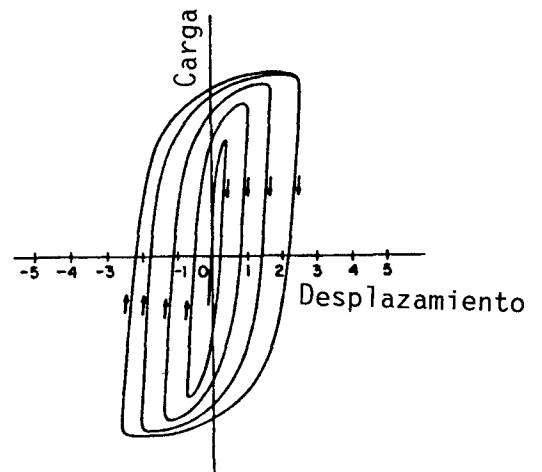
a) Dispositivo de prueba



b) Diagonal con dispositivo amortiguador



c) Ciclo de histeresis



d) Evolución de un ciclo de histeresis

Fig. 12 Dispositivo de amortiguamiento desarrollado en el Instituto de Ingeniería (U.N.A.M.), para reducir los desplazamientos de un edificio sujeto un sismo intenso.

Una vez que el modelo del edificio reproduce, por lo menos, las propiedades dinámicas de los modos fundamentales, es posible llevar a cabo un análisis numérico simulando diferentes perturbaciones generadas por sismos conocidos y comparar la respuesta con los requisitos reglamentarios. Estos análisis pueden inducir modificaciones del modelo, buscando un comportamiento estructural de un modelo mejorado que satisfaga las limitaciones del Código.

Los modelos tridimensionales han sido sumamente útiles para la evaluación de los edificios. La estimación cuidadosa de la respuesta inelástica puede completar la evaluación estructural.

Los modelos tridimensionales también permiten la introducción de sistemas de amortiguamiento en los análisis de respuesta. En la figura 13 se muestran los resultados obtenidos en un edificio de 21 pisos con y sin dispositivos de amortiguamiento, del tipo mostrado en la figura 12.

Se pueden obtener una reducción de los desplazamientos hasta 29 por ciento, con una distribución óptima de amortiguadores en el marco estudiado.

EVALUACION GLOBAL DE UN EDIFICIO

Una vez que el ingeniero estructural conoce la información obtenida a partir de la medición experimental de las propiedades de un edificio, procede a evaluar su comportamiento estructural.

A este propósito, la ayuda de un reglamento de construcciones bien detallado es útil, y ayuda a generar una imagen completa del comportamiento y de las medidas correctivas que se pueden realizar para mejorar la estabilidad del edificio.

El ingeniero estructural tiene que generar diferentes alternativas de modificación, en las que se analice las posibles mejoras para soportar futuros sismos.

Deben evaluarse las propiedades dinámicas del subsuelo, el tipo de cimentación y el comportamiento estructural ante movimientos futuros.

En esta evaluación de conjunto la distribución de los daños debe considerarse cuidadosamente para obtener una comprensión clara de sus causas, que pueden relacionarse con las siguientes fuentes de riesgo:

- a) Riesgo geofísico en el sitio del edificio.
- b) Riesgo en los análisis estructurales y en el diseño.

- c) Riesgo aceptado por los constructores del edificio.
- d) Cambios en el uso del edificio.
- e) Deterioro causado por el envejecimiento de los materiales.

Una vez que se ha establecido un juicio sano, desde el punto de vista de la seguridad estructural, es posible considerar las variables económicas y el costo de la rehabilitación del edificio.

REFUERZO O DEMOLICION, UN DILEMA CRUCIAL

Durante los últimos tres años ha sido necesario realizar la evaluación estructural de muchos edificios una vez que la información necesaria fue recolectada; muchas veces surgió la duda de elegir entre diferentes alternativas: utilizar refuerzo con marcos de acero estructural, la demolición parcial o la demolición completa de edificios muy dañados.

Sismos intensos, como el de septiembre de 1985, probaron la calidad de los edificios. Los que lo soportaron sin daños, cuando se revisaron con las normas del nuevo Código, mostraron en general desplazamientos grandes comparados con los que el mismo Código exige. Por ello tuvieron que considerarse medidas de corrección, tales como dispositivos de amortiguamiento, demoliciones parciales o refuerzo.

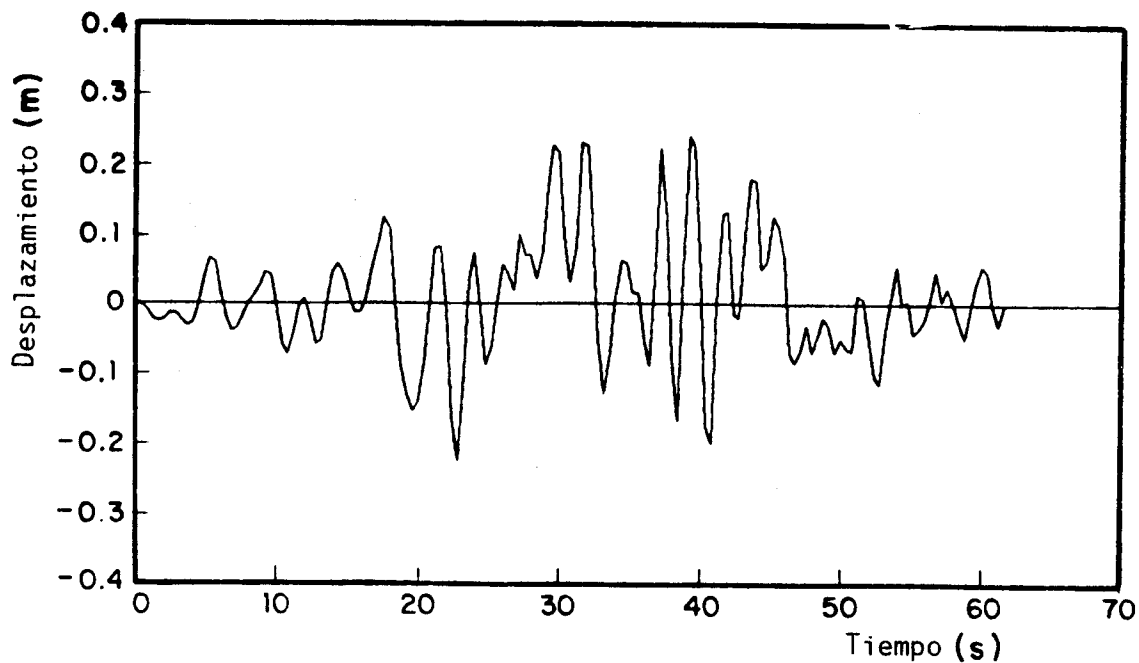
La información obtenida del espectro del sismo de 1985 dio una clave interesante para el análisis.

En la figura 14, se muestra el espectro de respuesta de un edificio localizado en la zona de lago de la ciudad.

Tres zonas están bien definidas, la zona con un periodo de vibración menor que 1.6 segundos, con baja aceleración; una zona central de resonancia situada entre 1.6 y 3.4 segundos, en que una aceleración máxima implica grandes desplazamientos de la estructura y la tercera más allá de los 3.4 segundos, en que las aceleraciones decrecen rápidamente.

Conociendo estas formas de respuesta, es posible mantener al edificio bajo estudio fuera de la zona de resonancia con objeto de evitar grandes desplazamientos. Por lo tanto el refuerzo estructural para incrementar la rigidez, así como la demolición parcial para disminuir el periodo fundamental de vibración fuera de la zona de resonancia, parece ser medidas posibles en las estructuras con un número pequeño de zonas dañadas: cuando el daño esta ampliamente distribuido la demolición completa parece ser la única solución posible.

MODELO CON AMORTIGUADORES
Comportamiento inelástico



MODELO SIN AMORTIGUADORES
Comportamiento elástico

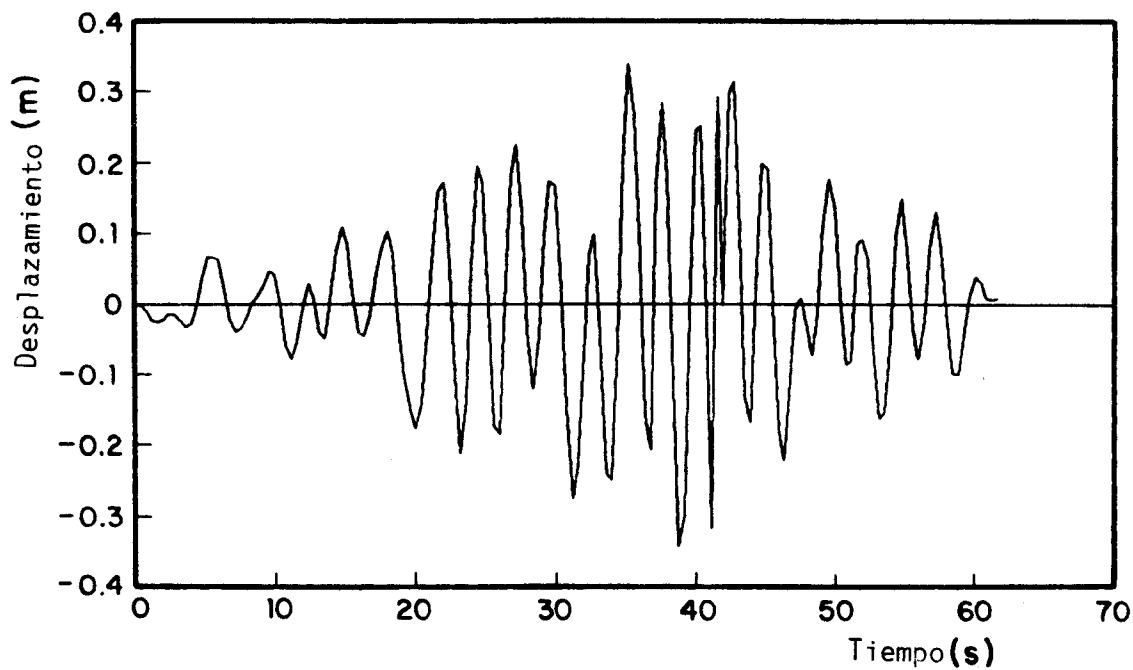


Fig 13 Simulación numérica de desplazamientos en la parte superior de un marco de 21 pisos, con y sin amortiguadores distribuidos en el marco.

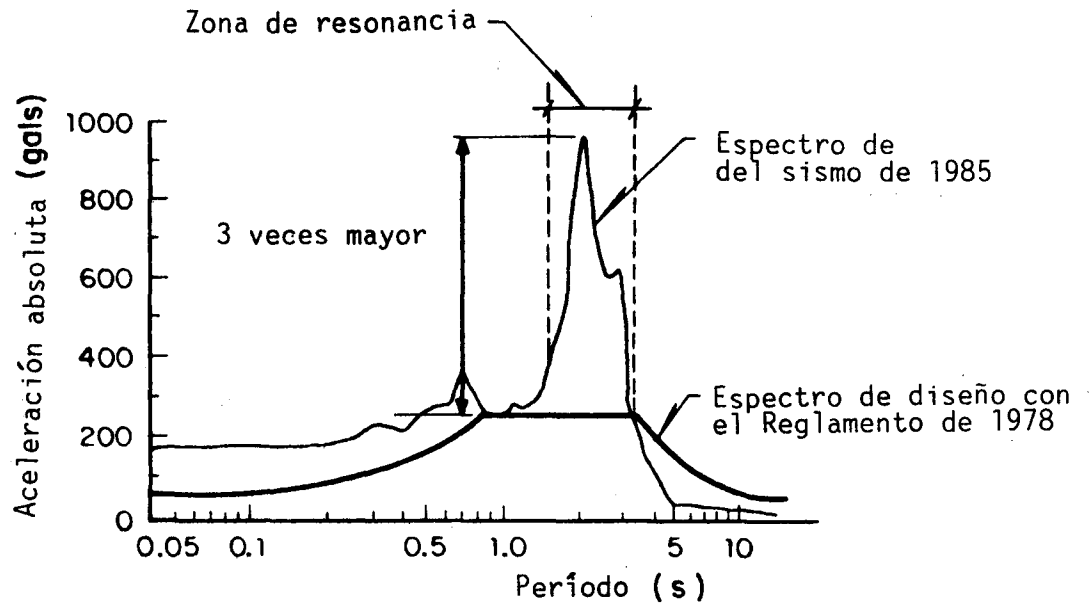


Fig. 14 Comparación entre el espectro de respuesta y el de diseño para la zona de suelo blando en la Ciudad de México

En los edificios en que la demolición parcial es posible, se debe tener cuidado de mantener los desplazamientos bajo los límites impuestos y mejorar el confinamiento lateral del refuerzo vertical en columnas, cuando éste fue la causa de los daños.

El uso de muros de cortante ayuda a lograr un cambio en las propiedades dinámicas, pero los problemas de cimentación bajo ellos impiden su uso indiscriminado.

Cuando se contempla el incremento de la rigidez de las estructuras, el uso de refuerzo de columnas mediante cuatro ángulos en sus esquinas y soleras para el confinamiento del concreto ha sido una solución utilizada con frecuencia.

COMENTARIOS FINALES

El daño estructural en los edificios se puede detectar con las técnicas descritas en este artículo. Su uso en varias construcciones de la ciudad de México permitió un entendimiento claro acerca de su comportamiento estructural e hizo posible el uso de diversas medidas de remedios para mejorarlo.

Las técnicas auxiliares mencionadas deben evaluarse cuidadosamente en cada caso con objeto de discriminar su aplicación.

La información obtenida ha incrementado el conocimiento del comportamiento estructural de los edificios desplantados sobre arcilla blanda: su uso futuro sobre el control de los parámetros dinámicos y su evolución con el tiempo, incrementarán el conocimiento del comportamiento de los edificios de concreto.

RECONOCIMIENTOS

El autor desea agradecer a las autoridades del Instituto de Ingeniería de la UNAM, el apoyo dado a diversos proyectos de investigación que condujeron a un mejor entendimiento del comportamiento estructural de los edificios de concreto de la ciudad de México.

Se agradece asimismo la colaboración de los propietarios de los edificios mencionados en este artículo.

El trabajo numérico realizado para el modelo matemático fue realizado por Ricardo González A., miembro del Instituto de Ingeniería de la UNAM.

REFERENCIAS

1. Bertero, V. "Observations on structural pounding". Proc. Int. Conf. on "The Mexico Earthquakes 1985. Factors involved and lessons learned". ASCE. New York, 1987 pp 264-278.
2. Rodríguez Cuevas, N.: "Análisis experimental de vibraciones en edificios", V Congreso Nacional de Ingeniería Estructural, Ver. México, mayo 1986. pp 88-01-88-11.
3. Luco, JE.: "Soil structure interaction effects on forced vibration test". Report 86-03, University of Southern California. Los Angeles, CA. sep. 1986.
4. Honda, K.: Measurement and evaluation of high-rise building response to ground motion generated by underground nuclear explosions". Proc. ASCE/EMD specialty conference. University of California, Los Angeles, March 1976, pp 200-209.
5. Balan, S; Cristescu, V and Cornea I: "Cutremural de pumint din Romania de la 4 martie 1977". Editura Academiei, Bucaresti 1982, pp 441-453.
6. Tomsett, HN: "The practical use of ultrasonic pulse velocity measurements, in the assessment of concrete quality". Magazine of Concrete Research. Vol. 32, No. 110, Mar. 1980.