CAPÍTULO 4

ZONIFICACIÓN SÍSMICA Y EFECTOS DE SITIO

Introducción. La zonificación sísmica consiste en dividir una región en porciones, en cada una de ellas se especifican los parámetros constantes de diseño sísmico. Las leyes de atenuación reflejan la propagación de las ondas símicas en la roca de la corteza. El movimiento de la superficie del terreno en un sitio dado puede diferir radicalmente del que se tiene en la roca base, debido a alteraciones de las ondas causadas por efectos geológicos, topográficos y de rigidez del subsuelo. La importancia de estas alteraciones, llamadas en términos generales efectos locales, ha sido considerada cada vez más en los años recientes y ha conducido a la necesidad de realizar estudios de microzonificación de las áreas de asentamientos humanos, para detectar aquellas zonas que presentan problemas especiales.

4.1 Zonificación símica

Las zonas de suelos inestables tienen fenómenos locales extremos, donde la vibración sísmica puede provocar fallas de suelo como el de deslizamiento de ladera o problemas de licuación. Estas zonas deben identificarse mediante estudios geotécnicos específicos.

La presencia de estratos de suelo blando por los que transitan las ondas símicas para llegar a la superficie, impacta en la forma y las características de las ondas. Las ondas de periodo corto se filtran y se amplifican las ondas de periodo largo. En general, la intensidad sísmica aumenta en los sitios en donde el terreno es blando y se ha observado que los daños producidos por los sismos de gran magnitud han sido sistemáticamente más graves en estos sitios que en los de terreno firme.

Si existe un lugar en donde ocurren fenómenos de amplificación de ondas que impactan de una manera extraordinaria, ese es el valle de México. Este sitio se encuentra lejos de la costa del Pacífico, en donde se generan los sismos de gran magnitud y se ubica en una región de peligro sísmico moderado (Zona "B" según la regionalización de la figura 4.1). El peligro símico aumenta de la zona "A" hacia la "D".

Fig. 4.1 Regionalización símica de México.

Sin embargo, existen condiciones geológicas particulares que producen una amplificación generalizada de las ondas sísmicas en toda la región, independientemente del tipo de terreno. No obstante, el efecto de suelo local más importante es que las ondas que llegan al valle por la roca base sufren modificaciones y amplificaciones extraordinarias, al transmitirse hacia la superficie a través de los estratos de arcilla sumamente compresible que existen en las zonas correspondientes a los lechos de los antiguos lagos que hubo en el valle de México.

La importancia del problema se aprecia en la representación de la figura 4.2, donde se reproducen, en una misma escala, los acelerogramas registrados en distintos sitios del valle de México, durante un sismo de magnitud moderada, originado en la costa del Pacífico.

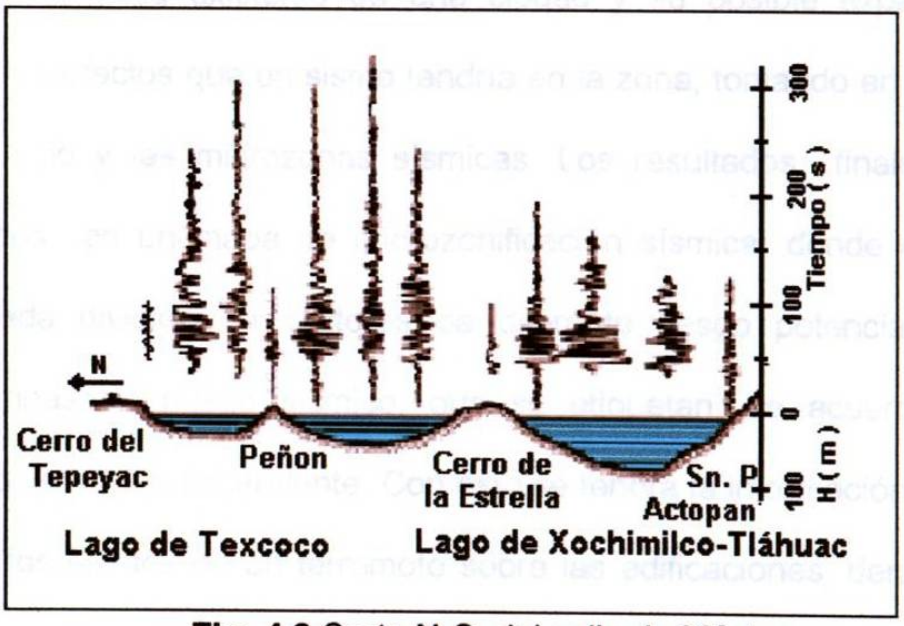

Fig. 4.2 Corte N-S, del valle de México

Consistentemente, las amplitudes del movimiento son varias veces mayores en terreno blando que en terreno firme. El tránsito por un grueso estrato de arcillas blandas filtra, y hace prácticamente desaparecer, las ondas que tienen frecuencias de vibración diferentes a la frecuencia fundamental del estrato. De esta manera el movimiento que llega a la superficie es prácticamente un movimiento armónico, con un periodo de vibración que es el del estrato de arcilla subyacente y que en el valle varía principalmente con el espesor de los estratos de arcilla.

4.2 Microzonificación

Los estudios de microzonificación sísmica consisten en estudios multidisciplinarios, que en general abarcan unos pocos kilómetros, delimitados por la zona urbana existente de una ciudad y su posible expansión. Se consideran los efectos que un sismo tendría en la zona, tomando en cuenta los efectos de sitio y las microzonas sísmicas. Los resultados finales quedan representados en un mapa de microzonificación sísmica, donde el área de estudio queda dividida en sectores de diferente riesgo potencial, también llamados zonas de riesgo sísmico, que se etiquetan, de acuerdo con su peligrosidad, en orden ascendente. Con esto se tendrá la información necesaria para inferir los efectos de un terremoto sobre las edificaciones, dentro de una ciudad.

La microzonificación sísmica se divide en cuatro fases para su estudio. La primera fase consiste en definir las zonas sismogéneticas, a partir del estudio de la sismicidad.

La segunda fase se refiere al desarrollo de diversos mapas de la zona, como: geológico, morfológico, geotécnico, de daños por sismos y otros; al integrar todos estos mapas se establecen las microzonas.

La tercera fase es el monitoreo sísmico utilizando diferentes tipos de registro: para determinar movimientos fuertes, débiles y la vibración ambiental en las microzonas estimadas en la segunda fase. Con esto se conocerán las diversas respuestas sísmicas que tendrán las diferentes microzonas (efectos de sitio).

Una de las técnicas más populares para estimar los efectos de sitio, en regiones de moderada a alta sismicidad, es el uso de la razón espectral (de espectros de Fourier) de registros de temblores (conocida como razón espectral estándar), obtenidos simultáneamente en estaciones ubicadas sobre suelo blando, con respecto a una estación de referencia ubicada en suelo firme (asumiéndola libre de efectos de sitio). Sin embargo, el registro de temblores fuertes, con un arreglo de acelerógrafos, conduce a un mayor tiempo de espera para llevar a cabo la evaluación, ya que la ocurrencia de temblores mayores (M_s>7) no es tan frecuente como la de los débiles. Por ello, una buena alternativa es utilizar razones espectrales de temblores débiles. Por otra parte, esta técnica tiene otra particularidad en zonas urbanas, debido al alto nivel de ruido ambiental provocado principalmente por el tráfico vehicular; esto limita el

período de obtención de registros útiles, a las horas en que el ruido disminuye (por ejemplo la madrugada), lo que aumenta, a su vez, el tiempo del trabajo de campo.

Otra técnica, introducida recientemente, es la estimación de la razón espectral entre las componentes horizontales y la vertical de un mismo registro (Técnica de Nakamura o REHV), propuesta originalmente por Nakamura para interpretar mediciones de vibración ambiental. Esta técnica fue aplicada a la parte intensa de las ondas "S", en registros de movimientos débiles por Lermo, y Chávez García. Los resultados sugieren que, sí el efecto de sitio es causado por una geología simple (la misma condición requiere para la razón espectral estándar) REHV proporciona una estimación gruesa de la frecuencia y la amplitud del primer modo de resonancia. La ventaja más importante de esta técnica es que elimina el requerimiento de una estación de referencia. Esto es muy usual cuando la estación de referencia falla o presenta efectos debido a condiciones topográficas, o bien cuando es diferente el registro obtenido por las estaciones en sitios de suelo blando.

El uso de vibración ambiental para obtener la estimación de la respuesta de un sitio fue introducido en Japón, por los años 50. A pesar de que algunos investigadores como Udwadia y Trifunac han hecho cuestionamientos sobre su utilidad, las mediciones de esta vibración presentan un alto atractivo para la caracterización de la respuesta de sitio, tanto por su sencillez de operación y su bajo costo, como por la rapidez con que permiten obtener resultados. Son básicamente tres las técnicas más usadas para el análisis de los registros de

vibración ambiental: la determinación de la frecuencia máxima, directamente desde la densidad espectral de potencia; el cálculo de la razón espectral, siguiendo la técnica recién descrita para registros de temblores y la técnica REHV. Las tres técnicas fueron revisadas por Lermo y Chávez-García (1994), quienes comparan resultados de vibración ambiental contra la razón espectral estándar de registros de temblores. Ellos concluyen que esta vibración, cuando se analiza con REHV, permite la determinación, con buena precisión, del período dominante (T_o) de sedimentos sujetos a amplificación dinámica en un intervalo de frecuencias entre 0.3 y 5 Hz, junto con una estimación preliminar del nivel de amplificación (Ar).

La cuarta fase consiste en la clasificación de las microzonas por orden de peligrosidad y seleccionar puntos idóneos para la construcción y puesta en marcha de estaciones acelerográficas permanentes, si es que se cuenta con este equipo, así como establecer algunas recomendaciones para el uso de estos mapas.

La micozonificación de la ciudad de México ha dado lugar a su subdivisión en tres zonas, como se representa en la figura 4.3. La zona de *Lomas* es de terreno firme y de peligro sísmico menor. La zona del *Lago*, la cual tiene depósitos de arcilla de por lo menos 20 m de espesor y corresponde al peligro símico mayor. Entre estas dos zonas existe una *Transición*, donde los estratos de arcilla son de menor espesor y producen amplificaciones importantes, pero menos graves que en la zona del Lago.

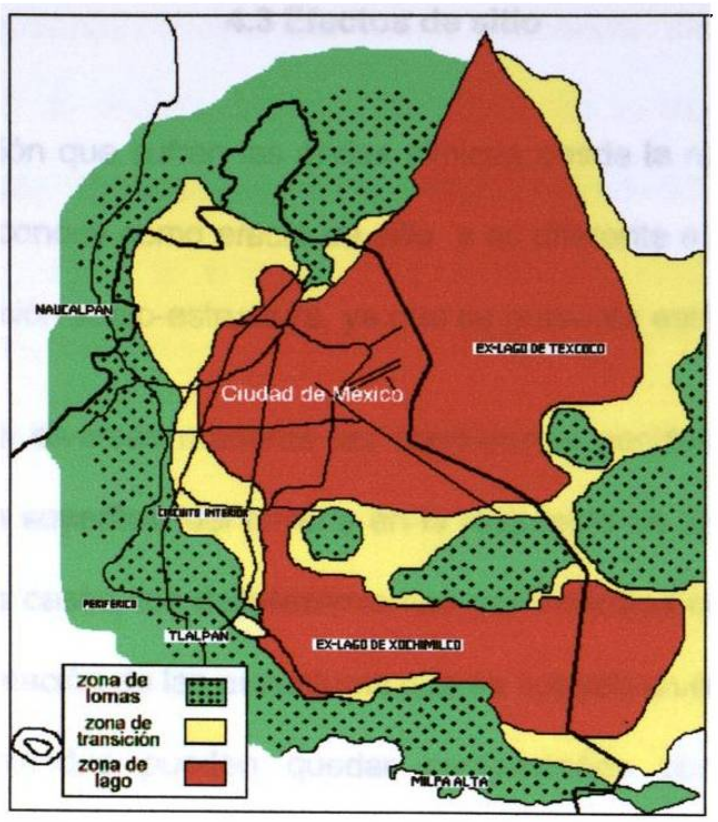

Fig. 4.3 Zonificación del Distrito Federal, según el tipo de suelo.

La microzonificación sísmica persigue la finalidad de evaluar los riesgos sísmicos minuciosamente para lograr una aceptable planificación regional y urbanística y para ponderar los niveles de las fuerzas o movimientos para la concepción de estructuras antisísmicas. La mayoría de los estudios sobre la distribución de las calamidades causadas por los sismos indican que las zonas de daños intensos están bien localizadas y que la envergadura de esos daños puede cambiar bruscamente, en una distancia apenas de 0.5 a 1 kilómetro.

Se ha observado que las intensidades de las sacudidas sísmicas varían considerablemente a distancias muy cortas. Esto ha llevado a pensar que el factor esencial para la evaluación del daño de las estructuras son las condiciones del subsuelo local, es decir, los *efectos de sitio*.

4.3 Efectos de sitio

A la transformación que sufren las ondas símicas desde la roca base, hasta la superficie, se le conoce como *efecto de sitio* y es diferente e independiente del efecto de interacción suelo-estructura, ya que se presenta esté o no un edificio.

Pueden influir de diversas maneras las condiciones geológicas y de suelos subyacentes a la superficie del terreno en la respuesta de un lugar dado a un sismo, En ciertos casos, los desplazamientos permanentes del terreno pueden originar la deformación de las estructuras que se apoyan en ellos. Por ejemplo, los suelos granulados pueden quedar compactados por las vibraciones suscitadas por el sismo, a consecuencia de lo cual pueden producirse asentamientos importantes y diferenciales de la superficie del terreno. En algunos casos, donde ocurren materiales granulares sueltos y saturados, la compactación puede engendrar presiones hidrostáticas de magnitud suficiente como para provocar una licuación del suelo, produciendo grandes asentamientos e inclinaciones de las estructuras. Una combinación de los esfuerzos dinámicos unidos a las presiones intersticiales en los sedimentos de arcilla blanda y arena, pueden causar grandes deslizamientos de tierra. Se asocian también efectos similares, pero a gran escala, con los desplazamientos de falla, cuando las estructuras están situadas en su traza. La mayoría de estos efectos se toman en consideración en los métodos de microzonificación sísmica, conjuntamente con los relacionados con la sacudida del terreno.

Las amplitudes y formas de las ondas sísmicas dependen del mecanismo focal y de la cantidad de energía liberada, así como de la trayectoria y de las condiciones locales. El mecanismo focal define la manera en que la energía es irradiada en el espacio y en el tiempo. Es indudable que la distribución de la intensidad sísmica está ligada con las características de la ruptura. Sin embargo, las ondas sísmicas, una vez emitidas por la fuente, dependen fundamentalmente de las propiedades de los medios en que se propagan y de las dimensiones de la falta de homogeneidad o irregularidades que encuentra en su trayecto. Esto es aplicable al describir los efectos de las condiciones locales.

Si el cambio de propiedades en una interfase es grande o si el tamaño de las irregularidades es comparable o mayor que la longitud de las ondas incidentales, las reflexiones, las refracciones y la difracción de las ondas ocasionarán cambios significativos en el movimiento. Interesa entender la naturaleza de esos cambios, pues pueden dar lugar al fenómeno de amplificación local y a variaciones significativas del movimiento del terreno en distancias relativamente pequeñas. Además, existe evidencia de los efectos locales en el estudio de la distribución espacial del daño en temblores. Si bien el daño depende de la calidad de las construcciones, en muchos casos los daños severos están asociados a fenómenos de amplificación.

Los efectos de las formaciones geológicas sobre los movimientos símicos existen y pueden ser muy grandes. Dos ejemplos de tales efectos son:

a) El área de San Francisco, California, en la que las amplificaciones sobre sedimentos no consolidados han sido responsables de variaciones de intensidad de hasta dos grados en escala MM, durante los terremotos de San Francisco de 1906, Loma Prieta de 1989 y Northridge en 1994.

b) El valle de la ciudad de México, donde los depósitos de arcilla lacustre indujeron fenómenos de amplificación que provocaron pérdidas de vidas humanas y económicas durante el terremoto de 1985. La respuesta de los sedimentos de ese valle ha sido ampliamente estudiada.

En 1994 ocurrió el terremoto de Northridge que ha sido el desastre natural más costoso en los Estados Unidos de América. Aun así, el costo no fue más alto debido a que el daño en los edificios fue menor que el esperado, porque el suelo absorbió una parte significante de la energía de la onda incidente, debido a un comportamiento no lineal en su respuesta. El aumento de amortiguamiento fue tan importante que se equiparó a un mecanismo de aislamiento de base pasivo y el número total de los edificios severamente dañados se redujo en un factor de dos o más.

El acoplamiento del periodo natural de un edificio con el del suelo causa una amplificación de la respuesta. A este fenómeno se le conoce con el nombre de *resonancia* y se hizo presente durante el sismo de la Ciudad de México de 1985. Dicho terremoto proporcionó una amplia experiencia a los ingenieros sísmicos del mundo, ya que los edificios de esa ciudad sufrieron daños debidos a movimiento de periodos relativamente largos, entre 1 y 3 segundos. Hubo

una doble resonancia, primero entre la onda símica incidente y la estructura de la cuenca debajo de la ciudad y después, entre el movimiento en la superficie y los edificios.

La resonancia entre el lecho rocoso y los sedimentos superficiales fue producida por una capa de arcilla de 20 a 30 m de espesor, que provocó una amplificación de 12.3 veces· las ondas sísmicas, llevando a aceleraciones comparables a las del epicentro localizado a 400 Km. El colapso de muchos de los edificios pudo haber ocurrido debido a que la aceleración producida por el sismo y su duración crearon articulaciones plásticas en las columnas superiores de los edificios colapsados. Este mecanismo de falla se debe, entre otras causas, a la degradación de la rigidez, debido a la fatiga de los elementos, ocasionada por la resonancia ocurrida entre el suelo y el edificio.

La mayoría de los inmuebles colapsados o que sufrieron daños graves durante el sismo de 1985 de la ciudad de México, eran edificios flexibles con periodos iniciales mayores o iguales que 0.7 s y debido a la larga duración del sismo (alrededor de 180 segundos) estos incursionaron dentro del intervalo de comportamiento no lineal, aumentando así su periodo, acercándolo cada vez más al del terreno. Esto intensificó las aceleraciones que experimentaron hasta llegar a la resonancia. En cambio, los edificios antiguos, construidos en la zona del lago, no sufrieron daño debido a su corta altura (dos o tres niveles) que hizo que sus periodos naturales (menores a 0.5 s) quedaran fuera del intervalo de resonancia del terreno.

El concepto de que la aceleración del terreno y la incidencia del daño ocasionado en los edificios estén relacionados con las condiciones locales del suelo se ilustra en la figura 4.4, donde se muestran las máximas aceleraciones del terreno en lugares situados, aproximadamente, a una misma distancia de la zona de liberación del a energía. Se observa que las aceleraciones en lugares adyacentes tuvieron variaciones hasta del cien por ciento por causa de las diferentes condiciones de suelo existentes.

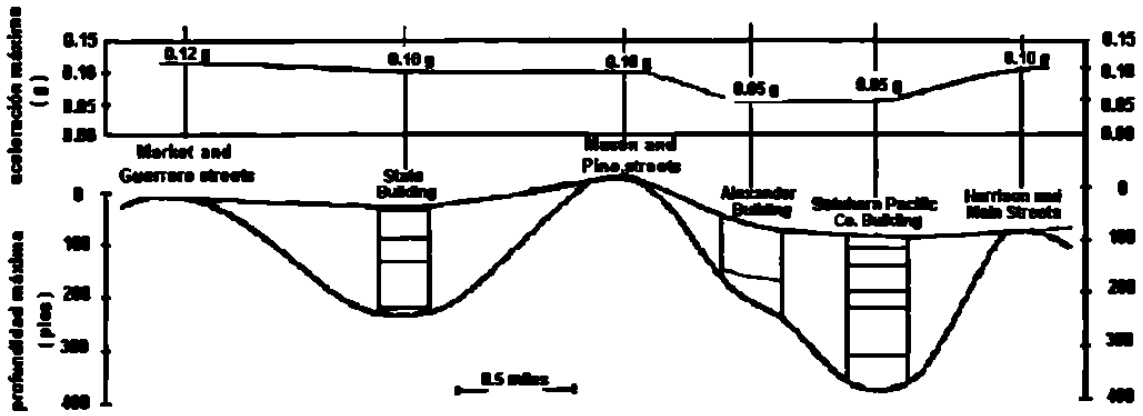

Fig. 4.4 Condiciones de suelo y aceleraciones máximas registradas durante el sismo de San Francisco, de 1957.

Europa no está exenta de este tipo de particularidades del terreno; las características geotécnicas del suelo de Barcelona, por ejemplo, han sido estudiadas por Cid (1999) quien realizó una zonificación símica basada en métodos de simulación numérica de los efectos locales clasificando la ciudad en cuatro zonas correspondientes al afloramiento rocoso (Zona 0), que se toma de referencia, materiales deltaicos (Zona I), y las Zonas II y III que se caracterizan por materiales aflorantes pleistocenos y que se diferencian por la presencia de

diferentes espesores de materiales terciarios que diferencian también la respuesta sísmica.

Para este caso, el código de diseño propone espectros elásticos de tres tipos de suelos:

i) Roca compacta, suelo cementado o granular muy denso, cuya velocidad de propagación de las ondas elásticas transversales o de cizalla V_s> 750 m/s.

ii) Terrenos granulares o cohesivos de compacidad media a dura, cuya velocidad de onda de corte es de 750 m/s<V_s< 400 m/s.

iii) Suelo granular suelto a medio, o suelo cohesivo medio a blando, cuya velocidad de propagación es V_s<400m/s.

4.4 Espectros de respuesta

Los espectros de respuesta fueron inicialmente propuestos por Biot, en el año 1932 y luego desarrollados por Housner, Newmark y muchos otros investigadores. En la actualidad, el concepto de espectro de respuesta es una herramienta importante de la dinámica estructural, de gran utilidad en el área del diseño sismorresistente. De manera general, un espectro es *un gráfico de la respuesta máxima (expresada en términos de desplazamiento, velocidad, aceleración, o cualquier otro parámetro de interés) que produce una acción dinámica determinada, en una estructura u oscilador, de un grado de libertad.* En los espectros, se representa en abscisas el periodo propio de la estructura, o

la frecuencia, según el caso, y en las ordenadas la respuesta máxima calculada para uno o varios factores de amortiguamiento ξ. La figura 4.5, indica, de una manera gráfica, el método para la determinación del espectro de respuesta.

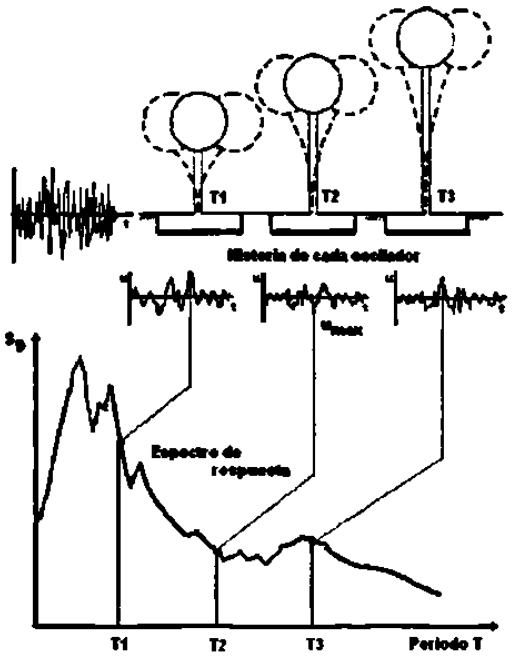

Fig. 4.5. Gráfico indicativo del método de determinación del espectro de respuesta.

La importancia de los espectros en el diseño de estructuras radica en el hecho de que estos gráficos condensan la compleja respuesta dinámica en un parámetro clave: los valores de respuesta máxima, que son usualmente los requeridos por el diseñador para el cálculo de las estructuras. Cabe aclarar, sin embargo, que los espectros de respuesta, desafortunadamente, debido a la forma en que se construyen, omiten información importante, dado que los efectos del terremoto sobre la estructura dependen no sólo de la respuesta máxima sino también de la duración del movimiento y del número de ciclos con demanda significativa de desplazamientos.

4.4.1 Tipos de espectros

Como se mencionó con anterioridad, el concepto de espectro ha ganado una amplia aceptación como herramienta de la dinámica estructural. Es por ello que se han desarrollado varios tipos de espectros, los cuales presentan características diferentes y se utilizan con distintos objetivos. En particular se discutirán tres de los espectros más comunes:

a) *Espectros de respuesta elástica.* Representan parámetros de respuesta máxima para un terremoto determinado y usualmente incluyen varias curvas que consideran distintos factores de amortiguamiento. Vale la pena mencionar, que para la construcción de este tipo de espectros se considera que el material tiene un comportamiento elástico lineal y que no se presentan efectos de segundo orden. Estos espectros se utilizan fundamentalmente para estudiar las características del terremoto y su efecto sobre las estructuras. Las curvas de los espectros de respuesta presentan variaciones bruscas, con numerosos picos y valles, que resultan de la complejidad del registro de aceleraciones del terremoto.

b) *Espectros de respuesta inelástica.* Este tipo de espectros son similares a los anteriores pero en este caso se supone que el oscilador de un grado de libertad exhibe comportamiento no-lineal, es decir que la estructura puede experimentar deformaciones en el rango plástico por acción del terremoto. Este tipo de espectros son muy importantes en el diseño sismorresistente, dado que, por razones prácticas y económicas, la mayoría de las

construcciones se diseñan según la hipótesis de que incursionarán en campo plástico. Como ejemplo, de este tipo se puede mencionar los espectros de ductilidad; recordando que ductilidad de desplazamientos es la relación entre el desplazamiento máximo que experimenta la estructura y el desplazamiento de fluencia.

Estos espectros representan la ductilidad requerida por un terremoto dado, en función del periodo de vibración de la estructura y se grafican usualmente para distintos niveles de resistencia. También, se construyen espectros de aceleración, desplazamiento de fluencia o desplazamiento último de sistemas inelásticos, en donde se consideran distintos niveles de ductilidad o distintos tipos de comportamiento histerético de la estructura, como se indica en la figura 4.6.

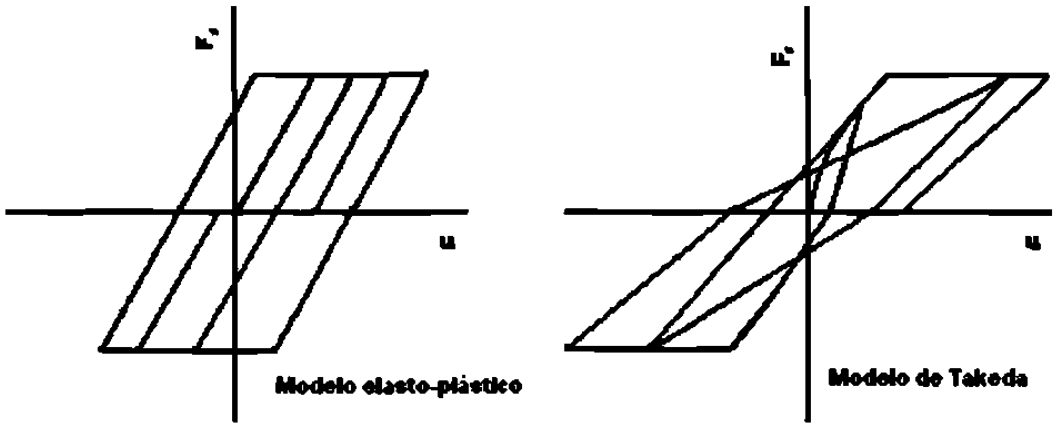

Fig. 4.6. Ejemplos de modelos de histéresis.

Los modelos histeréticos indican la relación entre la fuerza restitutiva F_s y el desplazamiento u. En una estructura lineal y elástica se verifica que $F_s = K\,u$, siendo K la rigidez, mientras que en sistemas no-lineales que incursionan en

el rango plástico, la fuerza F_s es una función no-lineal de u y de la historia de desplazamientos experimentados previamente, lo que se conoce como fenómeno de histéresis. En este último caso, la relación F_s - u es mucho más compleja y se define mediante modelos histeréticos como los indicados en la figura 4.6.

c) Espectros de diseño. Las construcciones no pueden diseñarse para resistir un terremoto en particular, en una zona dada, puesto que el próximo terremoto probablemente presentará características diferentes. Por lo tanto, los espectros de respuesta elástica o inelástica, descriptos previamente, no pueden utilizarse para el diseño sismorresistente. Por esta razón, el diseño o verificación de las construcciones sismorresistentes se realiza a partir de espectros que son suavizados (no tienen variaciones bruscas) y que consideran el efecto de varios terremotos, es decir que representan una envolvente de los espectros de respuesta de los terremotos típicos de una zona. Los espectros de diseño se obtienen generalmente mediante procedimientos estadísticos, cuya descripción detallada escapa al alcance de este trabajo. Es muy importante distinguir entre los espectros de respuesta, que se obtienen para un terremoto dado, y los espectros de diseño, los cuales se aplican al cálculo y verificación de estructuras y representan la sismicidad probable del lugar.

d) Se han desarrollado otros tipos de espectros, como los espectros de piso, que son de utilidad para ciertas aplicaciones específicas.

4.4.2 Factores que afectan los espectros de respuesta

Las curvas espectrales dependen, como ya se mencionó, del periodo de vibración de la estructura y del factor de amortiguamiento considerado. Es obvio, también, que los resultados serán además afectados por las características particulares del registro de aceleración. Son muchas las variables que pueden influir de manera importante sobre lo registros de aceleración y por ende, sobre los espectros de respuesta. Entre las más importantes se pueden mencionar: los valores máximos del movimiento del terreno (aceleración, velocidad y desplazamiento), el contenido de frecuencias del terremoto, la duración del movimiento fuerte, el mecanismo de generación del terremoto, la magnitud, el tipo de suelo, etc. Esto se ve reflejado, por ejemplo, en las curvas de aceleración espectral, graficadas en la figura 4.7, que corresponden a tres terremotos diferentes.

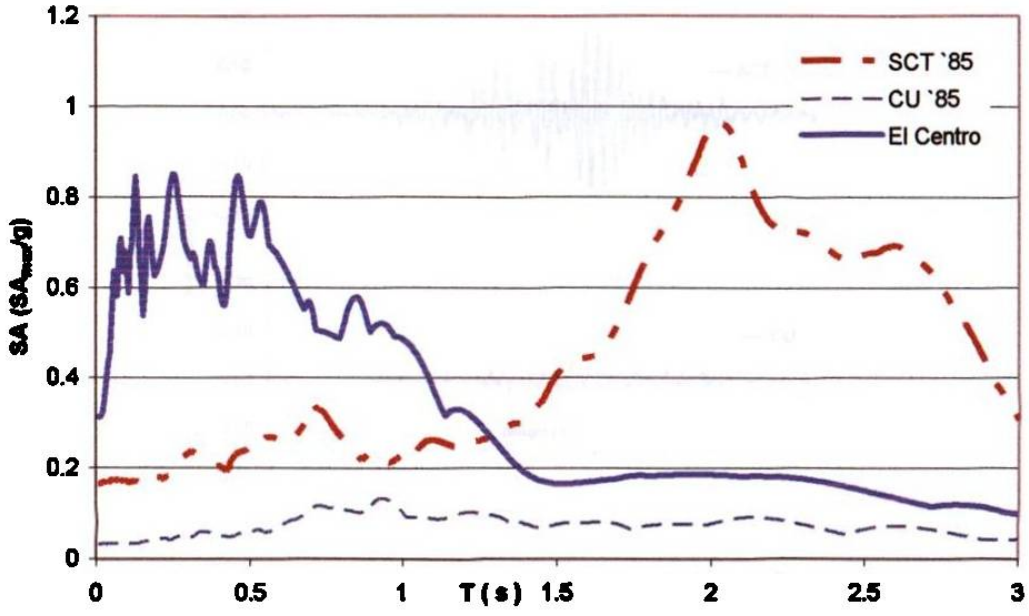

Fig. 4.7 Comparación de espectros de pseudo aceleración para distintos terremotos (factor de amortiguamiento 5%).

Puede observarse claramente, en esta figura, cómo una misma estructura (igual periodo de vibración e igual factor de amortiguamiento) experimentará aceleraciones máximas notablemente diferentes para los distintos terremotos.

También, como ya se mencionó una de las variables que más impactan en el diseño sismorresistente es el tipo de suelo, lo que se definió como efectos de sitio. Los estudios realizados con registros de aceleración, tomados en distintos terremotos y en distintos lugares, muestran que en estratos de suelos blandos puede originarse una amplificación del movimiento con respecto al movimiento medido en la roca o en suelos firmes.

La figura 4.8 muestra los registros medidos en dos estaciones diferentes, una localizada sobre un estrato rocoso (CU) y la otra ubicada sobre un estrato de arcillas blandas (SCT), en la zona que se encuentra construida sobre un antiguo lago seco.

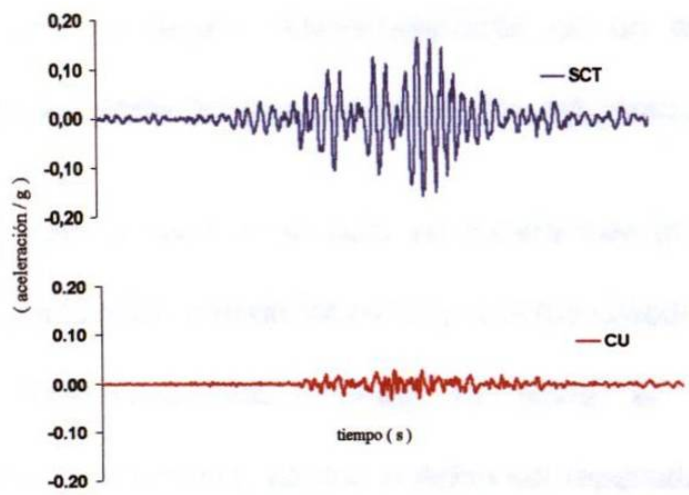

Fig. 4.8 Registros de aceleración de SCT y CU (1985)

Se observan las diferencias significativas de ambos registros. Su efecto en los espectros de respuesta se pone en evidencia en la figura 4.9.

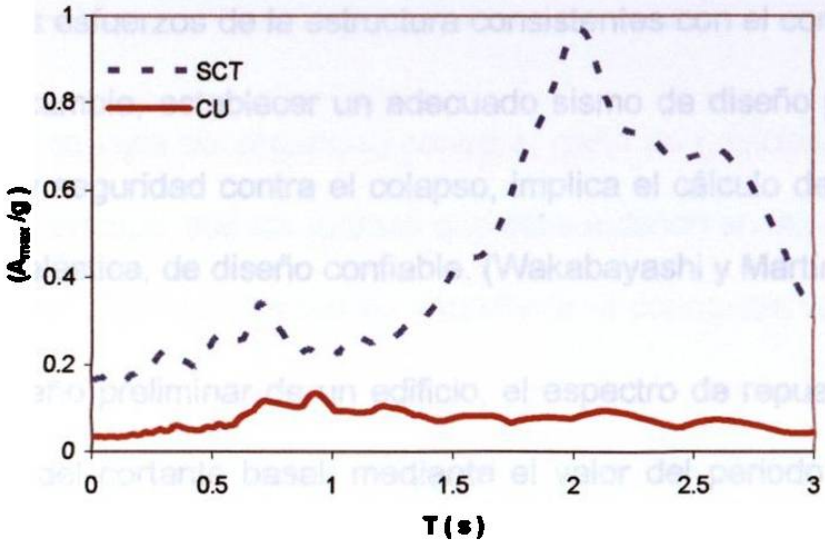

Fig. 4.9 Espectros de aceleración correspondientes a los registros de la figura 4.19 (terremoto de Michoacán, México, 1985).

4.4.3 Espectros de diseño

Para definir el sismo de diseño sismorresistente de un edificio se suelen considerar tres estados límite de las estructuras, con respecto a su respuesta:

a) *El Nivel de servicio*, o nivel en el cual se espera que el edificio, continúe proporcionando la función primordial para la cual fue creado.

b) *El Nivel de daño esperado*, donde se limita el daño a niveles predeterminados de economía, ya que pueden ser reparados.

c) *El Nivel de seguridad contra el colapso*, donde ningún nivel de daño que sufra el edificio ha de poner en riesgo la vida de sus ocupantes.

Para mantener los límites de servicio de los edificios, el espectro de respuesta de diseño debe ajustarse a las condiciones de sitio, a los valores esperados del amortiguamiento, a métodos para el cálculo de los periodos naturales de los edificios y de los esfuerzos de la estructura consistentes con el comportamiento esperado. En cambio, establecer un adecuado sismo de diseño para estados límite de daño y seguridad contra el colapso, implica el cálculo de un espectro de respuesta inelástica, de diseño confiable. (Wakabayashi y Martínez, 1988).

Al hacer un diseño preliminar de un edificio, el espectro de repuesta se utiliza para el cálculo del cortante basal, mediante el valor del periodo fundamental estimado con la fórmula de Rayleigh o con una fórmula empírica. Con el periodo fundamental del edificio que se pretende diseñar, la información del suelo y utilizando el espectro que corresponda, se determina la aceleración de diseño que sirve para el cálculo de la fuerza cortante basal.

Con el conocimiento de las características sísmicas del lugar y las propiedades dinámicas del suelo; entre ellas el módulo dinámico de elasticidad a cortante y la velocidad de onda "s", los profesionistas de diseño pueden estimar los efectos símicos de la estructura del edificio y su cimentación, incluyendo su interacción con el suelo (Zeevaert, 1991)

Durante el sismo de México, de 1985, se puso de manifiesto que no es posible aplicar en forma indiscriminada un enfoque simplista para determinar el periodo fundamental de una estructura, el cual se emplea para la selección apropiada del valor del cortante basal. Las ecuaciones empíricas que evalúan el periodo en función del número de niveles de un edificio, basándose en relativamente

pocos datos experimentales de vibraciones medidas en edificios existentes, puede conducir a valores erróneos del periodo fundamental de la estructura. Además, resulta importante considerar el efecto rigidizante de los muros interiores, que por lo general se desprecia al calcular el periodo de esa forma.

Desde el punto de vista de seguridad contra el daño de edificios, lo que más afecta de los terremotos, son las fuerzas que ellos inducen en las estructuras y para la estimación de esas fuerzas es importante el conocimiento del periodo fundamental. En la parte superior de un edificio, la máxima aceleración espectral "a" será igual a la aceleración espectral correspondiente al periodo fundamental (figura 4.10) y la máxima fuerza lateral será aproximadamente igual a W a / g, donde W es el peso de la estructura y g la aceleración de la gravedad. Para edificios de varios niveles, otros modos de vibración, además del primero, influyen en la respuesta, pero la del primer modo proporciona una muy buena aproximación de las fuerzas inducidas.

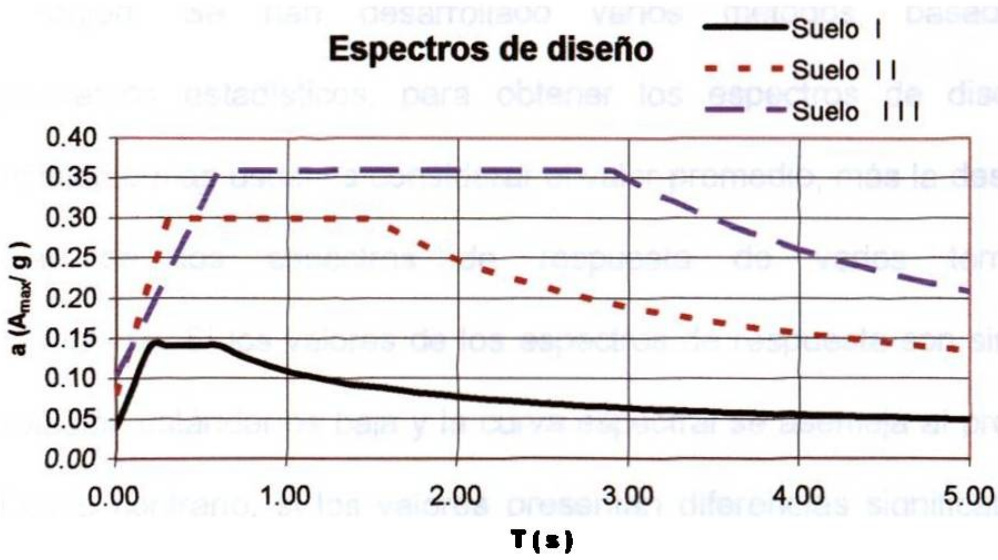

Fig. 4.10 Espectros de diseño, para diferentes tipos de suelos.

Debido a que las aceleraciones espectrales varían con el periodo de la estructura y las formas de los espectros varían dependiendo de las condiciones del suelo, edificios con el mismo periodo, desplantados en lugares diferentes, pueden estar sujetos a diferentes fuerzas laterales dinámicas máximas.

a) *Espectros de diseño de aceleración.* Con anterioridad se han descrito, en forma general, los espectros de diseño y ahora se verá con mayor detalle este concepto. Los espectros son una herramienta de gran utilidad en el diseño de construcciones sismorresistentes, debido a que el ingeniero estructural puede estimar el valor máximo de la respuesta (usualmente en términos de aceleración) sin necesidad de evaluar la historia temporal completa. Sin embargo, en el diseño de estructuras no pueden utilizarse los espectros de respuesta, ya que éstos se obtienen para un terremoto dado. Las curvas espectrales para diseño deben considerar el efecto de varios terremotos, es decir, deben ser representativos de la sismicidad propia de cada región. Se han desarrollado varios métodos, basados en procedimientos estadísticos, para obtener los espectros de diseño. El procedimiento más usual es considerar el valor promedio, más la desviación estándar de los espectros de respuesta de varios terremotos representativos. Si los valores de los espectros de respuesta son similares, la desviación estándar es baja y la curva espectral se asemeja al promedio. En el caso contrario, si los valores presentan diferencias significativas, la desviación estándar es alta y la curva espectral se acerca al valor máximo, o

incluso puede superarlo. De modo que este procedimiento toma en cuenta la mayor o menor dispersión de los datos y conduce a resultados confiables.

Para efectos del diseño, resulta conveniente que las curvas espectrales se suavicen con líneas envolventes, para evitar los valles o variaciones bruscas que surgen de las formas complejas que presentan los espectros de respuesta. Es por ello que los espectros de diseño que definen los códigos están formados por una serie de líneas o curvas, las cuales pueden expresarse mediante ecuaciones simples. Los espectros de diseño de aceleración suelen presentar una rama lineal creciente, con origen en un valor de aceleración máxima, correspondiente a la aceleración del terreno, luego una zona de aceleración constante, o meseta, con un valor 2 a 3 veces superior a la aceleración máxima del terreno y, finalmente, una o más curvas decrecientes.

b) *Espectros de diseño de desplazamiento.* En la última década se ha desarrollado un nuevo criterio de diseño para construcciones sismorresistentes que se basa en desplazamientos. Es decir, que el ingeniero estructural, en lugar de evaluar la demanda sísmica en términos de fuerzas laterales (o aceleraciones) realiza el diseño a partir de la demanda de desplazamiento lateral inducida por la acción sísmica. Este nuevo criterio aún no se ha desarrollado completamente, pero se espera que en el futuro reemplace al método tradicional, basado en fuerzas, debido a que permite considerar en forma explícita distintos niveles de daño. El método basado en desplazamientos requiere, obviamente, de un espectro de diseño de desplazamientos. Es por ello que muchos investigadores

trabajan actualmente para evaluar y proponer espectros de diseño de desplazamiento.

El concepto de espectros, en sus distintas modalidades, es una herramienta de gran utilidad en la ingeniería sísmica, ya sea para comprender y evaluar el efecto de los terremotos sobre las construcciones, así como también para estimar la demanda sísmica en el diseño de estructuras. Es por ello que resulta de suma importancia para el ingeniero estructural comprender la teoría que lo fundamenta, los métodos para su obtención, el campo de validez y la forma práctica de empleo.

4.5 Beneficios esperados

En países como el nuestro, donde, debido al crecimiento excesivo y descontrolado de las ciudades y al nivel económico de la población, se construyen viviendas sin asesoramiento técnico y de forma irregular y, por lo tanto, sin la adecuada seguridad sísmica, los estudios de microzonificación sísmica desempeñan un papel de gran importancia para la seguridad de la población. Estos estudios permiten determinar el comportamiento de las diferentes zonas, tomar las precauciones necesarias, e incluso establecer prohibiciones de construcción de cierto tipo de edificaciones, en algunas zonas de la ciudad.

4.6 Espectros de respuesta para sitios no instrumentados y efectos de interacción suelo–estructura

Es sabido que la flexibilidad del suelo incrementa el periodo fundamental y modifica el amortiguamiento de la estructura supuesta con apoyo indeformable, es decir, en la condición de campo libre. Avilés y Pérez–Rocha (1996) indican que para estructuras esbeltas se tienen incrementos de consideración en el periodo y amortiguamiento estructurales. En cambio, para relaciones de esbeltez pequeñas, encontraron que los incrementos en el periodo no son significativos, pero que van acompañados de reducciones del amortiguamiento que pueden introducir incrementos importantes en las ordenadas del espectro de respuesta.

Obtener espectros de sitio, a partir de instrumentaciones, da una idea más realista del comportamiento de las estructuras en diferentes tipos de suelo. El análisis de los registros de aceleración que se obtienen de las instrumentaciones, permite, en ocasiones, sentar bases para considerar una reducción racional del coeficiente sísmico reglamentario, sin menoscabar la seguridad estructural. En principio, estas reducciones se reflejarían principalmente en la respuesta dinámica de los modos superiores estructurales. Este efecto reductivo, se debe a la interacción cinemática entre el suelo y la cimentación. Ya se han iniciado estudios detallados que permitan, en breve plazo, incorporar estos efectos en el reglamento para la construcción de obras civiles en el valle de México.