

INSTRUMENTACIÓN SÍSMICA DE LA CATEDRAL METROPOLITANA. RESULTADOS 1997-2000

*Roberto Meli, Darío Rivera, A. Roberto Sánchez ⁽¹⁾
Eduardo Miranda ⁽²⁾*

RESUMEN

Para apoyar las decisiones sobre el proyecto de rehabilitación de la Catedral de la ciudad de México se instaló una red de acelerógrafos que ha venido funcionando desde 1997. Se presenta en este trabajo una descripción de la red y los resultados que se han obtenido en sus primeros tres años de operación, en los que ha registrado 16 eventos sísmicos. Se describen las técnicas empleadas para el análisis de las señales y la interpretación de resultados, así como las conclusiones que de ellos se derivan acerca del comportamiento sísmico del edificio. El movimiento inducido en la base de la estructura tiene amplitudes mucho menores que el registrado en campo libre, para el intervalo de períodos que son críticos para su respuesta sísmica. El movimiento en distintos puntos de la cimentación presenta amplitudes semejantes pero diferencias de fases, y la estructura tiene una muy moderada amplificación del movimiento de su base. Diversas partes de la estructura tienden a vibrar de manera independiente del conjunto, especialmente la fachada principal y las torres. En términos generales, los resultados indican que en sus condiciones actuales el monumento tiene una seguridad aceptable ante los fenómenos sísmicos que pueden esperarse

ABSTRACT

Within the studies performed to support the rehabilitation program of the Mexico City Cathedral, a strong motion instrumentation network was installed in 1997. A description of the network and the analysis of results obtained in the first three years of its operation are presented in this paper. The techniques used for the analysis of the accelerograms and for their interpretation in terms of the seismic response of the building are discussed, for the 16 events recorded within this period. The motion induced through the foundation has significantly lower amplitudes than the one recorded in the free-field nearby, for the range of periods that is critical for the dynamic response of the building. The motion at the foundation level is out of phase at different points, and the structure has only a moderate amplification of the motion induced at its basis. Several parts of the building vibrate independently from the main structure, particularly the main façade and the bell towers. In general terms, results show that in its present state the building has an acceptable level of seismic safety.

Artículo recibido el 9 de febrero del 2001 y aprobado para su publicación el 19 de julio de 2001. Se aceptarán comentarios y/o discusiones hasta cinco meses después de su publicación.

(1) Instituto de ingeniería, UNAM, rmep@pumas.iingen.unam.mx, driv@pumas.iingen.unam.mx,
rsa@coatepec.uaemex.mx.

(2) Dept. of Civil and Env. Eng., Stanford University, miranda@cive.stanford.edu

ANTECEDENTES Y ALCANCE

La respuesta sísmica de los monumentos históricos presenta diferencias sustanciales respecto a la de los edificios modernos comunes. Estas diferencias se derivan de las distintas formas arquitectónicas y estructurales de los edificios, y también del hecho que los materiales estructurales de los edificios antiguos no tienen capacidad para resistir esfuerzos de tensión significativos, lo que conduce a que no se pueda lograr continuidad entre los elementos, y da lugar a que se tengan mecanismos muy peculiares para absorber los efectos sísmicos. En el caso de la ciudad de México, adicionalmente, la interacción de estructuras extraordinariamente rígidas y masivas, como las de los edificios históricos, con un suelo sumamente blando y deformable como la arcilla sobre los que están desplantados, modifica sustancialmente las vibraciones inducidas por un sismo, mientras que para la mayor parte de los edificios modernos este efecto es de importancia mucho menor. Todo lo anterior hace que los innumerables estudios y mediciones realizados sobre el comportamiento sísmico de edificios en la ciudad de México sean de limitada utilidad para los edificios históricos; lo mismo puede decirse para los métodos y normas de diseño sísmico desarrollados para los edificios modernos.

Aunque los edificios históricos de la ciudad de México han tenido ante los sismos que han afectado a esta ciudad, un comportamiento en términos generales mejor que el de los edificios modernos, los primeros no dejan de presentar debilidades en cuanto a su seguridad sísmica, ya que los daños acumulados por sismos anteriores van afectando la estructura, lo mismo que los hundimientos diferenciales que propician la pérdida de verticalidad y severos agrietamientos de los elementos estructurales, así como el deterioro del material a lo largo del tiempo. En particular, la Catedral Metropolitana de la ciudad de México ha sobrevivido exitosamente a los fuertes sismos que han ocurrido desde su construcción; sin embargo, presenta algunas características que hacen dudar de su seguridad ante sismos futuros; por ejemplo, hay evidencias de agrietamientos en la cubierta ocurridos después de los sismos de 1985 y, por otra parte, las columnas de la nave principal y, sobre todo, las cuatro columnas centrales que sostienen la gran cúpula muestran grandes desplomes que implican que las cargas verticales actúan con fuertes excentricidades, las que se pueden incrementar por los desplazamientos debidos a los sismos.



Fig. 1. Catedral metropolitana de la ciudad de México

La Catedral está siendo objeto de un proceso de rehabilitación para mejorar su seguridad ante distintas acciones, en particular los hundimientos del suelo y los sismos. Una descripción completa de la situación de este monumento y de su programa de rehabilitación puede encontrarse en Tamez *et al.*, 2001. La problemática estructural se trata en Meli y Sánchez Ramírez, 2001. El programa de rehabilitación es apoyado por numerosos estudios estructurales y geotécnicos y por un monitoreo muy extenso y cuidadoso de su comportamiento. Como parte del programa de apoyo técnico que el Instituto de Ingeniería ha brindado al proyecto desde sus inicios, se decidió instalar en 1996 una red de instrumentación sísmica. El estudio se realizó en conjunto con el Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED), que proporcionó los instrumentos y los instaló y operó durante los tres primeros años. El presente informe contiene los resultados relativos a los registros obtenidos de 1997 a 1999; éstos han sido ya presentados en forma parcial en dos trabajos anteriores (Durán et al. 1998, Rivera et al. 1999).

La instrumentación sísmica de edificios ha llegado a establecerse en las últimas décadas como una de las formas más efectivas para validar los procedimientos de diseño y para evaluar la seguridad sísmica de construcciones con características peculiares. Existen muchos cientos de edificios instrumentados en distintas partes del mundo, y una docena de ellos en México; sin embargo, muy escasa es la información disponible sobre edificios históricos, tanto en campo internacional como en nuestro país. Los resultados de la red de la Catedral de México sirven de apoyo no sólo para la evaluación de este importante templo, sino también para entender mejor la situación de las muchas construcciones similares.

Un propósito adicional de la red fue comprobar las hipótesis y los resultados de los diversos cálculos realizados sobre modelos analíticos tanto simplificados como refinados de la estructura, en particular de los correspondientes a los modelos de elementos finitos (Sánchez R. *et al.* 1998). Principalmente, se pretendió aclarar los siguientes puntos:

- Las características del movimiento del suelo en el sitio, para determinar las amplificaciones de las ondas y sus frecuencias dominantes, así como la modificación de las mismas por la presencia del edificio.
- Las posibles diferencias en el movimiento inducido en distintas partes de la base del edificio, debidas a la fuerte heterogeneidad en las condiciones de consolidación del subsuelo.
- La forma de vibrar de la estructura y las posibles discontinuidades que ésta presenta debido a su falta de monolitismo y a los efectos del agrietamiento que ha sufrido a lo largo de los siglos.
- La respuesta de partes del templo que tienen características especiales, como la cúpula central, las torres y las fachadas.

INSTRUMENTACIÓN Y REGISTROS OBTENIDOS

Descripción de la red

La red está compuesta de instrumentos que miden, en tres direcciones ortogonales, la aceleración del movimiento del punto sobre el que están colocados. Se emplearon acelerógrafos de alta resolución, modelo K2, fabricados por Kinometrics. Los registros se graban en una memoria de estado sólido y se recuperan a través de un puerto serial utilizando una computadora portátil. Una descripción detallada de la instrumentación se encuentra en Ortega *et al.*, 1998.

Cada instrumento cuenta con un sensor que se compone de tres acelerómetros de fuerza balanceada que convierten la aceleración del suelo en una señal de voltaje, que más tarde es transformada a palabras digitales mediante un convertidor analógico-digital. Únicamente se graban en la memoria cuando la aceleración rebasa un umbral determinado, momento en que se activa, o dispara, el registro del instrumento que graba lo ocurrido durante un tiempo previo y posterior a dicho disparo. Se conectaron los acelerógrafos para operar con un disparo común y una señal de tiempo común. Uno de los instrumentos opera como maestro y activa al resto de los equipos; de esta manera se obtienen registros en sincronía. A su vez, el maestro cuenta con un sistema GPS que sirve como referencia de tiempo para todos los equipos de la red.

Por diversas razones, el arreglo de los instrumentos se modificó en varias ocasiones; así la instrumentación sísmica de la Catedral puede describirse en las siguientes cuatro etapas.

La primera etapa cubrió los sismos de enero a julio de 1997. Para entender el movimiento del suelo, sin la interferencia por la presencia de la Catedral, se colocó un instrumento sobre el terreno a un costado de la entrada oeste de la Catedral; para estudiar el movimiento de la cimentación en el nivel del sótano y las posibles diferencias en distintas zonas, se colocaron tres equipos en el área de criptas: en los lados sur y norte, y al centro; para comprender el movimiento de la cubierta, se instalaron tres instrumentos en la azotea, al costado sur, en la base del tambor de la cúpula central y en el lado norte, así como un instrumento en el costado oeste de la azotea en el mismo nivel de las cúpulas. La Fig. 2 muestra la ubicación de los instrumentos.

Para la segunda etapa que abarcó de diciembre de 1997 a mayo de 1998, se movieron los registradores del norte y sur del nivel de criptas, y se instalaron en la parte alta y en la base del campanario de la torre sur-poniente; esto se realizó una vez que el movimiento relativo de la cimentación había quedado claro, y con el fin de estudiar la respuesta de una parte importante del templo que no había sido cubierta en la primera etapa.

En la tercera etapa, que abarcó de junio a diciembre de 1999, se quitaron cinco registradores de esta red, por haber sido requeridos para la instrumentación de otros edificios. Por ello, sólo quedaron tres aparatos, en azotea centro, torre baja y torre alta.

A principios del 2000 se retiraron los instrumentos del CENAPRED y se instaló una nueva red con cinco instrumentos del Instituto de Ingeniería, destinados específicamente al proyecto. Los instrumentos se colocaron en campo libre, sótano centro, azotea centro, torre baja y torre alta.

Esta nueva red todavía no ha proporcionado registros significativos, por lo que no se considera en este informe.

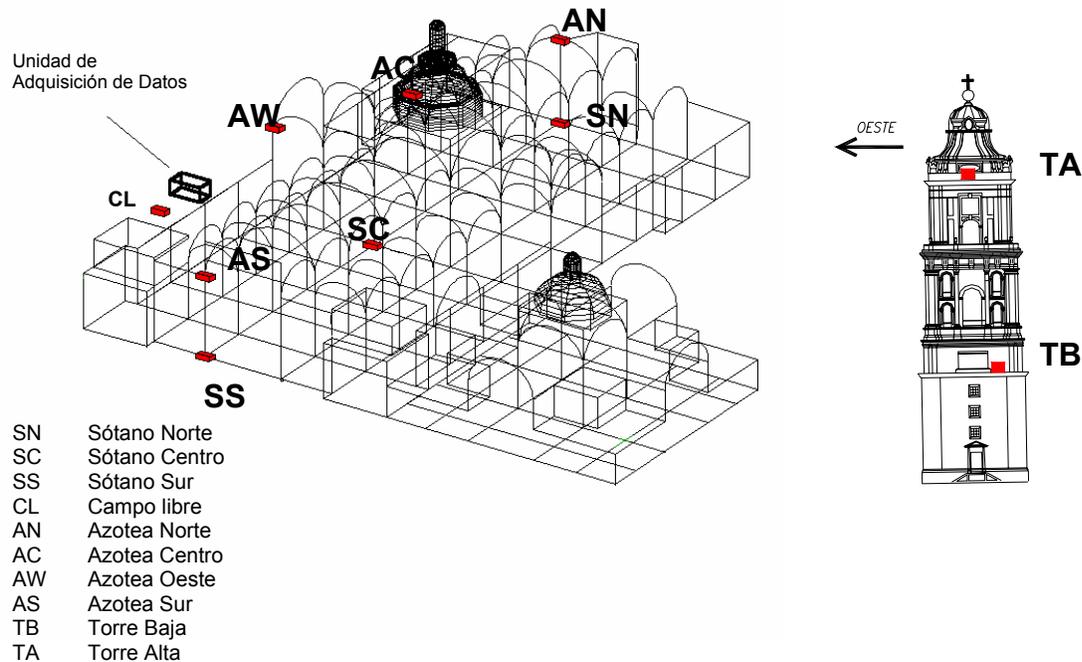


Fig. 2. Red de instrumentación sísmica de la Catedral metropolitana

En todas las etapas de la instrumentación sísmica de la Catedral, se seleccionó como maestro al instrumento de la base de la cúpula mayor (Azotea centro, AC), el cual transmite la señal de disparo al resto de los acelerógrafos de la red. Además del disparo externo, cada uno de los equipos tiene la posibilidad de activarse por sí mismo al detectar un movimiento local superior al umbral de disparo. Se seleccionó inicialmente un umbral de disparo de 2 gal para el maestro y 4 gal para el resto de los equipos; más tarde se modificaron los umbrales a 1 y 2 gal, respectivamente. Para la parte alta de la torre el umbral es de 4 gal, debido a que ésta presenta amplificaciones considerables.

Registros obtenidos

De enero de 1997 a diciembre de 1999 la red acelerográfica registró 16 sismos. En la tabla 1 se presentan las características de estos sismos: fecha y hora del epicentro con respecto al meridiano de Greenwich (GMT), magnitud M_c , profundidad, coordenadas y epicentro. Las aceleraciones máximas registradas en los instrumentos colocados en distintas partes del monumento se presentan en la tabla 2. Los temblores más significativos se comentan a continuación.

Tabla 1. Sismos registrados por la red acelerográfica de la Catedral, 1997-1999.

Fecha	GMT	Magnitud M_c	Profundidad (km)	Lat. N.	Long. W	Epicentro
Enero 11, 1997	14 :28 :29.1	7.3	17	18.09	102.86	Costas de Michoacán
Enero 21, 1997	15 :19 :58.2	5.6	5	16.24	98.29	Costa de Guerrero-Oaxaca
Abril 3, 1997	15 :22 :31.6	4.7	49	17.98	98.38	Límite entre Gro.- Oax.
Mayo 8, 1997	10 :58 :30.1	5.1	14	17.26	100.38	Costa de Guerrero
Mayo 22, 1997	02 :50 :55.4	5.9	61	18.43	101.79	Río Balsas inferior
Julio 19, 1997	09 :22 :10	6.3	10	16.22	98.31	Costa Guerrero-Oaxaca
Dic. 16, 1997	05 :48 :32	5.9	10	15.86	99.16	Costa de Guerrero
Dic. 21, 1997	23 :22 :00	5.6	10	17.25	100.9	Costa de Guerrero
Feb. 02, 1998	21 :02 :01	6.4	23	15.74	96.44	Costa de Oaxaca
Marzo 4, 1998	22 :12 :52	5.4	13	16.01	98.42	Costa Guerrero-Oaxaca
Abril 20, 1998	17 :59 :18	5.4	32	18.34	101.20	Río Balsasinferior
Mayo 9, 1998	12 :03 :13	5.2	24	17.37	101.41	Costa de Guerrero
Mayo 16, 1998	12 :41 :55	5.2	15	17.21	101.40	Costa de Guerrero
Junio 15, 1999	20 :42 :05	6.7	92	18.20	97.47	Al sur de Tehuacán Puebla
Junio 21, 1999	17 :43 :05	5.8	42	18.09	101.78	Río Balsas inferior
Sep. 30, 1999	16 :31 :11	7.4	5	17.04	100.23	Costa de Guerrero

Fuente : Servicio Sismológico Nacional

El temblor de mayor magnitud registrado en las primeras etapas cuando la red estaba completa, fue el del 11 de enero de 1997, con magnitud $M_c=7.3$ y epicentro en las costas de Michoacán. Durante este sismo se obtuvieron las aceleraciones mayores, a excepción del evento del 15 de junio de 1999. De todos los equipos de la red, el instrumento situado en el lado oeste de la azotea presentó la mayor aceleración, alcanzando 18.09 gal con una duración total del registro de 170 s.

El sismo del 15 de junio de 1999 produjo las mayores intensidades en el sitio; tuvo magnitud $M_c=6.7$ y su epicentro se localizó aproximadamente a 30 km del sur de Tehuacán, Puebla. Lamentablemente, no se pudo obtener un conjunto amplio de registros durante este evento, ya que en esas fechas solo se tenían instalados tres instrumentos, el de campo libre, el de azotea centro y el de torre baja; azotea centro y torre baja presentaron aceleraciones superiores a los 25 gal en las direcciones N-S y E-W, mientras que en el componente vertical las aceleraciones fueron superiores a 8 gal.

Un temblor importante en el que se obtuvo un conjunto completo de mediciones fue el registrado el 22 de mayo de 1997, con $M_c=5.9$ y epicentro localizado en el río Balsas, en el límite entre Michoacán y Guerrero. Durante este sismo la máxima aceleración alcanzó 6.50 gal en el instrumento del lado oeste de la cúpula central y los registros tuvieron una duración de 214 s, aproximadamente.

Los primeros registros obtenidos en la torre fueron con el temblor del 4 de marzo de 1998, $M_c=5.4$. En este sitio las mayores aceleraciones se registraron en el sismo ocurrido el 21 de junio de 1999, $M_c=5.8$; de los dos aparatos colocados en esta estructura, el de la parte alta registró la mayor aceleración con 19.82 gal en la dirección N-S y 18.92 gal en la dirección E-W; sin embargo, este sismo no contó con instrumento alguno en la base de la estructura, por lo que no se obtuvo información

Tabla 2. Máximas aceleraciones registradas en los instrumentos (aceleraciones en gal).

Evento	Magnitud (Mc)	Componente	AC	AN	AS	AO	SC	SN	SS	CL	TB	TA
11-Ene-97	7.3	N-S	14.99	14.31	17.48	13.46	12.64	12.40	12.69	14.84	-	-
		V	4.74	-3.72	-4.37	4.89	-3.81	-3.54	-4.08	-5.75	-	-
		E-W	15.89	13.65	15.43	18.09	12.47	12.15	12.54	-14.21	-	-
21-Ene-97	5.6	N-S	1.84	1.68	2.46	1.37	1.02	1.03	1.12	1.33	-	-
		V	-0.75	0.60	-0.90	-0.74	-0.55	0.64	-0.86	-0.99	-	-
		E-W	-2.13	-1.37	-1.99	-2.55	-1.05	-0.97	1.08	-1.27	-	-
4-Abr-97	4.7	N-S	-0.79	-1.85	-1.19	1.20	-0.58	-0.58	-0.62	-0.66	-	-
		V	3.92	-1.63	-0.79	-1.13	0.61	-0.95	-0.54	0.87	-	-
		E-W	0.88	1.11	0.99	-3.83	0.55	0.51	0.54	0.72	-	-
8-May-97	5.1	N-S	-1.08	-1.02	-1.64	0.98	0.67	0.62	0.68	0.99	-	-
		V	1.19	0.76	0.53	0.62	0.53	0.62	0.44	1.15	-	-
		E-W	1.50	-1.05	1.00	2.17	-0.67	0.74	0.68	0.93	-	-
22-May-97	5.9	N-S	-3.67	3.45	-6.02	3.56	-2.78	-2.71	-2.76	3.86	-	-
		V	2.73	2.23	2.05	1.81	1.86	1.92	1.91	2.09	-	-
		E-W	-5.41	4.57	4.90	6.50	3.69	-3.72	3.90	4.12	-	-
19-Jul-97	6.3	N-S	-2.09	-2.05	-2.37	-1.99	-1.88	-1.89	-1.91	-2.01	-	-
		V	0.64	0.52	0.65	0.72	0.56	-0.56	0.59	-1.91	-	-
		E-W	-1.88	-1.68	-1.88	-2.03	-1.40	-1.54	1.40	1.86	-	-
16-Dic-97	5.9	N-S	-1.54	1.44	-1.94	-1.51	1.21	1.16	-	-1.48	-2.39	-
		V	0.79	-0.75	0.91	0.73	-0.68	0.74	-	-1.11	1.17	-
		E-W	1.56	1.67	-1.44	1.67	1.12	1.42	-	-1.35	-1.95	-
21-Dic-97	5.6	N-S	2.03	1.97	-2.31	1.94	1.54	1.57	-	1.91	1.84	-
		V	1.06	-0.93	-0.64	-0.88	-0.77	-0.65	-	1.28	-0.77	-
		E-W	2.06	1.43	1.54	2.69	1.17	1.16	-	1.23	2.04	-
3-Feb-98	6.4	N-S	2.78	2.54	3.03	-2.33	-1.99	-1.97	-	2.51	-2.56	-
		V	0.94	-0.96	-0.99	0.89	-0.89	-1.04	-	1.59	1.20	-
		E-W	2.52	-2.28	-2.54	3.02	-1.84	-2.05	-	-2.21	-3.16	-
4-Mar-98	5.4	N-S	0.86	0.93	-1.14	0.85	-	-	-	0.87	1.20	3.61
		V	0.38	0.42	0.36	0.34	-	-	-	0.56	0.52	0.37
		E-W	1.16	0.71	1.08	-1.40	-	-	-	0.83	1.44	5.21
20-Abr-98	5.4	N-S	2.87	2.57	4.09	2.59	1.77	-	-	2.87	-3.71	14.26
		V	-2.47	-1.68	-1.56	-1.54	-1.48	-	-	2.04	-1.63	-1.95
		E-W	3.10	2.32	3.70	3.45	1.48	-	-	1.68	4.61	-16.23
9-May-98	5.2	N-S	-0.99	-0.84	1.52	-0.82	-0.47	-	-	-0.73	0.99	4.01
		V	0.77	0.50	-0.49	-0.57	0.46	-	-	0.81	-0.57	-0.62
		E-W	1.11	0.76	-1.19	1.59	-0.48	-	-	-1.00	-1.06	2.84
16-May-98	5.2	N-S	1.18	1.09	1.87	1.03	-0.71	-	-	0.94	1.23	4.33
		V	0.60	-0.44	0.54	0.49	0.37	-	-	0.60	0.53	0.63
		E-W	-1.14	-0.95	-1.04	1.51	-0.77	-	-	0.77	-1.24	-4.22
15-Jun-99	6.7	N-S	26.06	-	-	-	-	-	-	-	25.30	-
		V	15.61	-	-	-	-	-	-	-	-8.15	-
		E-W	30.20	-	-	-	-	-	-	-	-25.84	-
21-Jun-99	5.8	N-S	-4.86	-	-	-	-	-	-	-	-4.63	19.82
		V	2.24	-	-	-	-	-	-	-	1.84	-1.87
		E-W	6.99	-	-	-	-	-	-	-	-5.53	18.92
30-Sep-99	7.4	N-S	-18.45	-	-	-	-1391	-	-	-	-18.94	43.27
		V	-7.76	-	-	-	6.70	-	-	-	6.10	-6.70
		E-W	-24.16	-	-	-	-12.25	-	-	-	-17.05	49.24

suficiente para ser contemplado en los análisis de los registros. El sismo ocurrido el 20 de abril de 1998, $M_c=5.4$, contó con aparatos en la base del inmueble y permitió registrar aceleraciones importantes en la parte alta de la torre (14.26 gal en la dirección N-S y 16.23 en la dirección E-W); por consiguiente fue uno de los sismos importantes para el estudio de la torre sur-poniente.

El examen de la tabla 2 indica que ninguno de los sismos registrados indujo en la Catedral aceleraciones extraordinarias. Como referencia, basta notar que el sismo del 11 de enero de 1997 produjo aceleraciones de casi seis veces menores que el sismo del 19 de septiembre de 1985. en la estación ubicada en el Instituto de Ingeniería de Ciudad Universitaria, donde se registraron los dos eventos, De ello se desprende que la Catedral ha soportado en el pasado sismos mucho más intensos que los aquí registrados y que los resultados obtenidos sólo pueden considerarse representativos de la respuesta ante sismos moderados.

Procesamiento de los registros

Los registros se procesan para sincronizarlos con una señal común de tiempo y para determinar el eje de aceleración cero; para ello, se realiza en el registro de aceleraciones la corrección de línea base, que consiste en obtener el promedio de los valores de todos los puntos del registro, el cual después se resta a cada punto del registro. Posteriormente, se aplica un filtrado para eliminar impurezas en la señal debidas al ruido del medio ambiente, entre otros factores. Una vez hecha la sincronización, la corrección de línea base y el filtrado, se obtienen los acelerogramas definitivos. Los acelerogramas correspondientes a los dos eventos sísmicos más representativos de la primera etapa se muestran en las Figs. 3 a 6.

Para el estudio e interpretación detallados de los registros, se procede al análisis de las señales en el dominio del tiempo y de la frecuencia, lo que consiste principalmente en la obtención de espectros de amplitudes de Fourier y de espectros de respuesta, así como de funciones de transferencia y de correlación; además se hace la doble integración de los acelerogramas para obtener desplazamientos absolutos. Para el procesamiento y análisis de las señales de los registros sísmicos seleccionados se empleó el programa DEGTRA 95 para Windows, desarrollado por Ordaz y Montoya. Para una presentación más detallada de los resultado y de los análisis de los registros, véase Rivera, 2000.

INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS

Movimiento del terreno en el sitio

El movimiento del terreno en el sitio se estudia con los registros obtenidos en el instrumento de campo libre (CL); la forma más común de determinar las características de este movimiento, para propósitos de ingeniería, es obteniendo espectros de respuesta de las aceleraciones.

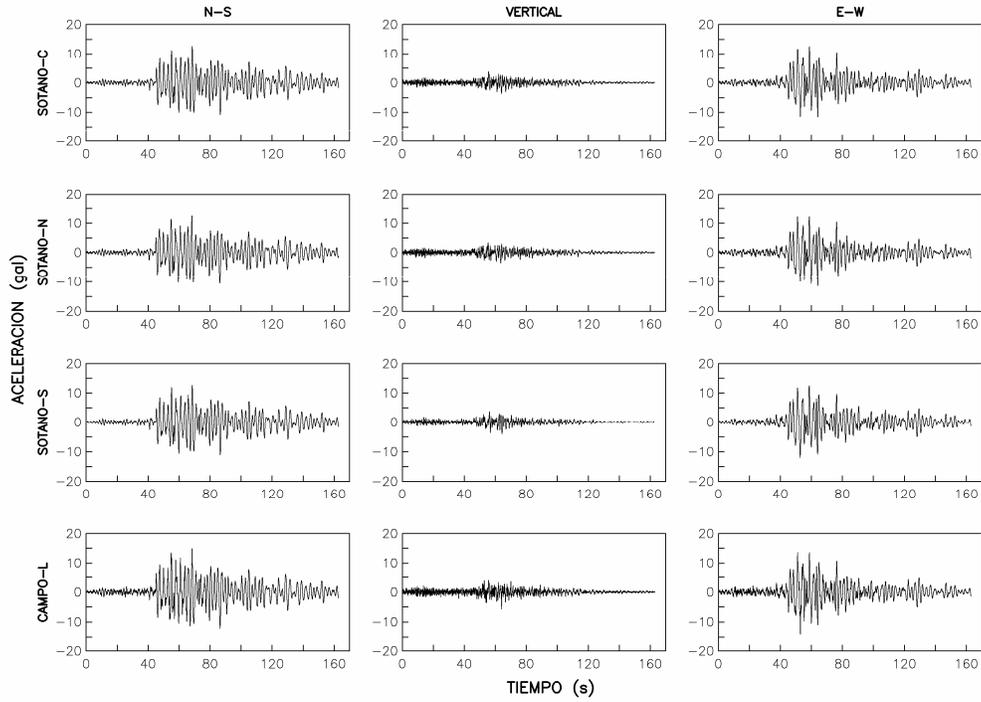


Fig. 3. Acelerogramas registrados en los sótanos y campo libre, durante el sismo del 11 de enero de 1997.

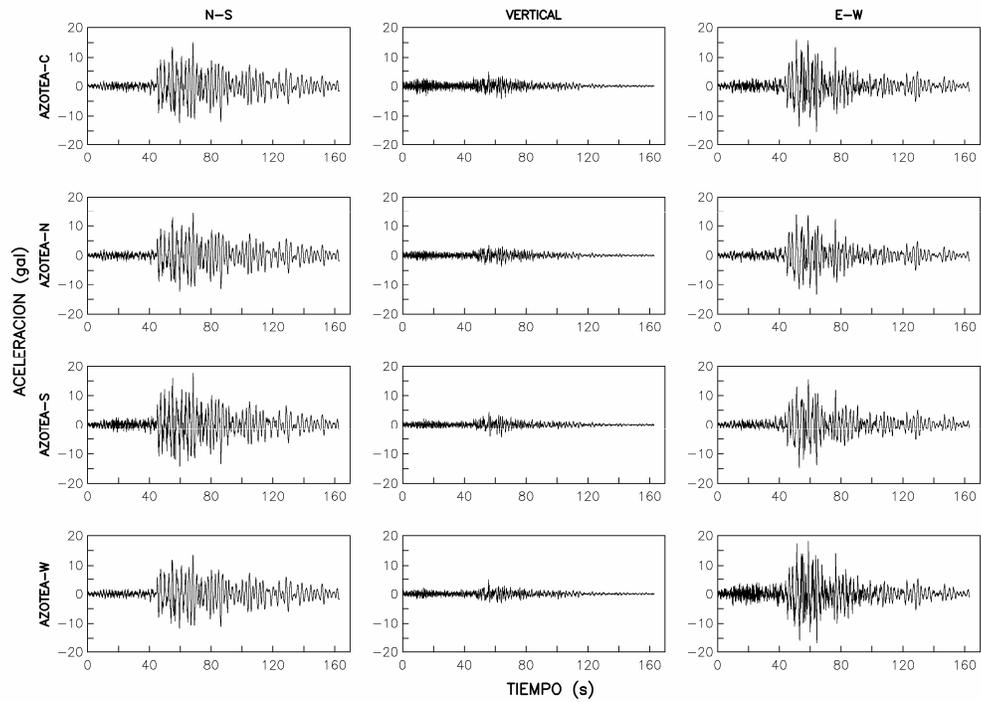


Fig. 4. Acelerogramas registrados en los cuatro puntos de la azotea, durante el sismo del 11 de enero de 1997.

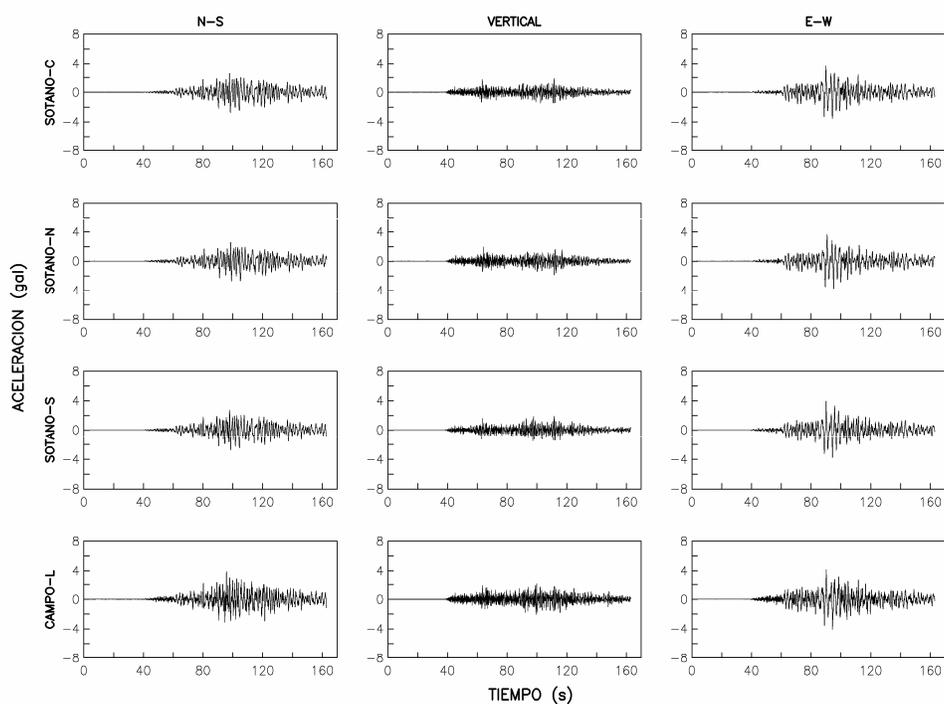


Fig. 5. Acelerogramas registrados en los sótanos y campo libre, durante el sismo del 22 de mayo de 1997.

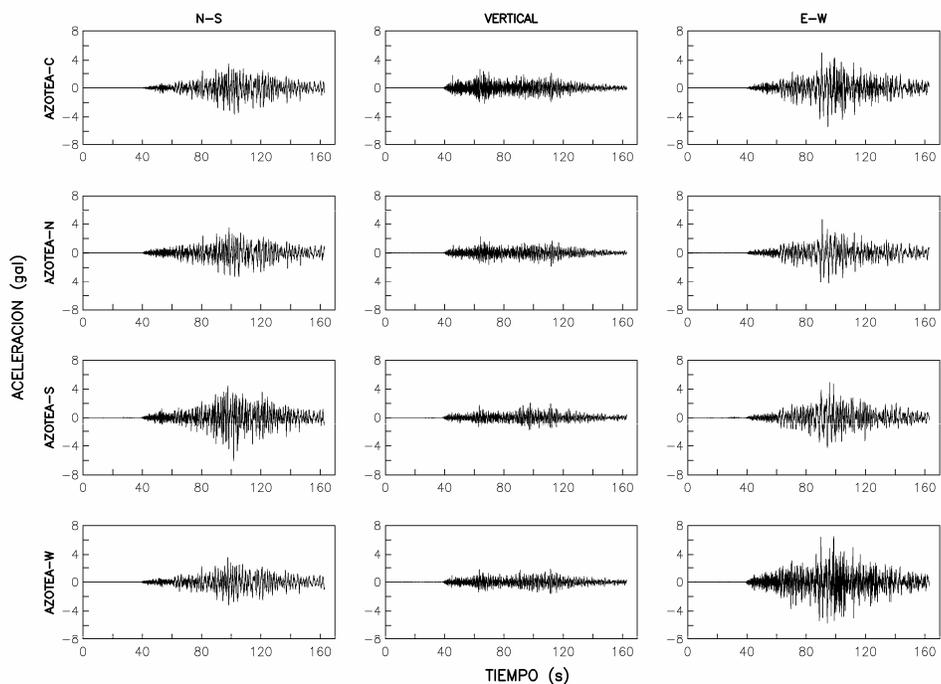


Fig. 6. Acelerogramas registrados en los cuatro puntos de la azotea , durante el sismo del 22 de mayo de 1997.

En la Fig. 7 se presentan los espectros de respuesta de CL para varios eventos sísmicos, sobre las dos direcciones horizontales. En esta figura se puede ver que la forma de los espectros de respuesta cambia de sismo a sismo; y que en los sismos de menor intensidad no se aprecia un pico para un periodo determinado. Esta situación hace que no se pueda detectar claramente un periodo de vibración dominante del terreno.

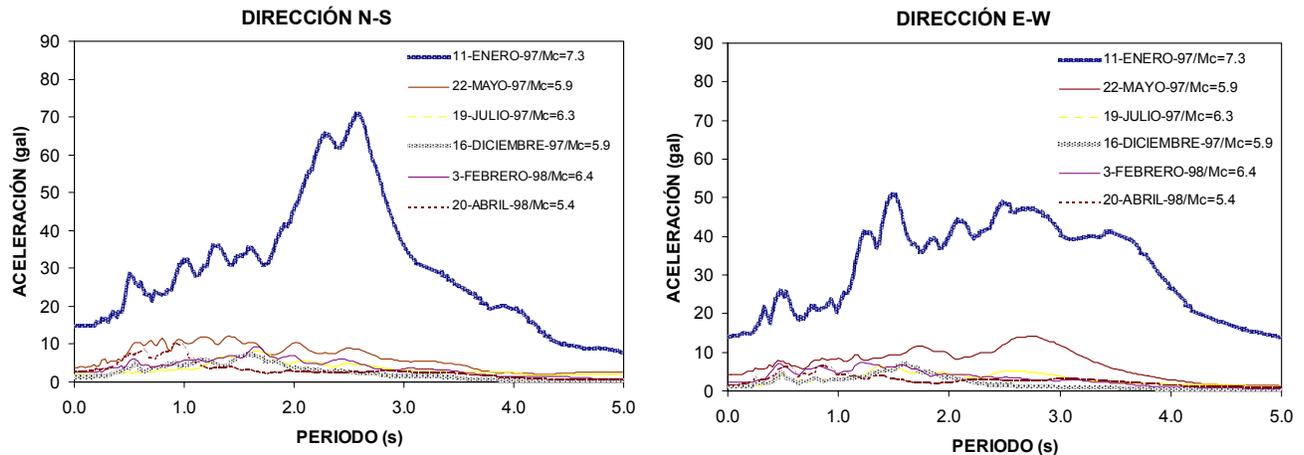


Fig. 7. Espectros de respuesta de campo libre (CL), para varios eventos sísmicos.

Lo anterior se puede atribuir a que, a medida que la magnitud del sismo crece, las ondas de vibración que llegan al valle de México tienen mayor amplitud para periodos más largos, mientras que para sismos con magnitudes bajas prevalecen las ondas de periodos cortos. Así, los espectros de respuesta reflejan no sólo las características del sitio sino también las de las ondas que arriban al valle.

Para eliminar la influencia de la magnitud sobre la forma del espectro de respuesta, se calcularon funciones de transferencia entre el movimiento del sitio de terreno blando donde se encuentra la Catedral y el movimiento del sitio de terreno firme de la estación Ciudad Universitaria del Instituto de Ingeniería (CU). La forma de estas funciones de transferencia no cambia de manera importante con el tipo y magnitud del sismo y, en consecuencia, se puede tener una apreciación más clara del periodo fundamental de vibración del terreno.

En la Fig. 8 se presentan estas funciones de transferencia para las dos direcciones horizontales y para cuatro de los eventos en que se contó con registros en los dos sitios. Se aprecia que la forma de las funciones de transferencia es similar en todos los sismos. En la Fig. 9 se muestran las funciones de transferencia promedio de los cuatro eventos considerados, para las direcciones N-S y E-W. Sobre la dirección N-S, se puede apreciar que el valor medio de la frecuencia fundamental de vibración del terreno es de 0.38 Hz, lo que corresponde a un periodo de 2.63 s, en tanto que la segunda frecuencia es de 1.76 Hz ($T=0.57$ s). Para la dirección E-W, la frecuencia fundamental promedio es de 0.37 Hz ($T=2.70$ s) y la segunda frecuencia de vibración del terreno es de 2.09 Hz ($T=0.48$ s).

Se deduce que el sitio presenta un período fundamental de vibración de aproximadamente 2.6 s y un segundo modo de vibración para un período cercano a 0.5 s. De acuerdo con el mapa de periodos dominantes del terreno de las Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo del Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal, en su propuesta para el año 2001, el período que corresponde a la zona donde se ubica la Catedral, es de aproximadamente 2.5 s, muy similar al obtenido a partir de los registros sísmicos.

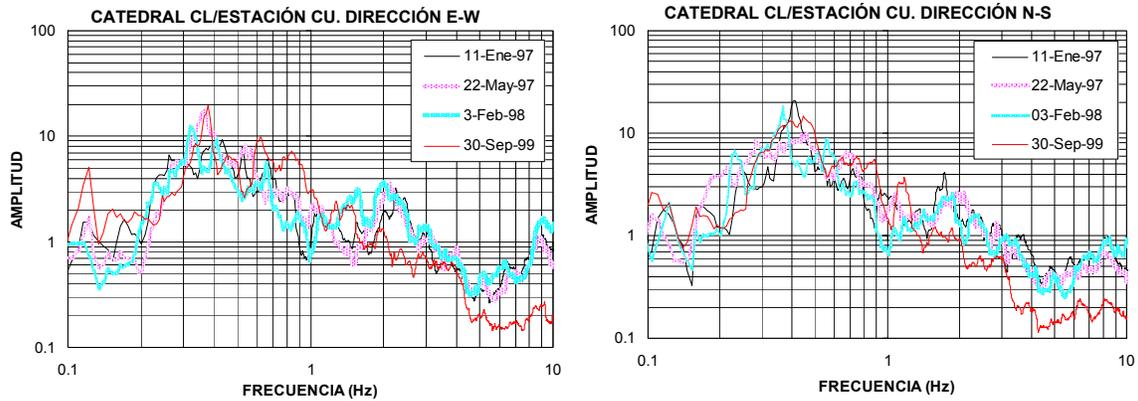


Fig. 8. Funciones de transferencia de Catedral CL respecto a la estación CU, para varios eventos sísmicos.

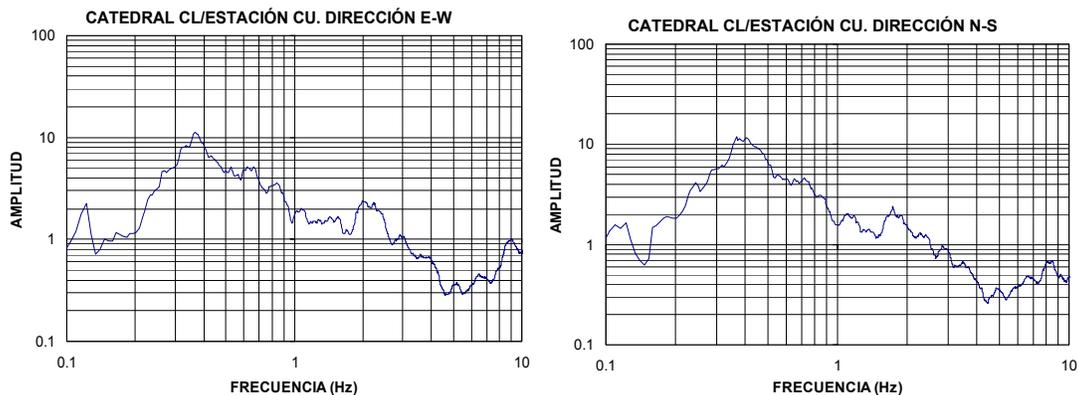


Fig. 9. Funciones de transferencia promedio de Catedral CL respecto a la estación CU

El período fundamental de vibración de 2.6 s, que corresponde a la excitación del terreno, resulta ser muy superior a los períodos fundamentales de vibración de estructuras históricas como la Catedral, los que no suelen exceder 0.5 s. Esto es particularmente benéfico para estas edificaciones cuando se ubican en un suelo altamente compresible, ya que al no tener periodos de vibración similares la estructura y el terreno de apoyo, el movimiento de la estructura no experimenta amplificaciones importantes, como sucede en algunos edificios modernos en los que se propicia un efecto de resonancia en la estructura, lo que fue uno de los factores principales que llevó a muchos de ellos al colapso en el sismo de 1985 (Rosenblueth y Meli, 1986). Cabe mencionar, sin embargo, que el segundo modo de vibración del suelo tiene un período que sí se encuentra en la cercanía del período fundamental de vibración típico para estos monumentos, lo que puede propiciar cierta amplificación de la respuesta, aunque de mucho menores proporciones.

Movimiento en la base del edificio

Un primer aspecto a estudiar en este sentido es la diferencia que puede haber entre el movimiento en campo libre y el que se da en la base de la estructura; esto permite determinar si la presencia del edificio altera en alguna forma el movimiento del terreno, y si la excitación inducida en la estructura es diferente de la que se deduciría de los registros obtenidos en campo libre.

Para el estudio de este aspecto, se compararon los espectros de respuesta de los registros de campo libre (CL) con los correspondientes al promedio de los instrumentos de los sótanos (SC, SN y SS), para tres eventos: 11 de enero, 22 de mayo y 19 de julio de 1997, y sobre las direcciones N-S y E-W. Como se aprecia en la Fig. 10, para períodos menores de 1 s, los sótanos tienen una clara disminución de amplitud con respecto al campo libre. Otra manera de ver lo anterior es la que se ilustra en las Figs. 11 y 12, en las cuales se obtuvieron las funciones de transferencia de las amplitudes espectrales de los tres puntos del sótano respecto a las de campo libre, para las dos direcciones horizontales. En estas figuras se aprecia una notable disminución en la amplitud para frecuencias mayores de 1.1 Hz, o sea para periodos menores que 0.9 s. En particular, para períodos cercanos a 0.4 s, para el cual se da el modo fundamental de vibrar asociado con el movimiento horizontal de la cubierta de la Catedral (como más adelante se comentará), se producen reducciones de aproximadamente 40 por ciento en las ordenadas espectrales para la dirección N-S y 60 por ciento para la dirección E-W.

Estas reducciones se deben a la interacción cinemática suelo-estructura. Las ondas de vibración del terreno son interferidas, o filtradas, y reducen su amplitud al atravesar un cuerpo rígido y masivo como la base de la Catedral. Este efecto se da principalmente para las ondas de alta frecuencia, que tienen una longitud igual o menor que la dimensión en planta del edificio. Adicionalmente, se tiene un efecto inercial, por el que una parte de la energía introducida al edificio por el movimiento del suelo es regresada a éste al vibrar el edificio y atenúa, así, la amplitud de ondas sísmicas.

El fenómeno anterior es particularmente benéfico para la seguridad sísmica de la Catedral y, de manera similar, para los otros edificios históricos del centro de la ciudad de México, y ha constituido un factor importante para su supervivencia a los muchos e intensos terremotos que los han afectado a lo largo de los siglos. Hay que considerar que en edificios de menores dimensiones la reducción se comenzará a dar para períodos más cortos que lo que se observó en la Catedral; sin embargo, seguramente se dará para los períodos que corresponden a sus modos fundamentales de vibración.

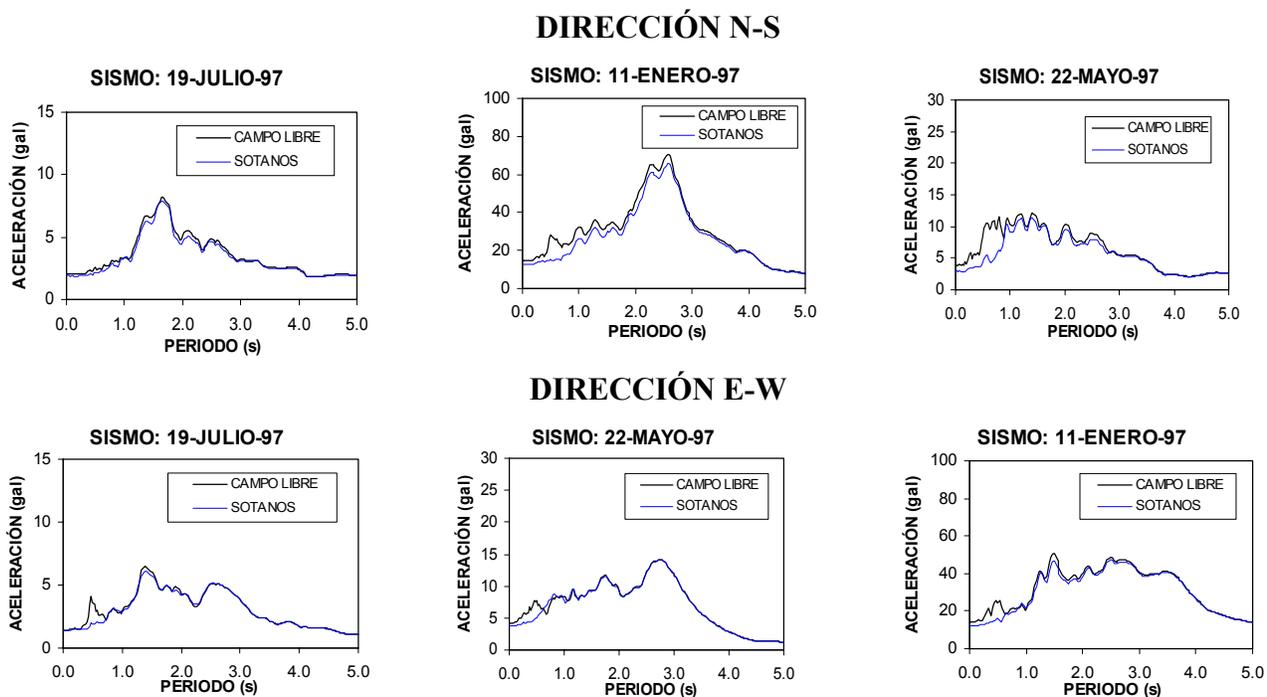


Fig. 10. Comparación de los espectros de respuesta de campo libre con el promedio de los sótanos, para ambas direcciones horizontales.

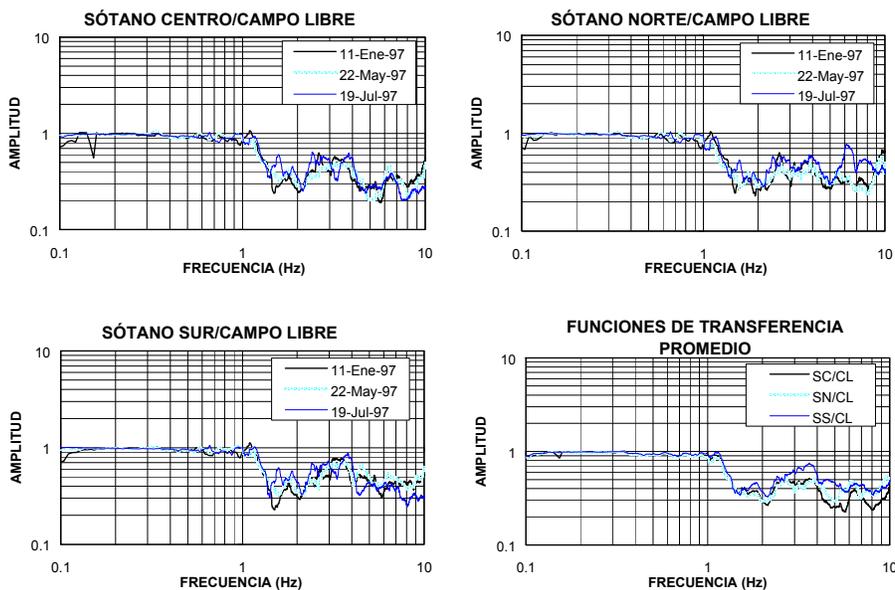


Fig. 11. Funciones de transferencia de los tres puntos del sótano con respecto a campo libre, dirección N-S.

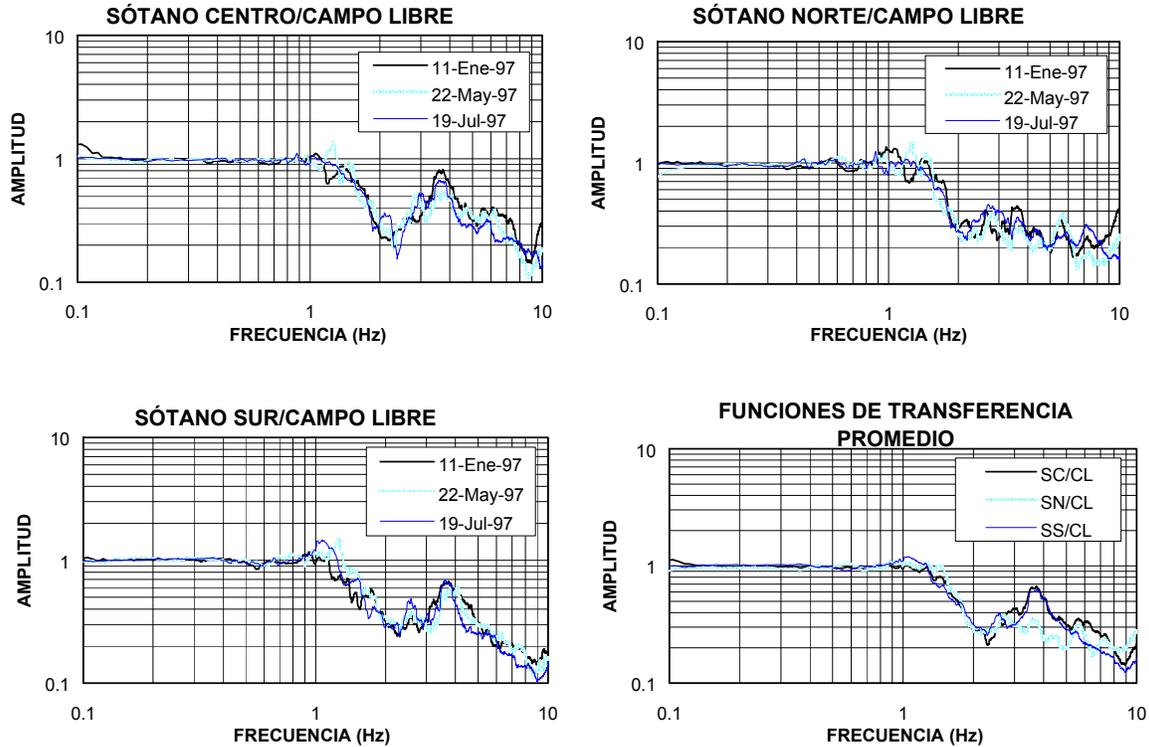


Fig. 12. Funciones de transferencia de los tres puntos del sótano con respecto a campo libre, dirección E-W.

Otro aspecto a estudiar es la uniformidad del movimiento en distintos puntos de la base del edificio, para determinar si se presentan diferencias debidas a condiciones del subsuelo o a la deformación de la estructura y de su cimentación. En la Fig. 13 se puede notar que de sismo a sismo sobre las dos direcciones horizontales, los tres espectros de los sótanos son similares; esto permite establecer que los tres puntos de la cimentación tienen el mismo tipo y amplitud de movimiento. En un análisis en el dominio del tiempo, se calcularon los desplazamientos relativos de cada extremo del sótano con respecto al centro (SC-SN y SC-SS) y de los dos extremos entre sí, para las direcciones N-S y E-W, y para la vertical. Los resultados muestran una tendencia de la base de la Catedral a flexionarse tanto vertical como lateralmente. La magnitud de estos movimientos relativos se aprecia de los valores consignados en la tabla 3. Como fracción del movimiento absoluto de la parte central de la cimentación, los desplazamientos relativos de los extremos representan hasta 20 por ciento para el movimiento vertical, 10 por ciento para el transversal y 5 por ciento para el longitudinal. Esto indica que la cimentación está lejos de moverse como un cuerpo rígido y que tiene distorsiones importantes sobre todo en dirección vertical, debido muy probablemente más al fuerte agrietamiento que presentan tanto la cimentación como la estructura, que a la flexión del conjunto. Estos movimientos relativos no se reflejan, sin embargo, en diferencias importantes en las aceleraciones inducidas en distintas zonas de la Catedral, como se desprende de la gran similitud de los espectros de respuesta de la Fig. 13

Movimiento de la cubierta

De la tabla 2 se aprecia que las aceleraciones máximas en la azotea para ambas direcciones horizontales exceden en poco a las de los sótanos (17 por ciento para el sismo del 11 de enero de 1997). Esto indica que el monumento amplifica muy poco la vibración del terreno, y que se mueve junto con el terreno, casi como un cuerpo rígido.

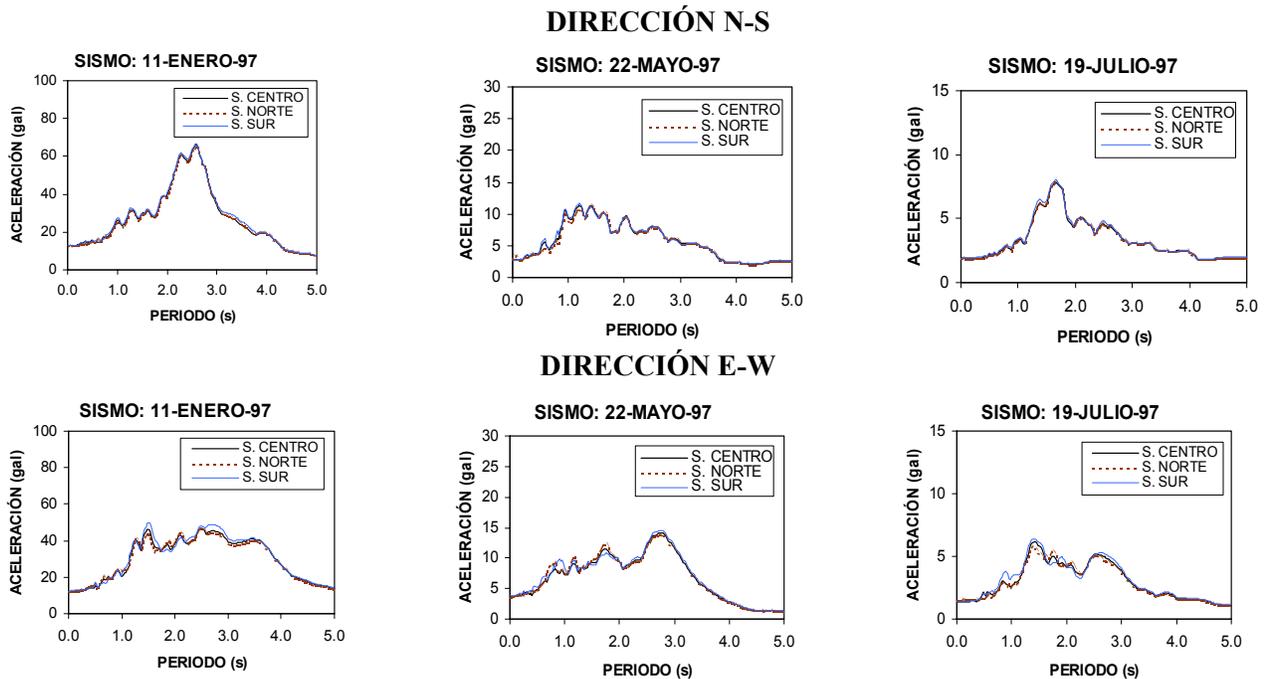


Fig. 13. Espectros de respuesta de los tres puntos del sótano de Catedral, para las dos direcciones horizontales.

Para el estudio detallado de la respuesta de la cubierta, se obtuvieron espectros de respuesta de los cuatro puntos de la azotea (azotea sur, azotea norte, azotea centro y azotea oeste), para las dos direcciones horizontales y para los tres eventos sísmicos seleccionados (11 de enero de 1997, 22 de mayo de 1997 y 20 de abril 1998); dichos espectros se comparan entre sí en las Figs. 14 y 15, para las direcciones N-S y E-W, respectivamente.

Los espectros de respuesta muestran diferencias significativas para los tres sismos y para las dos direcciones, debido principalmente a las diferencias del movimiento del terreno en cada caso. Se identifican picos de amplitud de respuesta para los períodos dominantes del terreno y, en todos los casos, un pico para un período dominante de aproximadamente 0.4 s, que corresponde al modo fundamental de vibración para las dos direcciones, como se verá más claramente en las funciones de transferencia que se presentarán más adelante. La amplificación espectral para este periodo fundamental es relativamente mayor para los sismos de menor intensidad que para el mayor, y para la dirección N-S que para la E-W. Esto es debido a los mayores contenidos de ondas con períodos cercanos al fundamental de la estructura en el movimiento del terreno en los casos de mayor respuesta. En la dirección N-S se aprecia también un pico importante de la en la respuesta para un período de 0.8 s sobre todo en para el punto sobre la azotea sur. Este período, como se verá corresponde al modo fundamental de vibración de las torres de fachada.

Tabla 3. Desplazamientos relativos máximos del movimiento de la cimentación

Evento	Estaciones	Dirección N-S		Dirección V		Dirección E-W	
		D. R. (cm)	Coc. (%)	D. R. (cm)	Coc. (%)	D. R. (cm)	Coc. (%)
11-enero-97	SC-SN	0.038	1.62	0.080	14.18	0.200	7.52
	SC-SS	0.114	4.87	0.044	7.80	0.234	8.80
	SN-SS	0.100	4.27	0.110	19.50	0.281	10.56
22-mayo-97	SC-SN	0.021	4.37	0.016	21.33	0.039	8.21
	SC-SS	0.028	5.82	0.018	24.00	0.046	9.68
	SN-SS	0.024	4.99	0.018	24.00	0.070	14.74
19-julio-97	SC-SN	0.008	1.74	0.011	11.83	0.017	5.86
	SC-SS	0.016	3.48	0.008	8.60	0.032	11.03
	SN-SS	0.013	2.83	0.012	12.90	0.045	15.52

NOTA: Para cada dirección se muestra el desplazamiento relativo (D. R.) y su cociente (Coc.) respecto al desplazamiento absoluto máximo registrado en sótano centro (SC).

La amplificación de la respuesta entre la azotea y los sótanos permite también hacer una estimación de del amortiguamiento. Los valores obtenidos varían según la intensidad del movimiento sísmico y según la posición de los puntos de medición, pero en promedio resultan cercanos a 10% de amortiguamiento crítico, o sea del orden del doble de lo que se obtiene para los edificios modernos ante sismos de alta intensidad. Estos altos amortiguamientos contribuyen significativamente a que el movimiento en la cubierta sea poco superior al que se registra en la base del edificio.

Los espectros de respuesta también muestran que sobre la dirección N-S la azotea sur presenta una amplitud de respuesta mayor que el resto de las estaciones, para un período de 0.4 s; esto se atribuye a la presencia de la fachada principal que tiene una masa considerable y tiende a vibrar en dirección perpendicular a su plano y a separarse del resto de la estructura. Una amplificación similar se observa en la azotea oeste que muestra una mayor amplitud de vibración para la dirección E-W, también para un período del orden de 0.4 s; de manera semejante al caso anterior, esto se deriva de la vibración normal a su plano de la fachada lateral. Por otra parte, puede verse que en la dirección E-W también se amplifica el movimiento de la azotea centro debido a la presencia de la gran masa de la cúpula y de su base. Además, puede observarse que en ambas direcciones horizontales el instrumento de la azotea sur experimenta una pequeña amplificación para un período de alrededor de 0.8 s, lo que se atribuye a la vibración de las torres, como más adelante se demostrará.

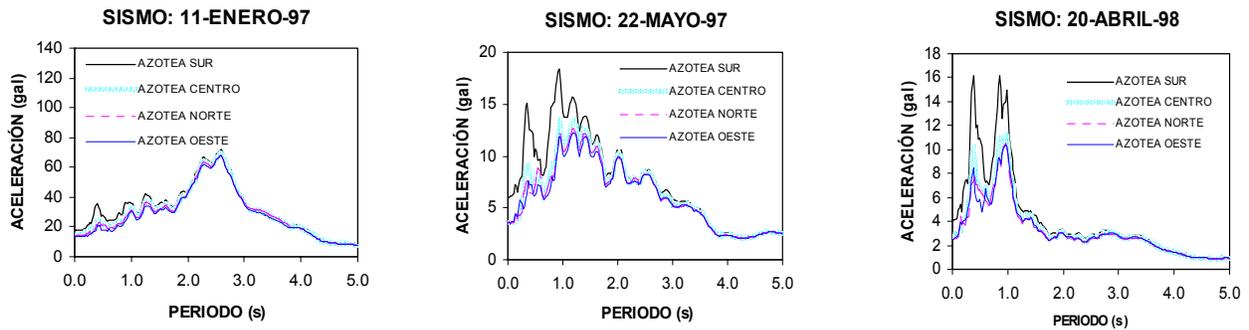


Fig. 14. Espectros de respuesta de los cuatro puntos de azotea, para diferentes sismos, dirección N-S.

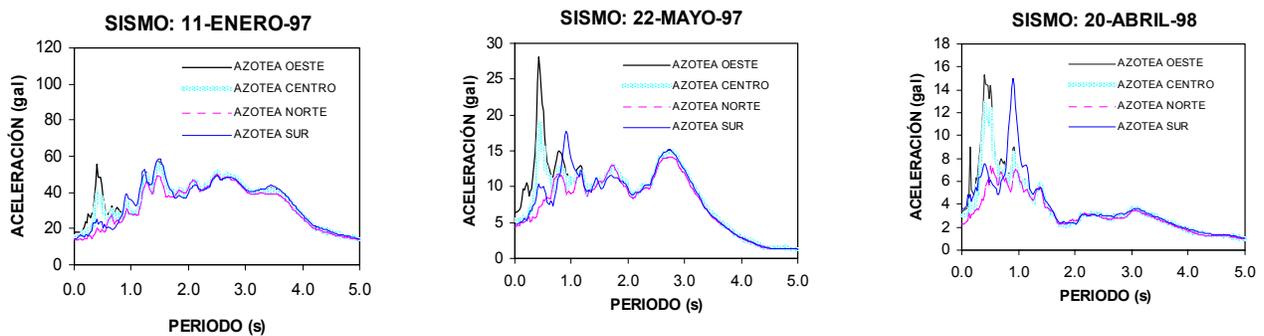


Fig. 15. Espectros de respuesta de los cuatro puntos de azotea, para diferentes sismos, dirección E-W.

En las Figs. 16 y 17 se muestran las funciones de transferencia de los cuatro puntos de la cubierta con respecto a los sótanos; es decir: AC/SC, AS/SS, AN/SN y AW/SC, para las direcciones N-S y E-W, respectivamente. En estas figuras se puede ver que las funciones de transferencia de cada punto sobre la azotea no cambian de forma de sismo a sismo, independientemente de su intensidad; en consecuencia prevalecen las mismas propiedades dinámicas y se puede reconocer un comportamiento lineal.

En la Fig. 18 se presentan las funciones de transferencia promedio de cada punto sobre la azotea con respecto al correspondiente del sótano, para las direcciones N-S y E-W. Sobre la dirección N-S se aprecia nuevamente que la mayor amplificación ocurre para la azotea sur; además también es notorio que los máximos locales de las cuatro funciones se ubican para una frecuencia de 2.8 Hz (período de

0.35 s), lo que identifica el primer modo; también se identifica para ambas direcciones un segundo modo para una frecuencia cercana a 6 Hz, aunque menos claro. El pico para 1,1 Hz corresponde a la vibración de las torres en ambas direcciones y es claro para los instrumentos cercanos a la fachada. En la dirección E-W, las funciones de transferencia muestran, al igual que en los espectros de respuesta, que la azotea oeste sufre una mayor amplificación que el resto de los puntos de la cubierta, y que la amplificación máxima que corresponde a la frecuencia fundamental de vibración de la cubierta en esta dirección también, cercana a 2.5 Hz.

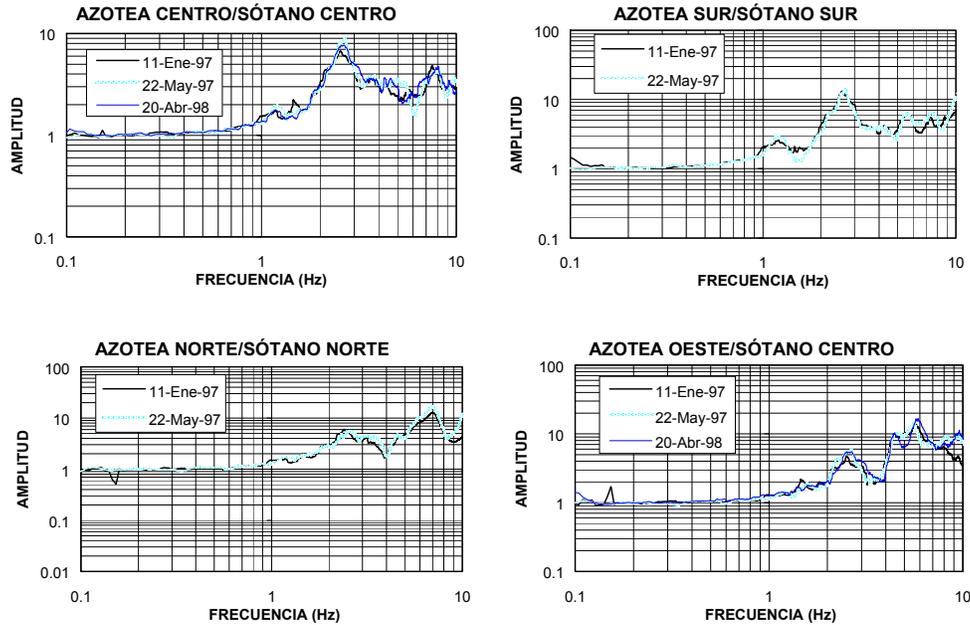


Fig. 16. Funciones de transferencia, azotea respecto a sótano, dirección N-S.

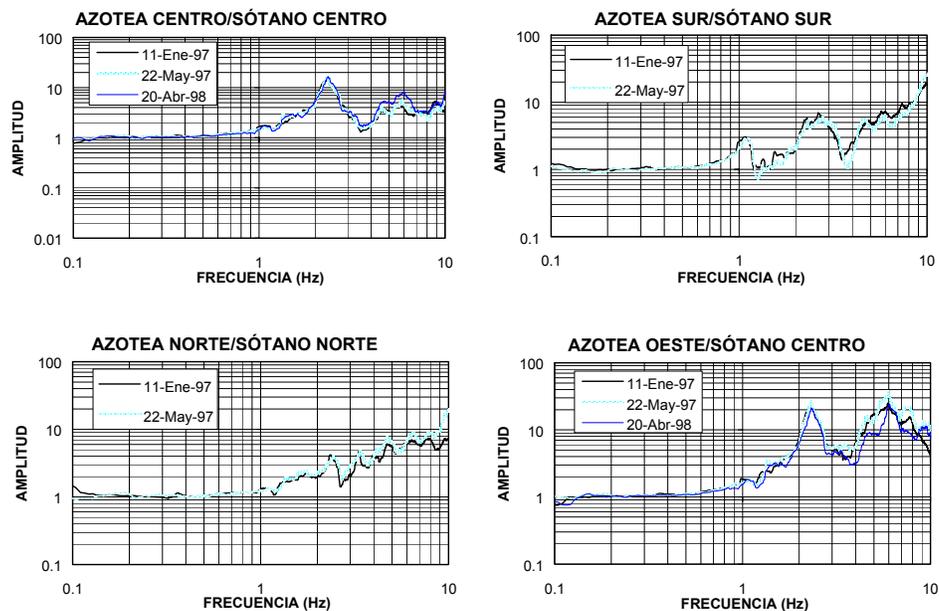


Fig. 17. Funciones de transferencia, azotea respecto a sótano, dirección E-W.

El análisis de los espectros de respuesta y de las funciones de transferencia pone en claro las diferencias de amplificaciones en los cuatro puntos instrumentados de la azotea, lo que refleja que la cubierta no vibra como un cuerpo rígido. Las amplificaciones locales provienen, por una parte, de la vibración local de masas concentradas importantes en ciertos puntos del edificio y, por otra, de la existencia de numerosas grietas que hacen que sus diferentes componentes no trabajen como una unidad, sino que estén total o parcialmente desligados, por lo que cada bloque responde de manera diferente de acuerdo con ciertas características dinámicas locales.

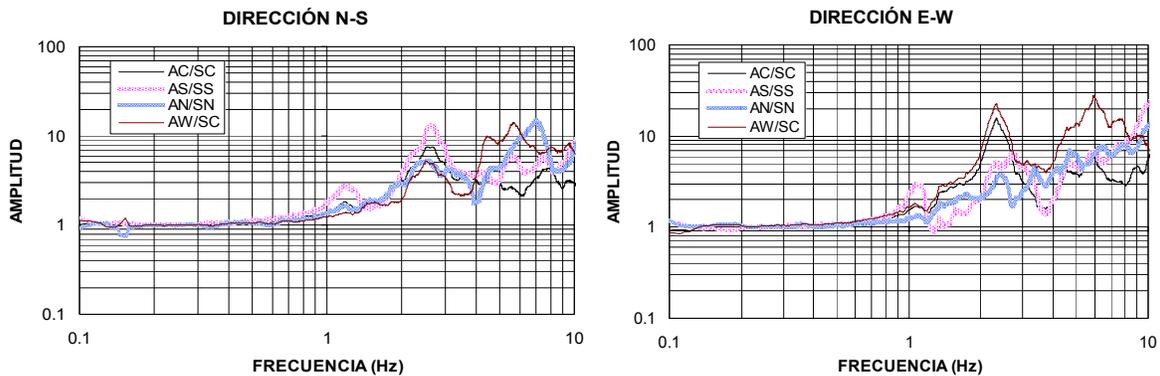


Fig. 18. Funciones de transferencia promedio de azotea respecto a sótano

El análisis del modelo de elemento finito de la Catedral (Sánchez R. et al. 1998) encontró que los períodos asociados al movimiento horizontal de la cubierta sobre las direcciones N-S y E-W, son de 0.29 y 0.30 s, respectivamente, muy inferiores al período de 0.4 s derivado de los registros acelerográficos, lo que indica que el modelo sobrestima significativamente la rigidez lateral de la Catedral, probablemente por no considerar el agrietamiento de la estructura, ni las rotaciones en la base de la misma, que en el modelo se supone empotrada en su cimentación.

Vibración vertical de la cúpula

Al comparar los espectros de respuesta en dirección vertical de los cuatro puntos de la azotea, en la Fig. 19, se puede notar que en los temblores del 11 de enero de 1997 y del 22 de mayo de 1997, la azotea centro experimentó una respuesta mayor que los demás puntos sobre la azotea, dentro del intervalo de periodos cercanos a 0.2 s, mientras que en el evento del 19 de julio de 1997 no fue muy clara esta situación. Esta diferencia se puede atribuir a que este último sismo no indujo una respuesta importante en la estructura en comparación con los otros eventos, mientras que ante intensidades sísmicas como la de los dos primeros eventos se excita un modo de vibración vertical de la cúpula central.

Lo anterior se aprecia con mayor claridad en las funciones de transferencia del movimiento vertical de la base de la cúpula con respecto a los otros puntos de la azotea (Fig. 20). Se nota que la cúpula experimenta una mayor respuesta que el resto de la cubierta con un pico para una frecuencia de 6.5 Hz (período de 0.15 s). Lo anterior revela que la cúpula presenta una vibración vertical local que se atribuye al gran peso de esta estructura aunado a la baja rigidez lateral de sus apoyos que se abren y cierran durante la vibración horizontal de la cubierta. De acuerdo con el análisis dinámico realizado en el modelo de elemento finito de la Catedral (Sánchez R. et al, 1998), el período asociado al movimiento vertical de la cubierta es de 0.157 s, el cual es prácticamente igual al inferido de los registros sísmicos.

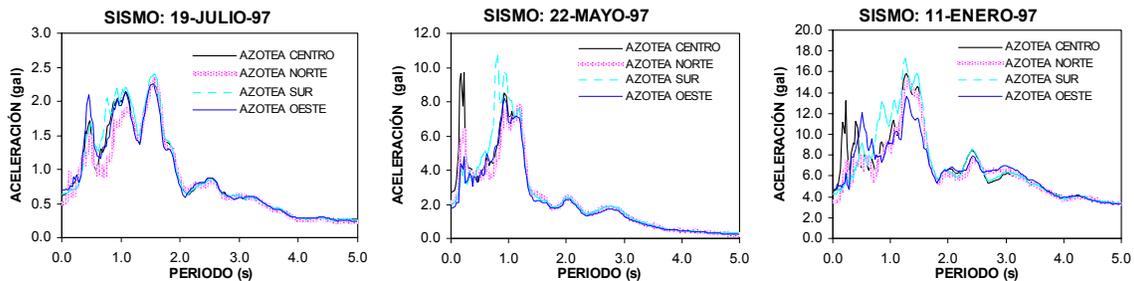


Fig. 19. Espectros de respuesta de los cuatro puntos del nivel de azotea, para diferentes sismos, en la dirección vertical.

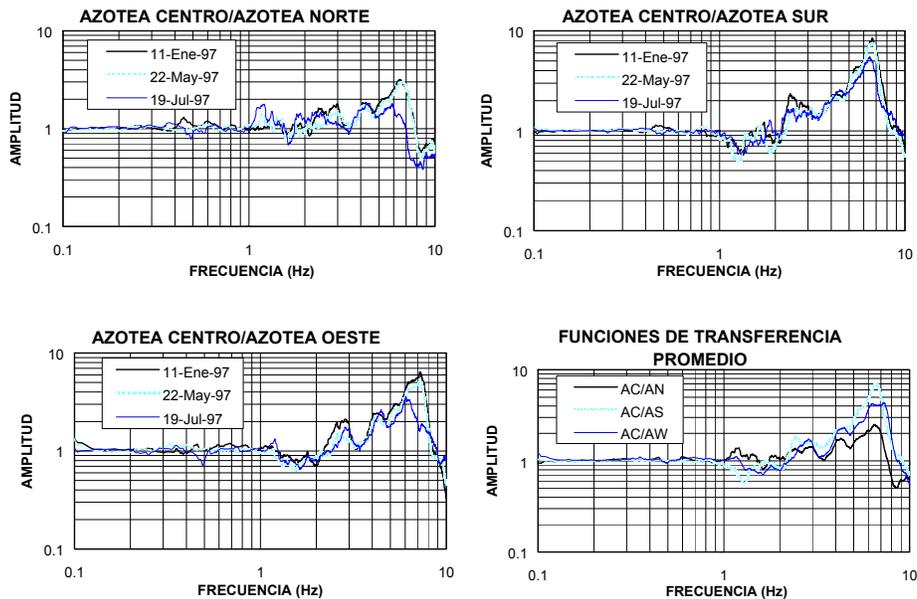


Fig. 20. Funciones de transferencia, azotea centro respecto a los demás puntos de azotea, dirección vertical.

Vibración de la torre sur-poniente

Para analizar el movimiento de la torre sur-poniente, se hizo un estudio en el dominio del tiempo, el cual consistió en obtener cocientes a partir de las aceleraciones máximas registradas en torre baja (TB), torre alta (TA), campo libre (CL) y sótano centro (SC); los cocientes obtenidos se muestran en la tabla 4, con su valor promedio y las medidas de su dispersión. Se puede apreciar que la amplificación que se presentó en la parte baja de la torre (TB) con relación al sótano (SC) es del orden de dos en ambas direcciones horizontales. El punto sobre la parte alta de la torre (TA), durante los sismos registrados en 1998, experimentó aceleraciones máximas del orden de 7.5 veces las que se midieron en el instrumento del sótano, sobre las dos direcciones horizontales; esta importante amplificación se ilustra claramente en la Fig. 21, en la cual se muestran los acelerogramas registrados en las dos alturas de la torre ante la excitación en el sótano durante el sismo del 20 de abril de 1998. Este nivel de amplificaciones es significativamente mayor al que se obtiene del modelo de elemento finito, el cual sólo detecta amplificaciones cercanas a dos.

Tabla 4. Cocientes de aceleraciones máximas, movimiento de la torre respecto al movimiento de la base.

Cociente	Componente	Promedio	D. Estándar	CV (%)
TB/CL	N-S	1.2764	0.2223	17.42
	V	0.8179	0.1508	18.44
	E-W	1.6689	0.5231	31.35
TB/SC	N-S	1.9783	0.2130	10.77
	V	1.2576	0.1663	13.22
	E-W	2.3112	0.7575	32.78
TA/TB	N-S	3.6057	0.4541	12.59
	V	1.0461	0.2284	21.84
	E-W	3.3053	0.4265	12.90
TA/CL	N-S	4.8044	0.5685	11.83
	V	0.8580	0.1770	20.62
	E-W	6.0646	2.8117	46.36
TA/SC	N-S	7.5623	1.2897	17.06
	V	1.4560	0.2142	14.71
	E-W	7.4545	3.0491	40.90

Los espectros de respuesta para cada punto sobre la torre se ilustran en la Fig. 22. En la dirección N-S, TA responde cuatro veces más que TB, esto para un periodo del orden de 0.8 s. Sobre la dirección E-W, TA presenta una respuesta del orden de cinco a seis veces mayor que la registrada en TB, para un periodo de 0.88 s, aproximadamente. Para definir con más precisión las frecuencias fundamentales de vibrar de la torre, se calcularon las funciones de transferencia de TB/SC y TA/SC para los sismos en estudio, sobre ambas direcciones horizontales. En la Fig. 23 puede verse que el primer modo de vibración de la torre tiene una frecuencia de aproximadamente 1.25 Hz (periodo de 0.8

s) en la dirección N-S y de 1.15 Hz (período de 0.87 s) en la dirección E-W. Así mismo, puede verse que para ambas direcciones la amplificación a estas frecuencias en TA/SC es aproximadamente cuatro veces mayor que la que ocurre en TB/SC, lo que hace notoria una vez más la gran amplificación que sufre la torre en su parte alta.

El análisis de un modelo de elemento finito de la torre, considerada como un cuerpo independiente del resto del monumento, dio lugar a períodos fundamentales de 0.59 y 0.66 s, para las direcciones N-S y E-W, respectivamente, y a una amplificación de sólo dos veces de la parte superior con respecto a la inferior. Esto refleja que dicho modelo no es representativo del comportamiento real. Para entender mejor la respuesta observada se realizó el análisis de un modelo simple de dos grados de libertad, identificando las propiedades que éste debería tener para reproducir los resultados obtenidos. La descripción del análisis se encuentra en Rivera, 2000. Se obtuvo que para reproducir los resultados hay que considerar que la parte baja de la torre tiene una masa diez veces superior a la de la parte alta, en lugar de dos veces como se obtendría del cálculo de las propiedades de la torre. Esto indica que la torre está en realidad adherida al resto del monumento, o al menos a la fachada principal, y que una parte de la masa del cuerpo principal participa de la vibración de la torre. De esta manera, la parte superior de la torre, que tiene mucho menor masa y rigidez que la parte inferior, actúa como un apéndice que amplifica significativamente las vibraciones.

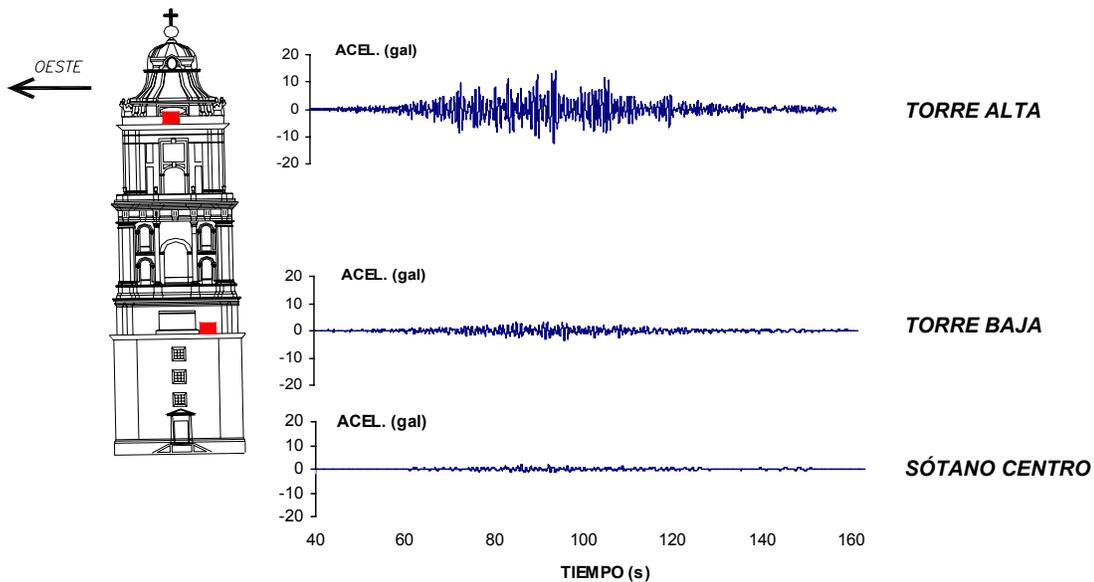
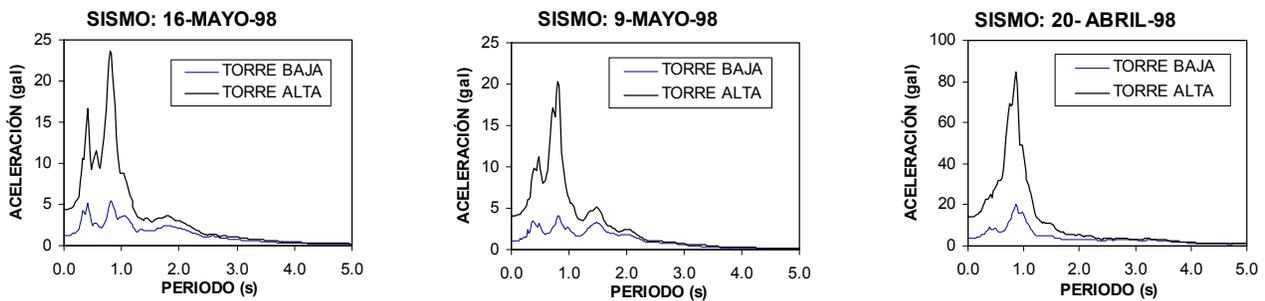


Fig. 21. Respuesta de la torre sur-poniente a diferentes alturas, a partir de la excitación en su base, durante el sismo del 20 de abril de 1998.

IMPLICACIONES PARA LA SEGURIDAD DE LA CATEDRAL

Los movimientos inducidos por los sismos registrados por la red de acelerógrafos variaron en un amplio intervalo de intensidades, pero fueron todos muy inferiores a los máximos movimientos que ha tenido que soportar la Catedral a lo largo de los siglos y de los que tiene que ser capaz de resistir en el futuro; por ello, estrictamente, la respuesta medida sólo puede considerarse representativa del comportamiento ante sismos moderados o pequeños. Por otra parte, la evidencia de que, dentro del amplio intervalo de intensidades de los sismos registrados, los parámetros principales que definen la respuesta se han mantenido muy similares, y de que los valores de los principales índices de la respuesta (desplazamientos y aceleraciones) han sido aproximadamente proporcionales a la intensidad del movimiento, permite pensar que los resultados puedan emplearse para estimar la respuesta ante sismos de mayor intensidad.

DIRECCIÓN N-S



DIRECCIÓN E-W

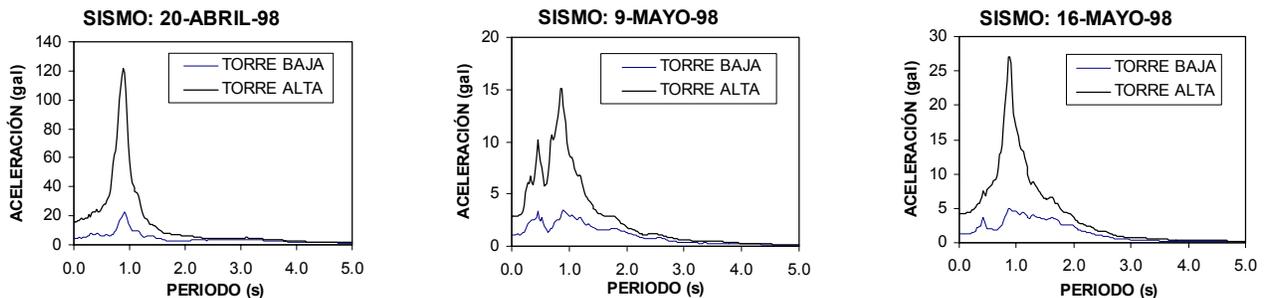


Fig. 22. Espectros de respuesta de torre baja y torre alta, en ambas direcciones horizontales.

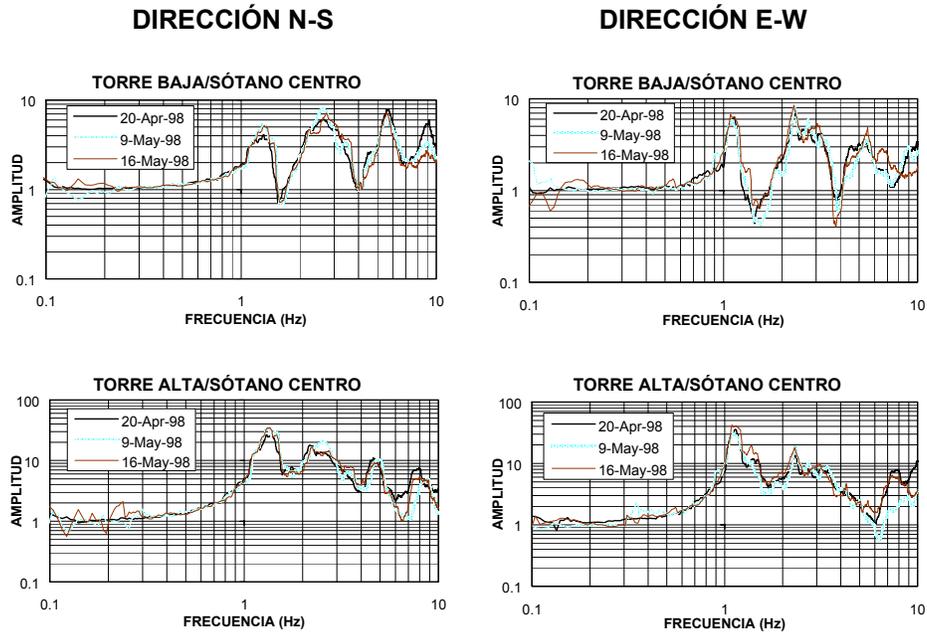


Fig. 23. Funciones de transferencia, torre baja y torre alta entre sótano centro, ambas direcciones horizontales.

Para extrapolaciones acerca de las respuestas que pueden esperarse ante sismos de mucho mayor intensidad, pueden tomarse como referencia los resultados de otras estaciones donde se hayan registrado sismos mayores. La estación que cuenta con una historia más larga de registros es la del Instituto de Ingeniería en Ciudad Universitaria (CU), que incluye el sismo del 19 de septiembre de 1985, para el cual se midió una aceleración máxima del terreno de 33.45 gal, mientras que el 11 de enero de 1997 se registró 5.66 gal, para la dirección E-W en que la intensidad fue mayor. La relación entre estas dos mediciones ($33.45/5.66=5.9$) puede considerarse como un factor de proporcionalidad por el que se deben multiplicar las respuestas obtenidas en la Catedral para el sismo del 11 de enero de 1997, para estimar las que pudieron haberse presentado el 19 de septiembre. Debido a que las amplitudes de ondas de distintos periodos no aumentan en la misma proporción al aumentar la intensidad de un sismo, es más apropiado emplear la función de transferencia entre los movimientos de los dos sitios para estimar el espectro de respuesta completo del movimiento de mayor intensidad. Si así se hace, para el sótano centro, se obtiene el espectro de la Fig. 24 que corresponde a la respuesta de un sistema con 5% de amortiguamiento, al movimiento que debió haber ocurrido en ese punto el 19 de septiembre de 1985. Si se compara ese espectro con el que corresponde al registro de ese sismo en el sitio de SCT en la dirección E-W, que es el que se ha considerado más representativo del movimiento del terreno en la zona del lago, se aprecia que en el sitio de la Catedral las amplitudes fueron mucho menores, sobre todo para los periodos cercanos a 0.5 s, que son los más significativos para la respuesta

de ésta y otras estructuras históricas. Como se ha explicado anteriormente, esta reducción se debe principalmente al efecto favorable de la interacción del movimiento del suelo con una estructura masiva y rígida, como la Catedral. Además debe tomarse en cuenta que el amortiguamiento de la Catedral es mucho mayor que 5%, lo que reduciría ulteriormente las ordenadas espectrales.

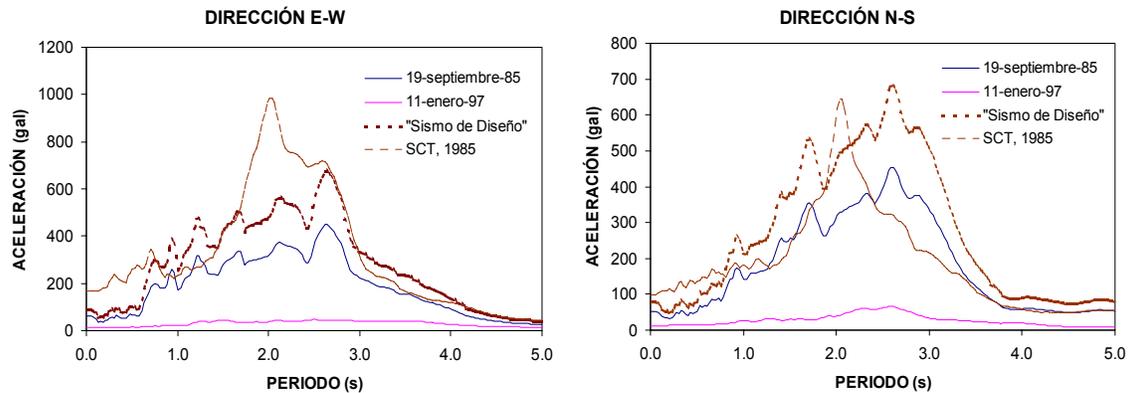


Fig. 24. Comparación de diferentes espectros de respuesta de sótano centro, para diferentes intensidades sísmicas. También se comparan dichos espectros con el registrado en la estación SCT.

El Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal (RCDF, 1995) basa sus recomendaciones de diseño sísmico en la hipótesis de que las construcciones comunes de la llamada zona de lago deben ser capaces de resistir un evento de intensidad similar al de 1985, mientras que las de excepcional importancia deben resistir una excitación 50 por ciento superior a ésta. Si se acepta este último criterio para la Catedral, se debe tomar como referencia el espectro estimado para 1985, incrementado 1.5 veces; éste también se muestra en la Fig. 24, donde se ha considerado conservadoramente un amortiguamiento de 5%.

Con base en lo anterior, pueden estimarse las respuestas esperadas para ese “sismo de diseño” a partir de los valores medidos para el sismo del 11 de enero de 1997, multiplicados por la relación entre las ordenadas espectrales del “sismo de diseño” y las de dicho evento, correspondientes a los períodos de vibración a los que se da cada respuesta particular. Así, para el desplazamiento horizontal máximo de la cubierta con respecto al sótano se había registrado un máximo de 0.17 cm para un período fundamental de 0.4 s, para el cual la relación entre las dos ordenadas espectrales es 5.5; por tanto el desplazamiento máximo esperado para el sismo de diseño será 0.95 cm. De manera semejante se calcularon otros índices representativos de la respuesta que se consignan en la tabla 5.

Tabla 5. Índices de respuestas calculados para el “sismo de diseño”

Índice de la respuesta	Estación	Dirección	Registrado: 11-enero-97 (AC) 20-abril-98 (TA)	Factor de escala	Calculado “Sismo de Diseño”
Aceleración máxima	AC	N-S	14.99	4.54	68.05
		E-W	15.89	5.52	87.71
		V	4.74	8.07	38.25
	TA	N-S	14.26	29.08	414.68
		E-W	16.23	54.44	883.56
Desplazamiento máximo absoluto	AC	N-S	2.43	4.54	11.03
		E-W	2.79	5.52	15.40
	TA	N-S	0.306	29.08	8.89
		E-W	0.503	54.44	27.38
Desplazamiento máximo relativo con respecto al SC	AC	N-S	0.200	4.54	0.908
		E-W	0.173	5.52	0.955
	TA	N-S	0.239	29.08	6.95
		E-W	0.352	54.44	19.16

El desplazamiento máximo calculado no resulta particularmente preocupante; su efecto más importante es en el aumento de la excentricidad de las cargas axiales en las columnas. Si se considera que actualmente el desplome máximo en la dirección E-W, en la columna C-7 es de 39 cm, y llegó a ser 47 cm antes de la corrección geométrica con la subexcavación, se aprecia que con el sismo de diseño no se alcanzaría el desplome máximo que ya ha tenido esa columna. En lo relativo al movimiento horizontal de la parte alta de la torre se llega a valores muy elevados de las aceleraciones máximas; sin embargo, hay que considerar que a medida que aumenta la intensidad de las vibraciones debe esperarse que se presentarán agrietamientos por flexión que limitarán las aceleraciones que se puedan introducir en la torre. Este último problema merece un estudio más completo sobre la respuesta máxima esperada y los daños que podrían presentarse en un sismo de gran intensidad. En cuanto a la aceleración vertical de la cúpula se obtiene, según consignado en la tabla 5, un factor de escala de 8.07 que lleva a un valor esperado para el sismo de diseño de 38.25 gal, lo que representa un 4 % de la aceleración de la gravedad, que no es significativo ni para el incremento del peso y de las fuerzas transmitidas a los apoyos, ni para la reducción del mismo y de la posibilidad de agrietamiento de la base de la cúpula.

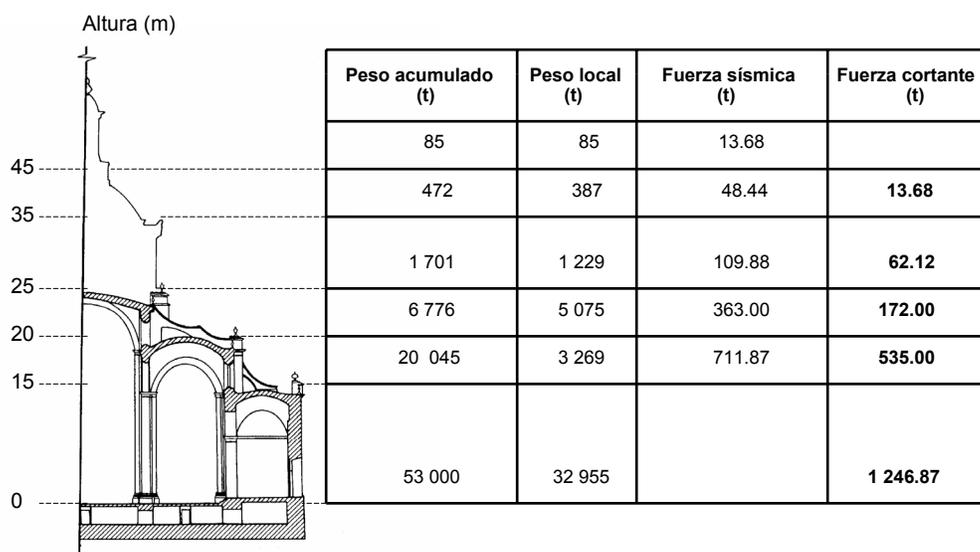


Fig. 25. Fuerzas cortantes inducidas por el “sismo de diseño” a distintas alturas de la Catedral

Las aceleraciones máximas así obtenidas pueden servir para el cálculo de las fuerzas que se introducen en la estructura y para la revisión de su seguridad. Aquí es conservador suponer que estas aceleraciones y las fuerzas correspondientes crecen linealmente con la intensidad del movimiento del terreno. De acuerdo, nuevamente, con los criterios implícitos en el RCDF, no se exige que la estructura sea capaz de resistir las fuerzas que corresponden al espectro de respuesta elástico, sino se admiten reducciones por considerar que el comportamiento inelástico de la estructura va a limitar las aceleraciones que se introducen en la misma, cada vez más a medida que la intensidad del movimiento aumenta. Si se ignoran, inicialmente, dichas reducciones, se pueden estimar las aceleraciones introducidas por el sismo de diseño en distintos niveles suponiendo que las aceleraciones crecen linealmente con la altura y tomando como referencia la aceleración estimada en la cubierta. En la Fig. 25 aparecen los pesos calculados para la parte central del monumento y concentrados a distintas alturas, las aceleraciones determinadas para cada punto a partir de la estimada para el sismo de diseño en la azotea centro, y las fuerzas laterales correspondientes según estas hipótesis simplistas. Se obtiene una fuerza cortante total de 1245 toneladas que representa el 6 por ciento del peso del edificio que se ha supuesto concentrado arriba de su base. En cálculos realizados antes de contar con los resultados instrumentales (Meli y Sánchez R. 1995), se supuso un coeficiente sísmico de 10 % y se encontró que la estructura contaba con la capacidad para resistir las fuerza inducidas para esa condición. Si, al igual de lo que se supuso en el trabajo mencionado, se considera una reducción de 1.5 de las fuerzas sísmicas estimadas para el sismo de diseño, por efecto del comportamiento inelástico, se llega a un coeficiente sísmico de $0.06/1.5=0.04$ que es 2.5 veces menor que el antes considerado; por tanto, puede concluirse que no debe haber problema en cuanto a la seguridad sísmica de la Catedral en su conjunto.

CONCLUSIONES

La red acelerográfica de la Catedral ha sido notablemente exitosa en cuanto al número y calidad de registros obtenidos en un lapso reducido, y a la utilidad de la información para mejorar el conocimiento sobre la manera en que el monumento responde a los movimientos sísmicos del terreno. Muchos de los resultados son también de utilidad para el estudio de los otros monumentos construidos sobre el suelo blando del centro histórico de la ciudad de México. La gran frecuencia con que se presentan movimientos sísmicos en la ciudad hace que las redes de acelerógrafos sean particularmente eficientes en la generación de resultados sobre la respuesta de todo tipo de estructuras.

De la interpretación de los resultados obtenidos destacan algunas conclusiones relevantes.

El movimiento del terreno en el sitio se caracteriza por tener un periodo fundamental de vibración de 2.6 s, que es muy superior al periodo fundamental de la Catedral como conjunto (0.4 s) y al de sus principales elementos constitutivos; esto es particularmente favorable, ya que al no tener periodos de vibración similares la estructura y el terreno de apoyo, se está lejos de la posibilidad de resonancia, y las amplitudes de vibración inducidas en la Catedral son reducidas. Esta situación es típica de todos los monumentos del centro histórico de la ciudad de México.

Se da una interacción favorable entre el suelo y la estructura, debido a la cual las ondas de vibración que más afectan a la estructuras (aquellas con periodos menores de 2 s) experimentan una reducción importante de amplitud. Para el período asociado a la traslación horizontal de la cubierta (0.4 s), se observan reducciones promedio de 40 y 60 por ciento en las direcciones N-S y E-W, respectivamente.

Por las razones anteriores, y porque el amortiguamiento propio de la estructura es relativamente alto, cercano a 10% del crítico, la Catedral como un todo sigue prácticamente el movimiento del terreno y tiene una vibración casi de cuerpo rígido. Las aceleraciones en la cubierta son solamente 17 por ciento superiores, en promedio, a las que se registran en su base. Eso conduce a que las fuerzas y deformaciones que se inducen en la estructura sean, en términos generales, pequeñas y no ocasionen graves consecuencias para la seguridad de la construcción.

Las fachadas sur y poniente, muestran una significativa vibración en dirección perpendicular a su plano, lo que indica que no están perfectamente conectadas al resto de la estructura, por lo que ésta no trabaja como una sola unidad solidaria. Debe considerarse la conveniencia de mejorar la conexión de las fachadas con el resto de la estructura.

La presencia de la cúpula produce una amplificación del movimiento vertical en el centro de la Catedral con respecto al movimiento vertical de otros puntos de la estructura. El período asociado a este modo de vibrar es de 0.15 s, que es muy inferior a los críticos para la respuesta de la estructura, por lo que las amplitudes del movimiento son reducidas.

La parte alta de la torre sur-poniente experimenta aceleraciones horizontales que en promedio son casi 7.5 veces las registradas en el sótano. Esto se atribuye en parte a que este elemento es relativamente flexible en comparación con el resto de la estructura, lo que hace que su vibración asociada al primer modo de traslación horizontal sea amplificada notablemente. Además, la parte alta de la torre responde dinámicamente como apéndice, lo que produce grandes amplificaciones.

Al extrapolar la respuesta de la estructura a la que podría esperarse para un sismo de gran intensidad, como el que podría considerarse para la revisión de la seguridad de la estructura, se encuentra que las fuerzas y deformaciones que se inducirían no deberían ser críticas para las condiciones actuales del edificio, aunque la seguridad de las torres principales requiere un análisis más a fondo.

Es recomendable mantener la instrumentación de la Catedral por un tiempo, para comprobar la estabilidad de la respuesta observada y para conocer más claramente el comportamiento de algunos elementos, en particular, las torres de la fachada principal.

RECONOCIMIENTOS

El estudio presentado se inserta dentro del proyecto de rehabilitación de la Catedral Metropolitana, que fue dirigido por Sergio Zaldívar Guerra, Coordinador de Proyectos Especiales del Consejo Nacional para la Cultura y las Artes. En su primera etapa, los instrumentos fueron proporcionados por el Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED) de la Secretaría de Gobernación, y su instalación y operación estuvieron a cargo de la Coordinación de Instrumentación de dicho Centro, bajo la dirección de Roberto Quaas y la responsabilidad directa de Mauricio Ortega. La red actual ha sido instalada y es operada por la Coordinación de Instrumentación Sísmica del Instituto de Ingeniería bajo la dirección de Leonardo Alcántara. En la primera etapa fueron responsables del procesamiento e interpretación de los resultados Mario Ordaz y Roberto Durán, por parte de la Coordinación de Investigación del CENAPRED.

REFERENCIAS

- Durán, R., M. Ordaz y R. Meli (1997), “Respuesta sísmica de la Catedral metropolitana de la ciudad de México”, Memoria del XI Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Veracruz, Ver.
- Gutiérrez, C. (1998), “Medición de velocidades de ondas de corte en el sitio de la Catedral de México” Informe del Centro Nacional de Prevención de Desastres a TGC Geotecnia.
- Meli, R. y A. Sánchez R. (2001), “Aspectos estructurales del proyecto de rehabilitación de la Catedral metropolitana. 1990-2000”, Informe técnico del Instituto de Ingeniería, UNAM, México.
- Ortega, M. *et al* (1998), “Instrumentación sísmica de la Catedral metropolitana de la ciudad de México”, Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED), Coordinación de Instrumentación Sísmica y Monitoreo Volcánico.
- Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal (1995), “Normas Técnicas Complementarias para diseño por sismo”, Gaceta Oficial del Departamento del Distrito Federal.
- Rivera, D. (2000), “Análisis de la respuesta sísmica registrada en la Catedral Metropolitana de la Ciudad de México”, Tesis de Maestría, DEPI, UNAM
- Rivera D., Miranda E. y Meli R. (1999), “Análisis de la respuesta sísmica registrada en la Catedral Metropolitana de la Ciudad de México”, Memoria del XII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Morelia, Mich.
- Rosenblueth, E. y R. Meli (1986), “The 1985 Mexico Earthquake: Causes and effects in Mexico City” ACI Journal, Vol 8, No 6, Detroit, mayo
- Sánchez R.A., R. Meli, F. Peña y G. Rodríguez (1998), “El uso de modelos de elemento finito en el proyecto de rehabilitación de la Catedral y del Sagrario de la ciudad de México”, Informe del Instituto de Ingeniería para la Coordinación de Obras Especiales del Consejo Nacional para la Cultura y las Artes.
- Tamez, E y E. Santoyo (2000) “Catedral y Sagrario de la ciudad de México. Corrección geométrica y endurecimiento del subsuelo. 1989-2000” Informe de TGC Ingeniería para la Coordinación de Obras especiales del Consejo Nacional para la Cultura y las Artes.