

# CRITERIOS DE DISEÑO SÍSMICO: CONSIDERACIONES PARA SUELOS BLANDOS

*Mario Ordaz<sup>1, 2</sup>, Eduardo Reinoso<sup>1, 3</sup> y Luis Eduardo Pérez-Rocha<sup>3</sup>*

<sup>1</sup> Instituto de Ingeniería, UNAM

<sup>2</sup> Centro Nacional de Prevención de Desastres, CENAPRED

<sup>3</sup> Centro de Investigación Sísmica, AC

## ABSTRACT

Some problems associated to specification of earthquake design spectra for very soft sites are discussed, having Mexico City as an example. The following issues are explored: 1) the effect of earthquake sources in the selection of design earthquakes; 2) the fact that spectral shapes at soft sites change with earthquake magnitude, which presents complexities if a multi-level design approach is desired; 3) the geographical variability of spectral shapes throughout the city for a given earthquake, a fact that leads to the necessity of a careful microzoning for design purposes; 4) the estimation of reduction factors due to ductility at soft soils; 5) the importance of the long strong-shaking duration usually associated to soft sites. Although for some of the problems possible solutions are discussed, for others, the problem is just stated.

## RESUMEN

Se discuten algunos problemas asociados a la especificación de espectros de diseño sísmico para suelos muy blandos y se toman como ejemplos algunos sitios de la ciudad de México. Se exploran los siguientes aspectos: 1) el efecto de la fuente sísmica en la selección de sismos de diseño; 2) el hecho de que la forma de los espectros en suelo blando cambia con la magnitud del sismo, lo que presenta dificultades si se desea realizar un diseño multinivel; 3) la variación geográfica de la forma espectral a lo largo de la ciudad para un sismo dado, un hecho que lleva a la necesidad de microzonaciones más detalladas con propósitos de diseño; 4) la estimación de factores de reducción debidos a ductilidad en suelos blandos; 5) la importancia de la gran duración del movimiento intenso usualmente asociado a terrenos blandos. Aunque para algunos de estos problemas se discuten posibles soluciones, para otros sólo se plantea el problema.

## INTRODUCCIÓN

La especificación de un espectro de diseño sísmico ha sido a lo largo de la historia una mezcla de ciencia y criterio ingenieril. El diseño antisísmico debe hacerse para resistir un evento relativamente infrecuente y el tamaño de futuros terremotos no puede ser predicho determinísticamente. No hay, sin embargo, un acuerdo sobre qué tan infrecuente este evento debe ser. Algunos valores de periodos de retorno o probabilidades anuales de excedencia son comúnmente tomados como razonablemente seguros. Pero es muy probable que estos valores hayan sido adoptados porque su uso conduce a niveles de diseño que parecen razonables, a juzgar por el desempeño de estructuras que han sido sometidas a sismos severos. Pocas personas ocuparían un inmueble cuya resistencia real tenga una probabilidad de excedencia de 10 % en 50 años. Coeficientes basales de diseño de, digamos, 0.2 son considerados razonables para ciertas clases de edificios aún cuando para su uso en diseño tienen que ser invocadas grandes reducciones (en ocasiones un factor de 10) con respecto al espectro de respuesta elástico. Entonces, ¿por qué un coeficiente de diseño de 0.2 se considera razonable? Principalmente porque las estructuras diseñadas con esta capacidad han resistido movimientos del terreno intensos.

Mas aún, suponiendo que el tamaño del sismo de diseño es conocido, un cuidadoso análisis dinámico puede dar indicaciones sobre la resistencia estructural requerida, pero la mayoría de las teorías tendrían problemas para responder qué parámetros de diseño deberían usarse para alcanzar esa resistencia. La ductilidad y la sobrerresistencia juegan un papel importante pero cuantificar sus efectos e implicaciones en el diseño es todavía motivo de controversia. Por ello, históricamente el juicio ingenieril ha sido, y seguirá siendo, de fundamental importancia para decidir qué espectro de respuesta debe incluirse en los reglamentos, juicio ingenieril enriquecido, por supuesto, con observaciones cuidadosas y análisis de daño inducido a edificios de diseño conocido.

Aún cuando la presencia de suelos blandos es ahora reconocida como un factor clave que afecta el comportamiento estructural, resulta que una gran parte de la experiencia obtenida a partir de edificios dañados y de observaciones del movimiento sísmico vienen de sitios de terreno

firme, por lo que muchas recomendaciones de diseño, especialmente aquellas de naturaleza empírica, pueden no ser apropiadas para terrenos blandos. Estos sitios presentan problemas específicos que impiden la extrapolación de criterios (el juicio ingenieril) derivados de otras condiciones de sitio.

En este artículo exploramos algunos de los problemas particulares asociados a los espectros de diseño sísmico en suelos muy blandos. Usamos ejemplos de la ciudad de México que es probablemente un caso extremo de este tipo de suelos; sin embargo, algunas de las dificultades que aquí se discuten son comunes a otras ciudades en el mundo. Primero se muestra cómo la existencia de suelos blandos complica la selección de sismos de diseño, en el sentido de que diferentes fuentes sísmicas pueden producir movimientos de diversa naturaleza en un sitio dado, por lo que no puede haber, de hecho, un solo sismo de diseño. Después, se discute el hecho de que la forma de los espectros cambia con la magnitud del sismo, lo que presenta complicaciones si se desea aplicar un diseño multinivel. Se analiza también la variación geográfica del movimiento del terreno a lo largo de la ciudad para un sismo dado, un hecho que lleva a la necesidad de un estudio de microzonación cuidadoso con fines de diseño sísmico. Se explora también la estimación de factores de reducción debidos a la ductilidad en suelos blandos; existen, en este sentido, muchas diferencias con respecto a las predicciones de reglas comúnmente usadas y se propone una regla que se ajusta mejor a los datos observados. Finalmente, se discute la importancia de la gran duración del movimiento fuerte, un hecho usualmente asociado a suelos blandos y se propone un posible camino para tomar en cuenta los efectos de energía disipada en los procedimientos de diseño.

## CARACTERÍSTICAS DEL MOVIMIENTO DEL TERRENO

En esta sección se discuten los problemas relativos a la forma de los espectros de respuesta para suelos blandos. Se muestra cómo estos cambios de forma, derivados de diversos factores, afectan la especificación de espectros de diseño.

### Efectos de diferentes fuentes sísmicas

Históricamente, la ciudad de México ha sido afectada principalmente por temblores originados en las costas del Pacífico. A este grupo pertenece el terremoto de Michoacán ocurrido el 19 de septiembre de 1985. Sin embargo, en años recientes, se ha reconocido el potencial destructivo de otro tipo de sismos (Rosenblueth *et al.*, 1989). Este es el caso de sismos de falla normal de profundidad intermedia cuyos hipocentros se localizan por debajo de los estados del sur del país. El mayor de estos eventos registrado en la ciudad de México, el sismo de Huajuapán ( $M=7$ ), ocurrió el 24 de octubre de 1980 y produjo algunos daños en la ciudad.

El método que parece ser más preciso para estimar el movimiento fuerte en el valle de México para sismos de subducción es esencialmente empírico (Ordaz *et al.*, 1988; Singh *et al.*, 1988; Ordaz *et al.*, 1994). Consiste en: 1) estimar el movimiento, en términos del espectro de amplitudes de Fourier, en una estación de referencia; 2) estimar el espectro de amplitudes de Fourier en cerca de 100 sitios acelerométricos en el valle multiplicando el espectro de referencia por la función de transferencia empírica (FTE) que caracteriza a cada sitio; estas FTE son cocientes espectrales de Fourier promedio de cada sitio en zona de lago con respecto al sitio de referencia; 3) calcular el espectro de respuesta utilizando la teoría de vibraciones aleatorias a partir del espectro de Fourier de cada sitio. Adicionalmente, para sitios no instrumentados se ha desarrollado un esquema de interpolación que permite estimar el espectro de respuesta en sitios arbitrarios.

Aunque para un sitio dado las FTE son prácticamente constantes para todos los sismos, de un sismo a otro la forma y amplitud de los espectros de respuesta en cada sitio dependerán, por supuesto, del contenido de frecuencias del movimiento incidente (el movimiento en el sitio de referencia). Este contenido varía mucho dependiendo de las características del sismo (mecanismo focal, magnitud y distancia).

Para ilustrar estas diferencias en el movimiento esperado en la ciudad de México debidas al movimiento incidente, y por consiguiente a los efectos de fuente y trayecto, hemos escogido dos

casos; el sismo de Michoacán ( $M=8.1$ ) y un temblor hipotético de falla normal como el de Huajuapán ( $M=7$ ,  $R=200$  km) pero ubicado a 80 km de la ciudad de México. La figura 1 muestra los correspondientes espectros de Fourier de aceleración en el sitio de referencia; nótese las diferencias en contenido espectral, en particular, el gran contenido de altas frecuencias para el sismo de falla normal.

Se calcularon en algunos sitios de la ciudad espectros de respuesta esperados de pseudoaceleración (5% de amortiguamiento) para los dos casos estudiados usando el método descrito. La figura 2 muestra estos espectros. En sitios con periodo dominante,  $T_s$ , pequeño ( $T_s < 1$  s; izquierda de la figura 2), la amplitud espectral es mayor para el sismo de falla normal. Para sitios con  $T_s > 2$  s las curvas difieren bastante pero ninguna es sistemáticamente menor o mayor a la otra. Esto representa un problema para la especificación de espectros de diseño: por razones económicas parecería deseable usar en suelos blandos espectros de diseño angostos, en vista de lo angosto de los espectros de respuesta de eventos costeros frecuentes, pero pueden aparecer picos adicionales en periodos más cortos durante sismos de falla normal. Por otro lado, los eventos de falla normal son mucho menos frecuentes que los de subducción por lo que un espectro de diseño muy ancho que cubra ambos picos podría ser demasiado conservador. Una solución racional es, tal vez, calcular un espectro de respuesta de igual riesgo y especificar el espectro de diseño de acuerdo a ese riesgo. Pero en cualquier caso, el proceso de asignar espectros de diseño en las diferentes zonas de la ciudad es complejo y requiere un análisis cuidadoso de las implicaciones de tener diferentes fuentes sísmicas.

### Curvas espectrales para diseño multinivel

Los efectos de fuente producen otra complicación. Actualmente se reconoce que los valores espectrales de periodo largo crecen más rápidamente con la magnitud que valores de periodo corto. Esto no es muy relevante para sitios de terreno firme ya que la energía se concentra en periodos cortos y en esencia la forma de los espectros no varía con la magnitud del sismo. Para suelos blandos, donde la energía espectral se concentra entre 1 y 5 s, este escalamiento con la magnitud resulta muy relevante. La figura 3 muestra los espectros de respuesta para algunos sitios de suelo blando

( $T_s > 3$  s) normalizados con respecto a la aceleración máxima del terreno ( $A_{\max}=1$ ) correspondientes a tres terremotos: 25 de abril de 1989 ( $M=6.9$ ), 31 de mayo de 1990 ( $M=6.0$ ) y (sólo para la estación 68) 9 de octubre de 1995 ( $M=7.6$ ). Se aprecia que la forma de los espectros cambia con el tamaño del sismo mostrando, para eventos grandes, amplitudes relativamente mayores para periodos largos. Nótese que esto pasa mientras que las FTE de los sitios permanecen constantes por lo que el cambio en la forma debe atribuirse a los efectos de fuente.

La dependencia de la forma espectral de la magnitud se observa principalmente para  $T_s > 3$  s. Ello implica que, si se emplea un diseño multinivel, los espectros de diseño para varios niveles deberán diferir no sólo en amplitud sino también en forma. En otras palabras, no será suficiente multiplicar por una constante el espectro de diseño de, digamos, la carga de servicio para obtener el espectro de diseño de colapso. Soluciones a este problema para la ciudad de México se encuentran actualmente en discusión.

### Variabilidad geográfica

La Figura 4 muestra los espectros de respuesta calculados para siete acelerogramas registrados en la ciudad de México durante el sismo del 25 de abril de 1989, incluyendo sitios de terreno firme y zona de lago. Se aprecia que la forma y amplitud de los espectros varían enormemente dentro del valle de México (un factor de hasta 30, en el caso de la amplitud). Esto complica la especificación de espectros de diseño con respecto al tipo de suelo o, en otras palabras, existen muchos tipos de suelo. Se pueden plantear, al menos, las siguientes posibilidades para resolver este problema:

- 1) La solución adoptada por el actual Reglamento de Construcciones del Distrito Federal (RCDF), que consiste en asignar sólo un espectro de diseño para toda la zona de lago. Este espectro es una envolvente conservadora de espectros de respuesta de todos los sitios con periodos dominantes entre 1 y 5 s. Dado que estos espectros tienen forma muy picuda, el espectro de diseño es en general muy conservador para estructuras con periodos lejanos al periodo dominante del suelo.
- 2) Indexar la forma y amplitud del espectro de diseño a  $T_s$ . Esta posibilidad es parcialmente contemplada en el RCDF, donde el espectro de diseño depende de tres parámetros y se proporcionan reglas para encontrarlos en función de  $T_s$ ; un mapa de periodos dominantes está incluido en el reglamento. Sin embargo, estas reglas no toman en cuenta el hecho de que, debido a efectos de fuente, la forma de los espectros de diseño para prevenir colapso es generalmente diferente a aquella del sismo del servicio (ver sección anterior).
- 3) Construir un mapa de microzonación con el propósito de asignar espectros de diseño. En el caso del RCDF esto significa incrementar de tres a un número razonable -pero mayor- de zonas. Probablemente un número infinito de ellas, lo que significaría contar con un continuo geográfico de espectros de diseño. Esto difícilmente podría hacerse usando mapas convencionales y tablas, pero podría lograrse con un simple mapa digital incluido en el reglamento. Es probable que esta posibilidad (3) sea adoptada en la nueva versión del RCDF con un número aún no definido de microzonas. Sin embargo, este punto aún se encuentra en discusión.

## ESTIMACIÓN DE DEMANDAS SÍSMICAS INELÁSTICAS

La forma usual para fijar parámetros de demanda sísmica incluye la estimación de la resistencia requerida para limitar la demanda de ductilidad a un valor especificado,  $\mu$ . Esto generalmente se logra reduciendo el espectro de diseño elástico con *factores de reducción de resistencia*,  $R_\mu$ . Las reglas para encontrar estos factores tienen una larga historia. Miranda y Bertero (1994) han hecho una exhaustiva revisión de varios esfuerzos en este sentido. Meli y Ávila (1988), después de analizar el registro obtenido en SCT durante el temblor de 1985, observaron que para periodos cercanos al predominante del movimiento, los factores  $R_\mu$  eran mucho mayores que los predichos por reglas convencionales, como la Newmark y Hall (1973). Posteriormente, Rosas *et al.* (1989) estudiaron registros de terreno blando de la ciudad de México con periodo predominante de 2 s y derivaron una regla de reducción aplicable

exclusivamente a sitios con ese periodo; no se explica en ese trabajo por qué no se derivaron reglas similares para sitios de terreno blando con otros periodos predominantes. Miranda (1993) encontró reglas de reducción más generales para terreno blando, con las que se muestra claramente que  $R_\mu$  es una función del cociente  $T/T_s$ , donde  $T$  es el periodo estructural. Ordaz *et al.* (1993) hicieron ver que  $R_\mu$  depende no sólo de este cociente sino del ancho de banda del movimiento: cuanto menor el ancho de banda, mayor el valor de  $R_\mu$ . Es claro, sin embargo, que un diseño exitoso depende de nuestra habilidad para predecir demandas sísmicas inelásticas, por lo que se requieren reglas precisas para estimar  $R_\mu$ .

Muchos reglamentos de diseño incluyen una versión simplificada de la regla de Newmark y Hall (1973) para encontrar  $R_\mu$ , dada por  $R_\mu = \mu$ , sin importar el periodo ni las condiciones del suelo. Algunos otros, como el RCDF, reconocen la ineficiencia de la ductilidad en periodos cortos y proponen reglas en las cuales  $R_\mu = \mu$  para periodos arriba de algún valor característico;  $R_\mu$  decrece linealmente para periodos cortos hasta  $R_\mu = 1$  cuando  $T=0$ .

La figura 5 muestra  $R_\mu$  para  $\mu=4$  en función de  $T$  para el componente este-oeste del sitio SCT durante el sismo del 19 de septiembre de 1985, junto con las estimaciones de  $R_\mu$  calculadas con la regla de Newmark y Hall, las propuestas por Miranda (1993) y por Rosas *et al.* (1989) y la propuesta contenida en este estudio. Conviene aclarar que la regla de Miranda incluye una incertidumbre del 10 por ciento en el cociente  $T/T_s$ , un factor no incluido en las otras reglas; los errores en la estimación de  $R_\mu$  en la regla de Miranda son de entre 30 y 60%, dependiendo de la ductilidad.

Como ha sido señalado por varios autores (Meli y Ávila, 1988; Krawinkler y Rahnema, 1992),  $R_\mu$  está subestimado por la regla de Newmark y Hall para periodos cercanos al predominante. Esta subestimación es conservadora, ya que la resistencia requerida predicha sería mayor que la real, pero lo opuesto pasa en periodos cortos, en donde  $R_\mu$  es sobrestimado. Pero para la mayoría de los periodos, tanto la resistencia requerida como el desplazamiento inelástico podrían no estar correctamente estimados.  $R_\mu$  está mejor predicha por la curva etiquetada como "este estudio" en

la figura 5, que fue obtenida con la siguiente expresión:

$$R_\mu = 1 + \left[ \frac{V(T)}{V_{\max}} \right]^\alpha (\mu - 1) \quad (1)$$

donde  $V(T)$  es el espectro de velocidad para el amortiguamiento correspondiente,  $V_{\max}$  es la velocidad máxima del terreno y  $\alpha$  es una función de  $\mu$  (Tabla 1). Nótese que: 1) cuando  $T$  tiende a cero,  $V(T)$  tiende a cero y  $R_\mu$  tiende a uno, sin importar el valor de  $\mu$ ; 2) a medida que  $T$  crece,  $V(T)$  tiende a  $V_{\max}$  y  $R_\mu$  tiende a  $\mu$ ; 3) para  $T=T_s$ , el periodo dominante del movimiento definido como aquel en el cual  $V(T)$  es máxima,  $R_\mu$  es también máximo, como lo mostró Miranda (1993). En la Figura 6 mostramos algunos ejemplos del comportamiento de la ecuación 1 para predecir  $R_\mu$  usando registros obtenidos en doce sitios de la ciudad de México durante el sismo del 25 de abril de 1989. Nótese que la curva obtenida con la ecuación 1 con  $\alpha=0.65$  es muy similar a la curva del valor calculado de  $R_\mu$ , aun cuando estas muestran carácter bimodal. En particular, los valores de  $R_\mu$  para el sitio CD calculados durante el 31 de mayo de 1990 tienen dos picos muy claros que no podrían haber sido predichos por otras reglas.

Tabla 1. Valores de  $\alpha$  de la ecuación 1 para varios valores de  $\mu$

$\mu$	$\alpha$
1.5	0.42
2.0	0.54
4.0	0.65
8.0	0.72

Los resultados se muestran sólo para sitios de suelo blando, pero la regla dada en la ecuación 1 trabaja bien también para sitios de terreno firme. En ambos casos los errores en la estimación son de 10 a 30%, dependiendo de la ductilidad, los cuales son mucho menores que los asociados a la estimación con otras reglas. Nótese que a pesar de que la ecuación 1 parece adecuada para pasar de espectros de *respuesta* elásticos a inelásticos, se debe usar una versión suavizada para reducir

los espectros de *diseño* elásticos. En cualquier caso, la ecuación 1 parece ser una buena alternativa para estimar la resistencia requerida para limitar la demanda de ductilidad, teniendo como punto de partida el espectro elástico de diseño.

## DURACIÓN DEL MOVIMIENTO FUERTE Y ENERGÍA DISIPADA

En la sección precedente se mencionó que las reglas comunes para reducir los espectros elásticos en suelos blandos y tomar en cuenta comportamiento inelástico son usualmente conservadoras para periodos alrededor del predominante. Pero por otro lado, los movimientos en estos sitios son más largos, y a veces mucho más largos, que los registrados en terreno firme, lo que se transforma en mayor número de ciclos de carga y mayor entrada de energía a las estructuras. Debido a que los valores de los factores de reducción (o demandas de ductilidad disponibles o factores de resistencia) han sido adoptados después de observar el comportamiento de estructuras principalmente en terreno firme, es razonable pensar que deberían hacerse algunas correcciones para tomar en cuenta la mayor duración del movimiento en suelos blandos. Pero los métodos de diseño actuales están basados en valores máximos (en este caso de demandas de ductilidad) y no hay lugar para incluir directamente consideraciones energéticas en los métodos de diseño basados en fuerzas.

Una posibilidad para incluir la energía disipada en el proceso de diseño, inspirada en el trabajo de Fajfar (1992), fue discutida por Ordaz y Faccioli (1996). Está basada en el uso del índice de daño de Park y Ang (1985),  $D$ , definido para un oscilador de un grado de libertad y suponiendo comportamiento elastoplástico como:

$$D = \frac{x_{\max}}{x_u} + \beta \frac{E}{F_y x_u} \quad (2)$$

donde  $x_{\max}$  es el desplazamiento máximo inelástico de la estructura durante el sismo,  $x_u$  es el máximo desplazamiento permisible *ante carga monotonica*,  $\beta$  es un parámetro que mide degradación de resistencia,  $E$  es la energía histerética disipada, y  $F_y$  es la fuerza de fluencia del oscilador. Bajo este esquema, una estructura se considera segura mientras  $D < 1$ . Nótese que, mientras  $x_u$ ,  $F_y$  y  $\beta$  son

parámetros de diseño,  $x_{\max}$  y  $E$  son respuestas estructurales.

Supongamos que se desprecia la contribución al daño de la energía histerética disipada, lo cual equivale a suponer que  $E$  en la ec 2 vale 0. Entonces, la estructura será segura ( $D < 1$ ) mientras  $x_{\max} < x_u$ , o bien, si dividimos ambos desplazamientos entre el de fluencia,  $x_y$ , la estructura será segura mientras la demanda máxima de ductilidad  $\mu_{\max} = x_{\max}/x_y$  no exceda la capacidad dúctil  $\mu_u = x_u/x_y$ . Una estructura que tenga una capacidad dúctil  $\mu_u$  ligeramente mayor a la demanda máxima de ductilidad será, entonces, segura. Pero si se toma en cuenta el efecto de  $E$ , la misma estructura sometida al mismo sismo ya no lo sería, puesto que  $D$  sería mayor que 1. Para lograr que, considerando el efecto de la energía disipada, la estructura vuelva a ser segura, puede operarse sobre cualquiera de los parámetros de diseño, que son  $x_u$ ,  $F_y$  y  $\beta$ . De los tres, el más fácil de modificar es  $F_y$ , la resistencia de la estructura. Si se aumenta la resistencia, la demanda de ductilidad generalmente disminuye, por lo que también disminuye el primer término del miembro derecho de la ec 2. Adicionalmente, aunque la energía disipada no siempre disminuye al aumentar la resistencia, siempre puede encontrarse un valor de  $F_y$  que haga que  $D$  vuelva a ser menor que 1. Este valor de  $F_y$  será siempre mayor que el que se tenía cuando la estructura era segura despreciando la contribución de la energía histerética disipada. Cuánto mayor, depende de las características del acelerograma, principalmente de la duración.

La figura 7 muestra los valores de  $F_y/W$  para diferentes niveles de ductilidad, utilizando el mismo registro de SCT del sismo de 1985. La línea discontinua corresponde a los espectros inelásticos convencionales, es decir, a las resistencias requeridas para limitar la demanda de ductilidad a valores de 4, 8 y 20. Una estructura sometida a este sismo sería segura si tuviera una resistencia superior a la que se indica con línea discontinua, siempre que se ignore el efecto de la energía disipada. Pero si se toma en cuenta el efecto de la energía disipada, las estructuras requerirían las resistencias que se presentan con línea continua, que son mayores, y en ocasiones mucho mayores, a las requeridas ignorando la contribución al daño de la energía disipada.

Por simplicidad en los cálculos y en la explicación del método,  $\beta$  se fijó en 0.15, un valor previamente

usado en otros trabajos (e.g., Fajfar 1992), y se asumió que  $x_u$  y  $T$  son independientes de la resistencia, medida con  $F_y$ . La primera consideración implica que la capacidad dúctil decrece mientras la resistencia crece. Sin embargo, se pueden hacer consideraciones más razonables acerca de las relaciones entre  $T$ ,  $x_u$  y  $F_y$  y podrían construirse espectros más realistas similares a los mostrados en la Figura 7. También, el punto de partida en este enfoque es que algunos valores de capacidad dúctil (global) *bajo carga monotonica* han sido considerados razonables para cierto tipo de estructuras. La realidad es que esas capacidades han sido juzgadas razonables después de observar el comportamiento de estructuras con diseño conocido ante cargas sísmicas generalmente de corta duración. Esto implica que casi seguramente se incluye en las capacidades cierta cantidad de energía disipada, y no ninguna, como supusimos para calcular los espectros de la Figura 7. Pero las estructuras sometidas a cargas de larga duración seguramente disiparían más energía histerética que si estuvieran sometidas a cargas de corta duración, por lo que para suelos blandos, las capacidades dúctiles podrían estar sobrestimadas, lo cual conduciría al uso de fuerzas de diseño superiores. Los resultados presentados en la Figura 7 son, en el mejor de los casos, límites superiores a los incrementos en estas fuerzas de diseño.

Aun cuando el método presentado aquí es simplificado y amerita más investigación, se cree que puede ayudar a encontrar claves sobre cómo corregir los espectros de diseño usuales para que consideren el efecto de energía disipada.

### CONCLUSIONES

En este trabajo se discutieron algunos puntos asociados a la especificación de espectros de diseño para suelos muy blandos. Estos problemas son, en general, de poca importancia cuando se elaboran espectros de diseño en sitios de terreno firme.

El primer grupo de problemas trata de los fuertes cambios en la forma de los espectros de respuesta debidos a efectos de fuente, en general, y a efectos derivados del contenido de frecuencias del movimiento incidente en particular. Ello implica que: 1) mientras el espectro de diseño debe ser

construido para cubrir los espectros de respuesta asociados a grandes y frecuentes pero distantes terremotos de un tipo, ellos deben también cubrir los efectos de terremotos más cercanos con otros orígenes pero que son menos frecuentes y más pequeños. Esto presenta complicaciones porque la forma de los espectros de respuesta de los diferentes grupos de eventos pueden variar mucho; 2) si se desea un diseño multinivel, se deben tomar provisiones para considerar el hecho de que, debido a los efectos del tamaño del sismo y de la presencia de suelos blandos, los espectros de respuesta de servicio y los de colapso pueden diferir, no sólo en amplitud sino también en forma.

También se discutió la variación geográfica de los espectros de respuesta a lo largo del valle de México. Este análisis nos lleva a la necesidad de detallar y microzonar aún más con propósitos de diseño. Posiblemente la mejor solución sea un catálogo de espectros de sitio, o en otras palabras, la existencia de un número relativamente grande de "tipos de suelo".

Se presentaron además algunas características de factores de reducción de resistencia para suelos muy blandos. Dicho estudio es relevante ya que los métodos contemporáneos de diseño precisan estimaciones certeras de demandas de ductilidad. Se mostró cómo el comportamiento difiere enormemente del observado en suelos de terreno firme por lo que estos factores para suelos blandos no están correctamente predichos por las reglas estándar. En este trabajo se propone una ecuación empírica para calcular factores de reducción que, en general, funciona mejor que reglas previamente publicadas.

Finalmente, se ha señalado la importancia de tomar en cuenta el efecto de la gran duración del movimiento intenso en suelos blandos y la disipación de energía que esto implica. Se presentó una manera en qué efecto podría incorporarse en la derivación de espectros de diseño, en el sentido de revisar si, en efecto, las capacidades dúctiles implícitas en nuestros reglamentos son adecuadas, en vista de la contribución de la energía histerética al daño. De no juzgarse adecuadas, procedería reducirlas o, alternativamente, aumentar las fuerzas de diseño con métodos como el que se propuso; aunque este es muy simplificado, puede ayudar en esta dirección.

## RECONOCIMIENTO

Los autores agradecen los comentarios y críticas constructivas de E Miranda y R Meli, L Esteva y S Ruiz. La mayoría de los resultados aquí presentados no hubieran sido posibles sin los esfuerzos y profesionalismo de los grupos a cargo de las redes acelerométricas que operan en México: Centro de Instrumentación y Registro Sísmico de la Fundación Javier Barros Sierra, Centro Nacional de Prevención de Desastres y Coordinación de Instrumentación del Instituto de Ingeniería de la UNAM.

## REFERENCIAS

- Fajfar, P.**, "Equivalent ductility factors, taking into account low-cycle fatigue", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* 21, 837-848, 1992.
- Krawinkler, H. y Rahnamam, M.**, "Effects of soils on design spectra", *Proceedings 10th World Conference on Earthquake Engineering*, 10, 5841-5846, 1992.
- Meli, R. y Ávila, J.**, "Analysis of building response", *Earthquake Spectra* 5, 1-18, 1988.
- Miranda, E.**, "Site-dependent strength reduction factors", *Journal of Structural Engineering, ASCE*, 119, No. 12, 3503-3519, 1993.
- Miranda, E. y Bertero, V.**, "Evaluation of strength reduction factors for earthquake-resistant design", *Earthquake Spectra*, 10, No. 2, 357-379, 1994.
- Newmark, N.M. y Hall, W.J.**, "Seismic design criteria for nuclear reactor facilities", Report 46, *Building Practices for Disaster Mitigation*, National Bureau of Standards, 209-236, 1973.
- Ordaz, M. y Faccioli, E.**, "Earthquake design spectra to limit structural damage", en prensa, 1996.
- Park, Y.J y Ang, A. H-S**, "Mechanistic seismic damage model for reinforced concrete", *Journal of Structural Engineering, ASCE*, 111, No. ST4, 722-739, 1985.
- Ordaz, M., Singh, S.K., Reinoso, E., Lermo, J., Espinosa J.M. y Domínguez, T.**, "Estimation of response spectra in the lake bed zone of the valley of Mexico", *Earthquake Spectra*, 4, No.4, 815-834, 1988.
- Ordaz, M., Pérez-Rocha, L.E. y Meli, R.**, "Respuesta de osciladores elastoplásticos sometidos a excitaciones sísmicas de banda angosta", *Memorias X Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica*, Puerto Vallarta, Jal., 346-352, 1993.
- Ordaz, M., Meli, R., Montoya-Dulché, C., Sánchez, L. y Pérez-Rocha, L.E.**, "Bases de datos para la estimación de riesgo sísmico en la ciudad de México", *Cuadernos de Investigación*, 1, CENAPRED, México, 1994.
- Rosas, H., Ruiz, S.E y Díaz, O.**, "Construcción de espectros inelásticos a partir de registros en la ciudad de México", *Memorias VIII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica y VII Congreso Nacional de Ingeniería Estructural*, Vol 1, A77-A86, Acapulco, Gro., 1989.
- Rosenblueth, E., Ordaz, M., Sánchez-Sesma, F. J. y Singh, S.K.**, "Design Spectra for Mexico's Federal District", *Earthquake Spectra*, 5, No. 1, 273-291, 1988.
- Singh, S.K., Lermo, J., Domínguez, T., Ordaz, M., Espinosa, J.M., Mena, E. y Quaas, R.**, "A study of amplification of seismic waves in the Valley of Mexico with respect to a hill zone site", *Earthquake Spectra*, 4, No.4, 653-673, 1988.

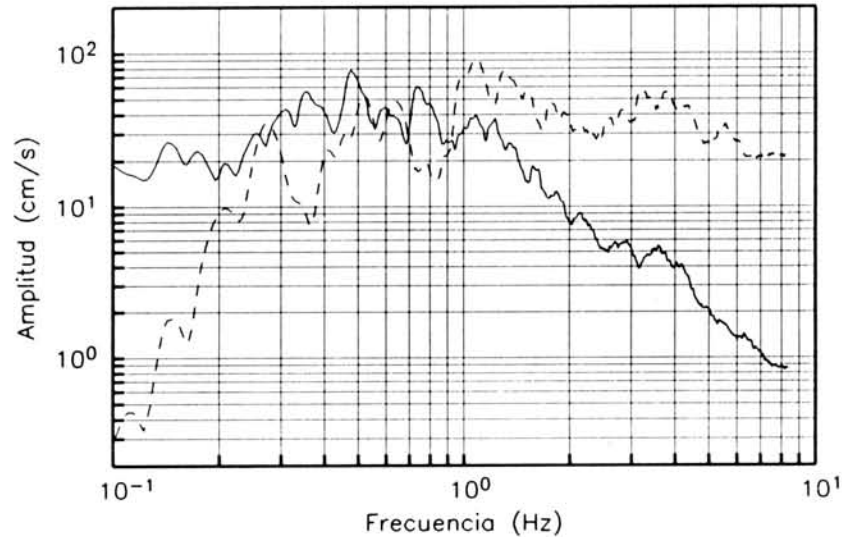


Fig 1. Espectros de Fourier de aceleración en la estación CU en la ciudad de México para dos terremotos. Línea sólida: 19 de septiembre de 1985 ( $M=8.1$ ); línea punteada: el sismo de Huajuapán del 24 de octubre de 1980 escalado a una distancia de 80 km a CU

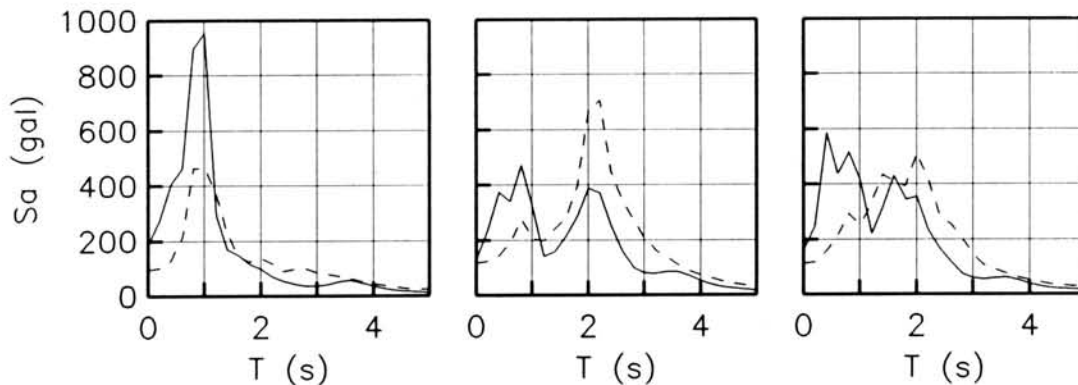


Fig 2. Espectros de respuesta esperados en sitios selectos de la ciudad de México calculados para los dos escenarios discutidos en el texto. Línea sólida: evento de falla normal; línea punteada: sismo de subducción

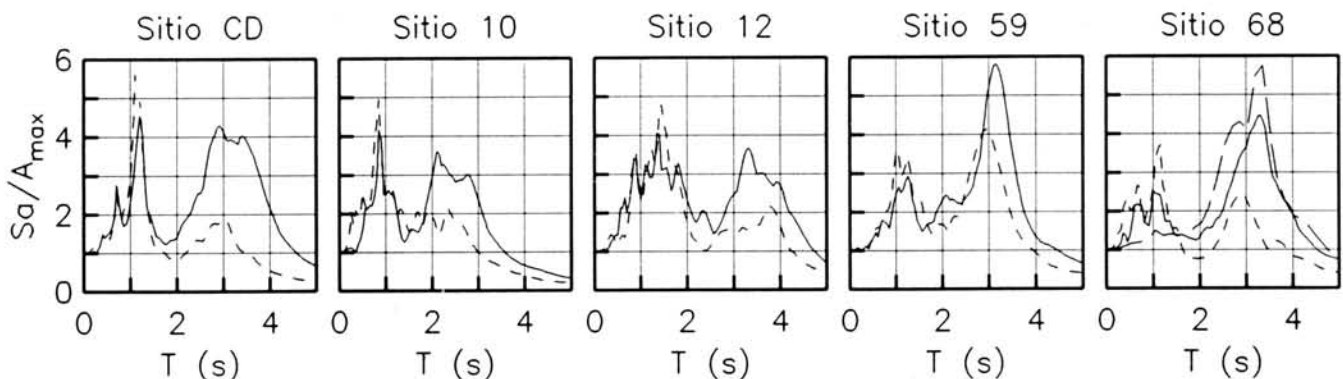


Fig 3. Espectro de respuesta normalizado ( $A_{\text{máx}}=1$ ) para tres sitios en suelo blando ( $T_s > 3$  s) en la ciudad de México durante tres sismos. Línea sólida: 25 de abril de 1989 ( $M=6.9$ ); línea punteada: 31 de mayo de 1990 ( $M=6$ ); línea interrumpida: 9 de octubre de 1995 ( $M=7.6$ )

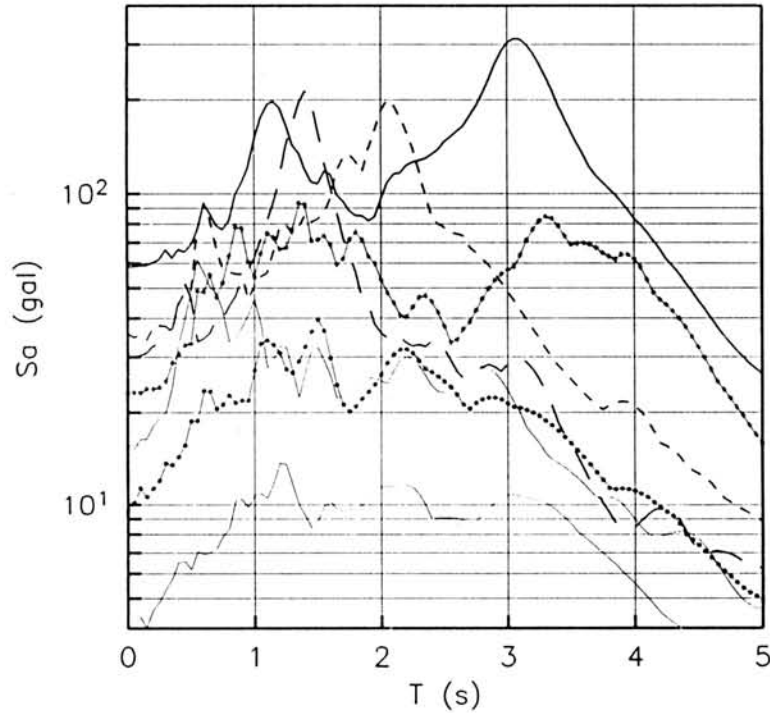


Fig 4. Espectros de respuesta observados para siete estaciones en la ciudad de México, incluyendo sitios en terreno firme y zona de lago, durante el sismo del 25 de abril de 1989 (M=6.9). Nótese las grandes variaciones en forma y amplitud

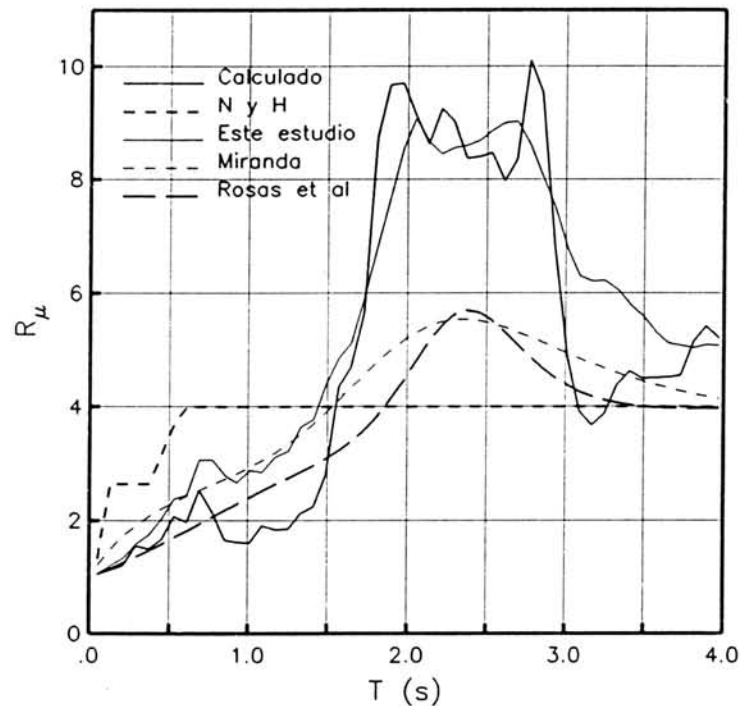


Fig 5. Factor de reducción de resistencia,  $R_{\mu}$ , para el componente este-oeste en el sitio SCT durante el sismo del 19 de septiembre de 1985. Calculado: los valores reales de  $R_{\mu}$ ; N y H: como lo predice la regla de Newmark y Hall (1973); Este estudio: como lo predice la ecuación 1; Miranda: predicho por Miranda (1993) para suelos blandos y Rosas *et al.* según la propuesta de Rosas *et al.* (1989)

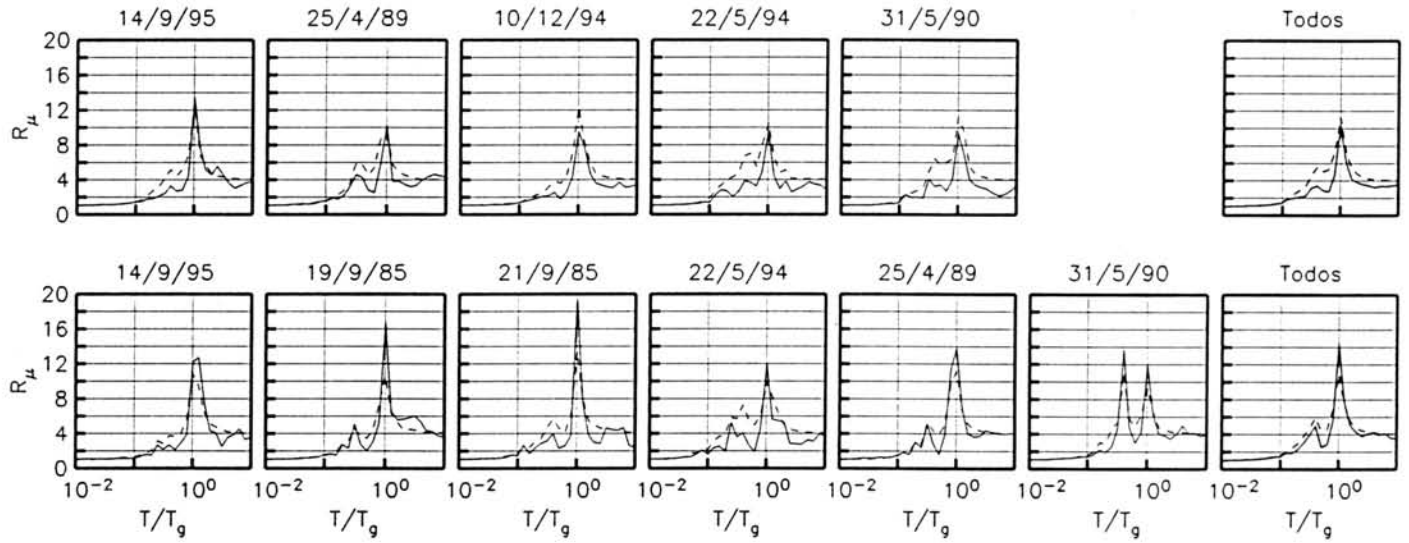


Fig 6. Línea sólida:  $R_\mu (\mu=4)$  para el componente este-oeste del movimiento en dos sitios registrados en la ciudad de México. Renglón superior: estación 56; renglón inferior: estación CD. Línea interrumpida:  $R_\mu$  predicho con la ecuación 1. El título en cada cuadro indica la fecha de cada evento

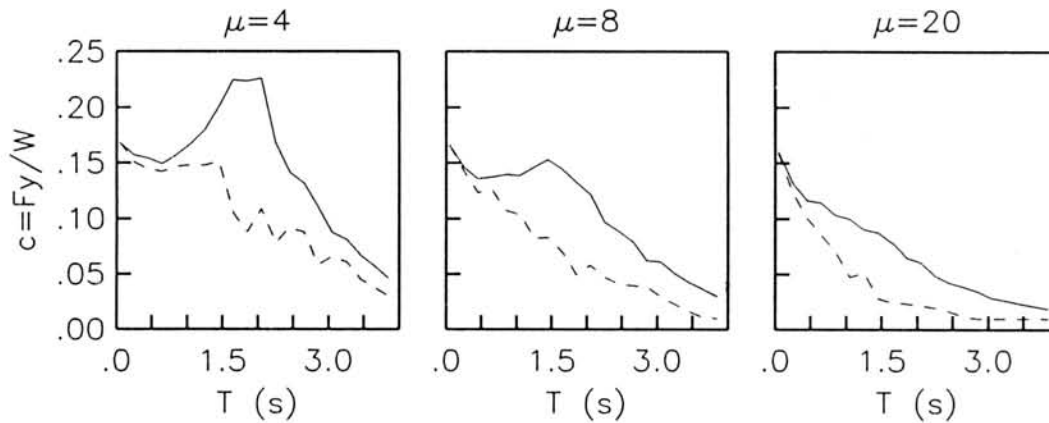


Fig 7. Resistencia requerida,  $c=F_y/W$ , para obtener  $D=1$  (ver ecuación 2) suponiendo diferentes niveles de capacidad dúctil  $\mu_u$ , para el componente este-oeste del sitio SCT, para dos casos: línea discontinua: cuando el daño debido a energía disipada no se toma en cuenta (cálculo convencional de repuesta inelástica); línea sólida: cuando se incluye el efecto de energía disipada de acuerdo con la ecuación 2