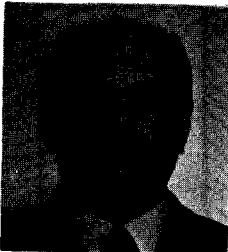


CONSIDERACIONES SOBRE EL RIESGO SISMICO EN EL VALLE DE MEXICO



Roberto Meli*

El riesgo sísmico en el valle de México tiene características muy distintas de las de otras zonas de alto peligro sísmico. La particular topografía del valle y sobre todo la extrema sensibilidad a las vibraciones de los depósitos de arcilla en la zona del lago, hacen que el terreno responda a eventos sísmicos que se generan a grandes distancias. Se presentan entonces intensidades muy elevadas en el valle por sismos que tienen su epicentro en muy diversas regiones, pero sobre todo en la costa del Pacífico desde Oaxaca hasta Jalisco. La frecuencia de movimientos sísmicos intensos es muy probablemente mayor que la de cualquier otra ciudad importante en el mundo. Según las estadísticas recopiladas por J. Figueroa (Ref 1) y resumidas en la Fig 1, en el valle ha ocurrido en este siglo un sismo de intensidad VI o mayor en la escala de Mercalli, en promedio cada dos años. Por ello las construcciones son sometidas con mucha frecuencia a vibraciones sísmicas significativas.

Otro aspecto muy peculiar es la gran diferencia en la intensidad y en las características del movimiento del terreno entre sitios aun muy cercanos dentro del valle. Se había detectado desde 1957 que la amplificación de las ondas sísmicas es radicalmente mayor dentro de la zona del lago que en la de lomas, y se había así llegado a una subdivisión del valle en tres zonas, incluyendo una de transición entre la de lomas y la del lago. La comparación de los daños causados por los sismos de 1985, 1979 y 1957 (Ref 2) indica que los daños se concentraron en los tres casos en una parte determinada de la zona del lago y que las zonas más afectadas se superponen y difieren en tamaño según la intensidad de cada movimiento. Esto hace suponer que debe haber de diferencias significativas entre la

*Instituto de Ingeniería, UNAM

amplificación que las ondas sísmicas tienen en distintas regiones de la zona del lago.

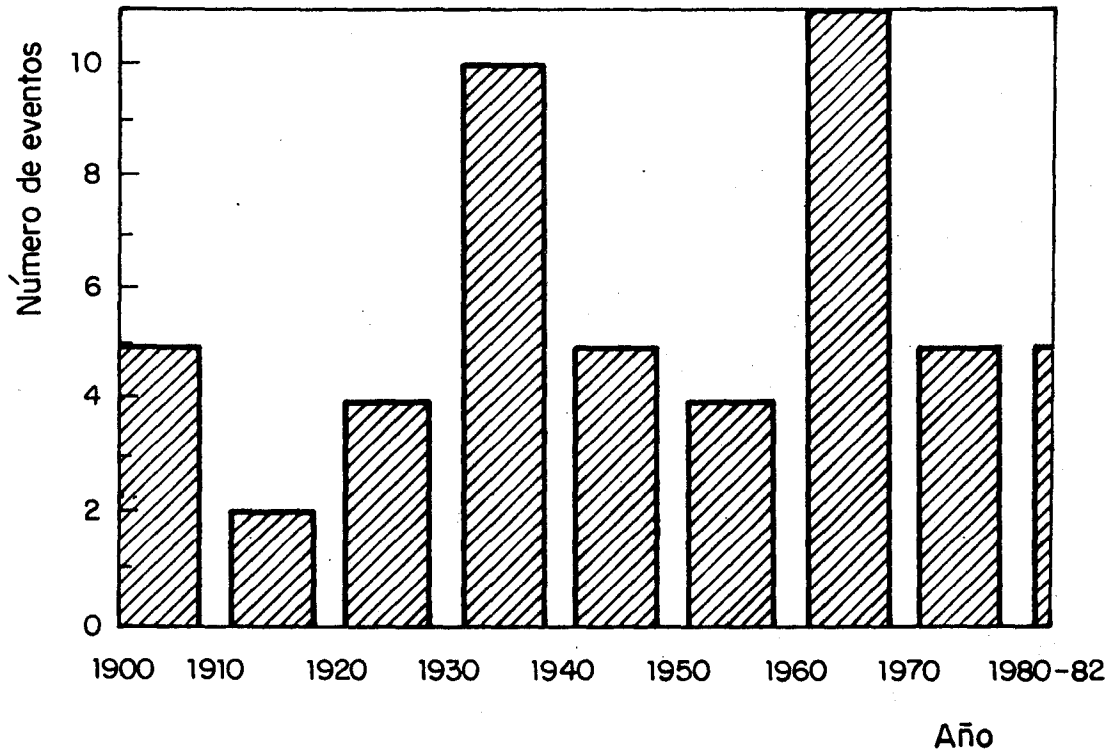


Fig 1. Número de sismos en la Cd. de México con intensidades mayores que VI en escala de Mercalli (construida con datos de J. Figueroa, ref 1)

Después del sismo de 1985, se ha prestado mucha atención al fenómeno de amplificación en la zona del lago. Se han realizado estudios analíticos de propagación de ondas, evaluaciones detalladas de daños relativos en distintas áreas, campañas muy extensas de determinación de propiedades del suelo y de la estratigrafía y geología de la zona. Sin embargo, lo más valioso para entender el fenómeno ha sido la puesta en operación de una red de más de 80 acelerómetros que permiten registrar el movimiento del terreno particular de cada sitio para eventos sísmicos de intensidad moderada o grande. La red está compuesta por tres subredes operadas por Fundación Barros Sierra, Fundación ICA e Instituto de Ingeniería. La red es más densa en la zona de lago y en las áreas donde ha habido más daños por los sismos recientes, que en el resto del valle.

La red ha registrado ya dos eventos sísmicos de cierta importancia, los del 8 de febrero de 1988 y del 25 de abril de 1989. Los registros están siendo analizados en detalle

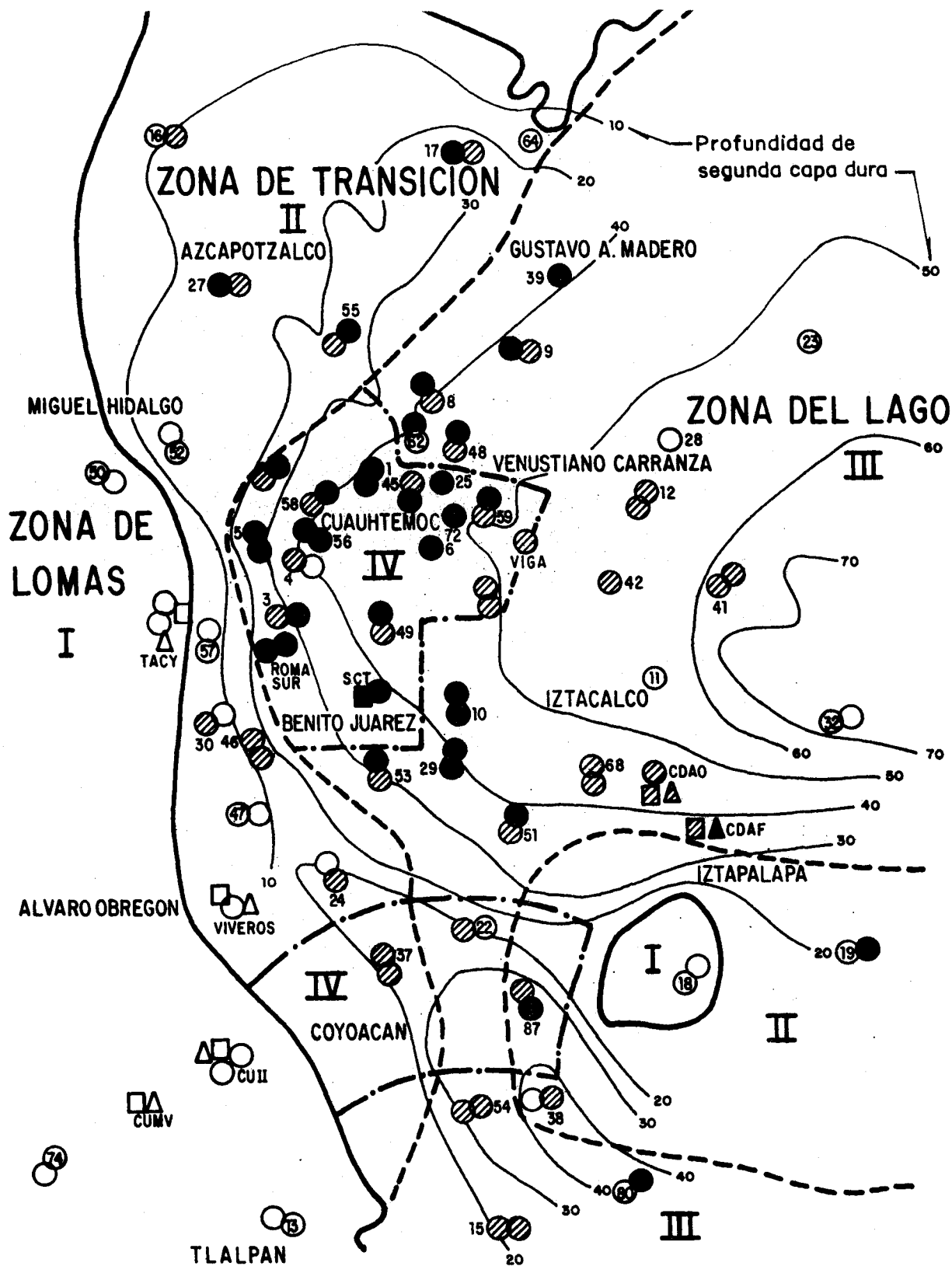
por los especialistas, pero una interpretación simplista preliminar permite extraer ya algunas conclusiones que tienen importancia práctica.

Para resumir en un solo parámetro la amplificación del movimiento del terreno en distintos sitios, se tomó la relación entre la aceleración máxima en cada sitio y la aceleración máxima en un sitio de referencia ubicado en roca en zona de lomas (Ciudad Universitaria). Como aceleración máxima se consideró el promedio de los máximos de los dos componentes horizontales registrados en cada sitio. En la Fig 2 se identifican con distintos símbolos los sitios en que la amplificación, así definida, es menor de dos (a lo que se califica como amplificación pequeña o moderada), o está entre dos y tres (amplificación importante), o es mayor que tres (amplificación muy elevada). En la figura se consignan los datos correspondientes al 19 y 20 de septiembre de 1985 para los pocos sitios en que había instrumentos en ese entonces, así como los de los eventos de 1988 y 1989 para la red completa.

La inspección de la figura indica que, en la gran mayoría de los casos, el grado de amplificación es siempre el mismo en diferentes eventos, independientemente de la magnitud del sismo y del lugar de origen, epicentro, que fue diferente en los cuatro eventos considerados. Existen algunos casos en que esa afirmación no se cumple y que ameritan un análisis cuidadoso para identificar las causas de esta anomalía. Se aprecia que en la zona de lomas la amplificación es siempre pequeña; en la zona del lago la amplificación es en general elevada con valores francamente mayores en la parte Poniente de dicha zona, mientras que en su parte Nor-oriental, donde la profundidad de la segunda capa dura excede de 40 m, la amplificación es claramente menor. Las áreas de mayor amplificación corresponden gruesamente a las que sufrieron mayores daños en 1985. Hay que llamar la atención sobre las amplificaciones elevadas que se presentan en el Sur, hacia Xochimilco y Tláhuac, donde por el tipo de construcción prevaleciente hasta 1985 los daños no fueron muy severos.

En la zona de transición existen áreas de amplificación elevada y otras de amplificación moderada. Es notable un área al norte de la ciudad donde la amplificación es consistentemente elevada y que debe corresponder en realidad a la zona del lago, como se confirma por el espesor del estrato de arcilla, que es mayor de 20 m. La clasificación actual como zona de transición parece ser errónea.

Una interpretación más fina de los registros se basa en la comparación de los espectros de respuesta, que constituyen una representación de la magnitud de los efectos que cierto movimiento particular del terreno induce en sistemas de



- ⊙ Registro 880208 ○ Registro 890425 □ Registro 190985 △ Registro 210985
- ⊙ ○ □ △ Amplificación menor de 2
- ⊘ ⊙ ⊚ ⊛ Amplificación entre 2 y 3
- ● ■ ▲ Amplificación mayor de 3

Fig 2 Amplificación de la aceleración máxima en distintos sitios del Valle de México (relativa a Ciudad Universitaria)

un grado de libertad con distinto periodo de vibración. Cada sistema de un grado de libertad se puede asimilar a una estructura con ese mismo periodo fundamental de vibración.

La Fig 3 muestra los espectros de los movimientos registrados en la estación SCT el 19 de septiembre de 1985 y el 25 de abril de 1989. Se aprecia la similitud en la forma de las dos gráficas: en ambos casos el pico de la respuesta corresponde al periodo de dos segundos. En la misma figura se representa con línea más gruesa el espectro del 25 de abril, multiplicado por la relación de la aceleración máxima que experimentó el terreno el 19 de septiembre entre la registrada el 25 de abril. Se aprecia buena coincidencia en las zonas críticas del espectro, aunque la ordenada máxima es menor para el 25 de abril.

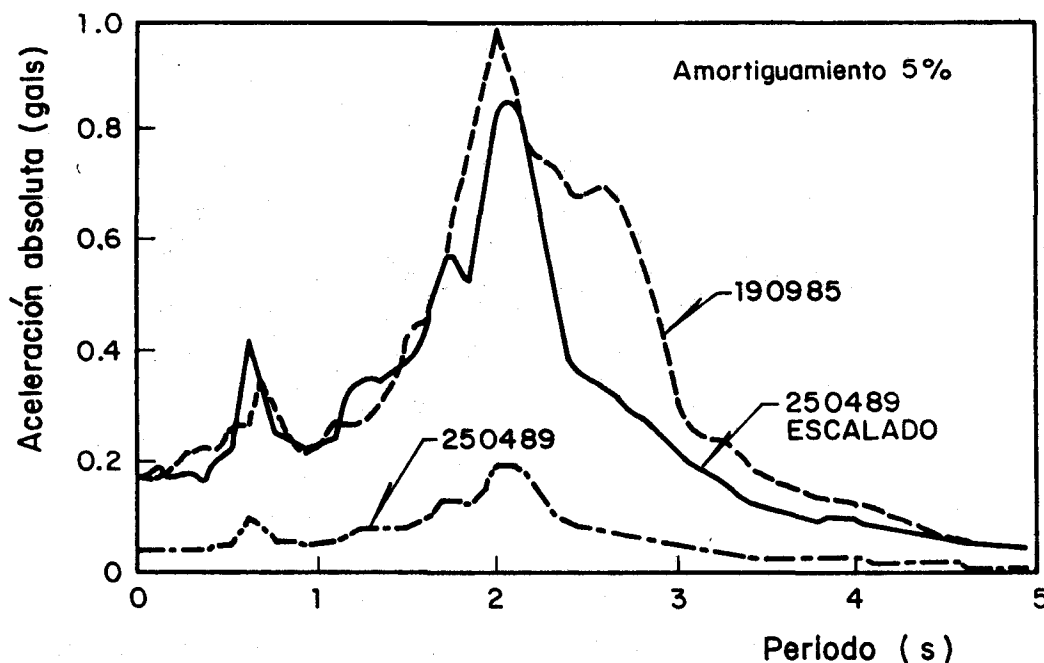


Fig 3. Espectros de respuesta en el sitio SCT

En las Fig 4 a 6 se muestran espectros correspondientes a otros sitios en los que se obtuvieron registros en los tres eventos mencionados. Se aprecia que los espectros para cada sitio tienen una semejanza general en su forma,

y difieren esencialmente solo por un factor de escala, proporcional aproximadamente a la aceleración máxima del terreno. En los sitios en terreno blando los espectros muestran en general dos picos que destacan netamente del resto. El mayor corresponde al periodo fundamental de los depósitos de arcilla y el menor corresponde a un segundo modo de vibración de dichos estratos. La amplitud relativa de los dos picos tiende a variar en distintos eventos y la diferencia es particularmente significativa en el sitio CDAO (Fig 4).

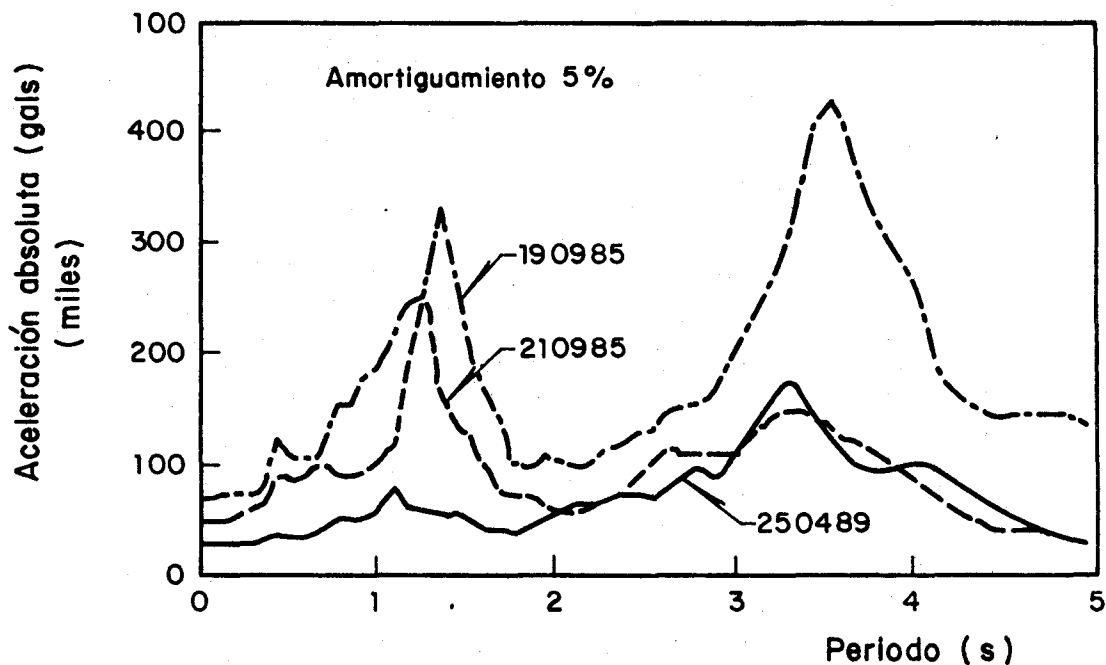


Fig 4. Espectros de respuesta en el sitio CDAO (zona del lago)

En el sitio en zona de lomas (CU, Fig 6) también se tiene una buena semejanza en los espectros de respuesta de los diferentes eventos sísmicos. Para periodos menores de 4 seg no se aprecian tendencias claras a que los picos de respuestas se presenten para periodos mayores a medida que aumenta la magnitud del sismo.

Lo anterior indica que la respuesta de cada sitio presenta características aproximadamente constantes, independientemente de la ubicación exacta del epicentro en la zona de

subducción y de la magnitud del evento; los acelerogramas y los espectros difieren esencialmente por un factor de escala que es proporcional a la intensidad del movimiento. Esto se cumple para el intervalo de periodos de interés, aunque hay diferencias significativas para periodos muy largos. Los periodos para los que se presenta los picos de respuesta son siempre los mismos, pero la amplificación de la ordenada espectral para esos picos no es exactamente la misma para todos los eventos. Esto puede atribuirse a diferencias en el contenido de energía de cada movimiento sísmico para los periodos críticos de los depósitos de suelo del sitio en cuestión. Para sismos de muy baja intensidad, como el de febrero de 1988, las formas espectrales resultan algo diferentes, por lo que las consideraciones anteriores no son del todo válidas.

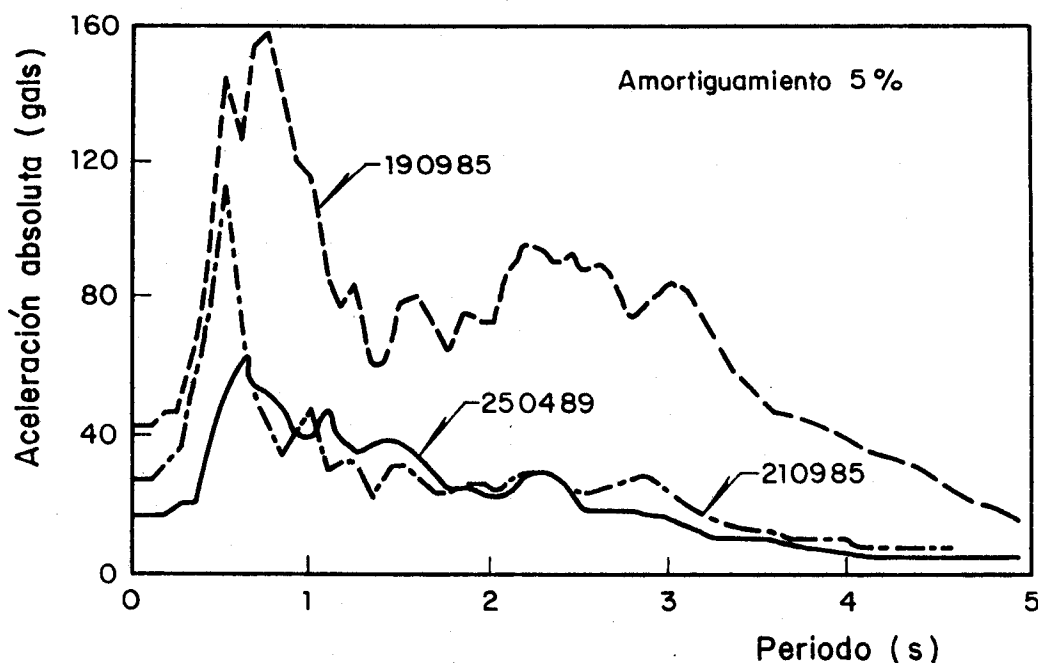


Fig 5. Espectros de respuesta en el sitio VIV (zona de transición)

De los resultados anteriores se desprende que el fenómeno de la amplificación de ondas sísmicas es aproximadamente lineal. Cada sitio tiene una función de transferencia constante que transforma siempre de la misma manera las ondas sísmicas que llegan a través de los depósitos profundos en un movimiento amplificado en la superficie del terreno. Dicha hipótesis había sido propuesta por Singh y confirmada parcialmente por el análisis de los registros

del 19 y 20 de septiembre de 1985, así como por su comparación con los resultados de mediciones de microtemblores (Ref 3).

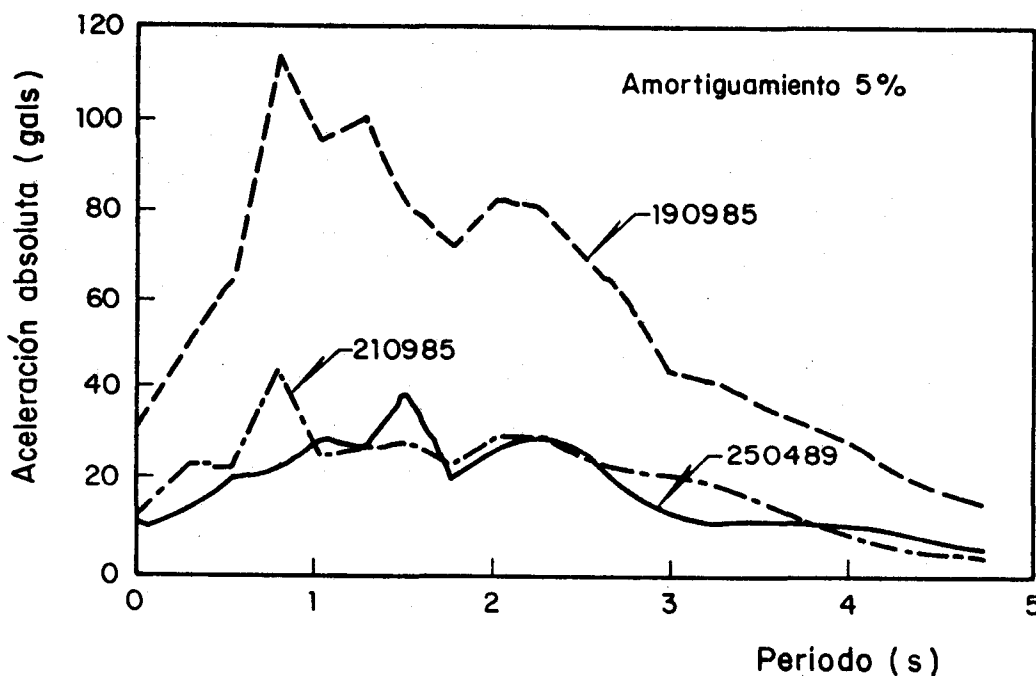


Fig 6. Espectros de respuesta en el sitio CU (zona de terreno firme)

Otra conclusión, que se desprende especialmente de la comparación de los espectros de la Fig 6, es que el contenido de energía para distintas frecuencias de ondas no varía en forma sustancial para sismos de diversas magnitudes y epicentros, dentro del intervalo de frecuencias de interés. Como se ve, los espectros de los movimientos registrados en terreno firme (CU, Fig 6) donde la amplificación es pequeña tienen, para el intervalo de periodos de interés, un contenido de frecuencias muy semejante.

El conjunto de las dos hipótesis implica que las mediciones de los movimientos del terreno en sismos de intensidad moderada permiten predecir con buena aproximación lo que sucederá en eventos más severos en cada sitio particular. Por ello las mediciones de la red de acelerómetros del valle son de gran importancia. A continuación se comentan algunas repercusiones relevantes que las mediciones y las hipótesis anteriores tienen para el diseño

sísmico de las edificaciones.

La Fig 7 muestra comparativamente los espectros del sitio SCT y de otro en la colonia Roma para el evento del 25 de abril de 1989; se aprecia que el segundo tiene ordenadas francamente mayores y su pico corresponde a un periodo bastante menor. Lo anterior indica que el movimiento del terreno en 1985 debió haber sido en ese sitio, y en otros en que se da la misma situación, más severo que en SCT y que el registro que se obtuvo en ese entonces en SCT no representa una cota superior de la intensidad sísmica que puede esperarse en la zona del lago del valle de México.

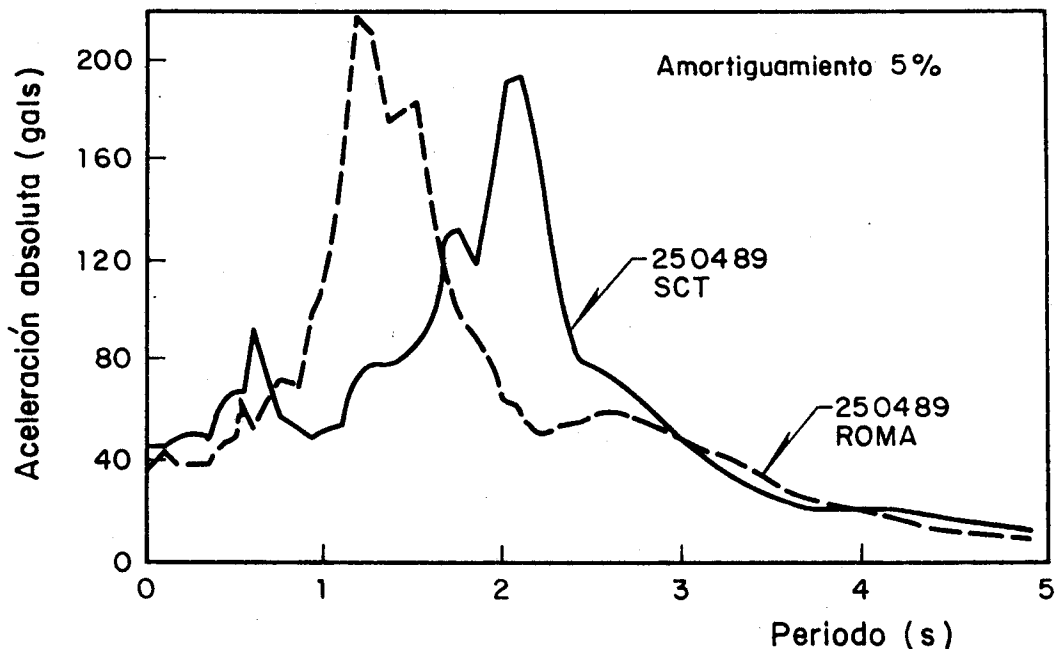


Fig 7. Comparación de espectros de respuesta en las estaciones Roma y SCT

Como se ha visto, en cada sitio los espectros de respuesta presentan un pico para un periodo definido. siempre constante, para el cual la amplificación es muy elevada. (En algunos sitios se distinguen dos picos de respuesta elevada.)

Estructuras que tengan un periodo de vibración cercano al de esos picos (en alguno de sus primeros modos de vibración) van a ser excitadas consistentemente en forma más

severa de lo que sucede para el resto de las edificaciones y, a menos que dispongan de una resistencia muy elevada a cargas laterales, van a ser llevadas con frecuencia más allá de su comportamiento lineal.

El problema anterior no es grave desde el punto de vista de seguridad contra el colapso, si la estructura tiene características que aseguren un comportamiento que sea dúctil y que no se deteriore ante varios ciclos de cargas alternadas. En ese caso, al sobrepasar el intervalo lineal de comportamiento, se presenta un amortiguamiento inelástico adicional que resulta muy efectivo en reducir la respuesta y, aunque la resistencia a cargas laterales de la estructura sea muy inferior a la que corresponde al espectro elástico, la vibración se amortigua rápidamente y la demanda de deformación inelástica no es excesiva. Esto se comprueba de comparar los espectros de la Fig 8, que corresponden al registro en el sitio SCT del 19 de septiembre de 1985, para comportamiento lineal y para comportamiento elastoplástico con factores de ductilidad de dos y de cuatro. Se aprecia que para $\mu = 4$ desaparece totalmente el pico para el periodo crítico y que la resistencia requerida para que la deformación máxima no exceda de cuatro veces la de fluencia es cerca de un octavo de la ordenada elástica. El desplazamiento máximo también se reduce con respecto al del sistema con comportamiento lineal.

Para lograr un comportamiento dúctil como el descrito anteriormente, hay que garantizar que la capacidad y rigidez de la estructura no se deterioren ante los numerosos ciclos de deformación inelástica que se van a inducir por los frecuentes sismos intensos y de larga duración que se presentan en el valle de México. Para ello se requiere de extremos cuidados en el diseño y detallado de las estructuras de acero y especialmente en las de concreto.

Resultó evidente de la evaluación del desempeño de los edificios en 1985 que las estructuras de la ciudad de México no poseían en general estas características y que por tanto fueron particularmente afectadas aquellas construcciones cuyo periodo fundamental de vibración era cercano al dominante del terreno. Es de suponerse que con los requisitos impuestos por el nuevo Reglamento de Construcciones se cuente con un comportamiento inelástico dúctil y estable que dé lugar a una gran capacidad de disipación de la energía introducida por un sismo. Sin embargo, hay que considerar que a las deformaciones inelásticas importantes van aparejados signos externos de daño, como agrietamientos de cierta consideración, que son siempre indeseables.

Por todo lo anterior, y dado que es posible determinar

con buen grado de precisión el, o los, periodos críticos de un sitio dado, no conviene construir en este estructuras cuyos periodos naturales de vibración se encuentran cercanos a ellos. Eso se evita controlando la relación entre su peso y su rigidez lateral.

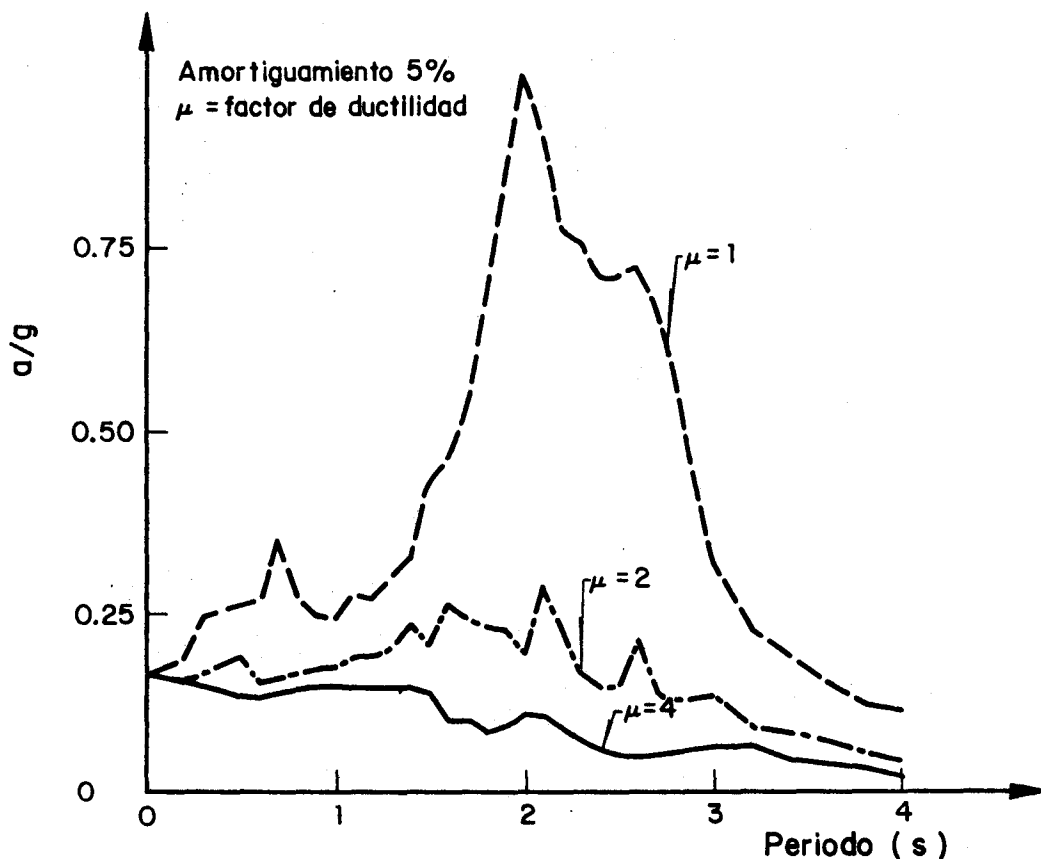


Fig 8. Comparación de espectros de respuesta para comportamiento elástico y elastoplástico. Registro SCT 190985

La información que se está obteniendo sobre las características de vibración del terreno en distintos sitios del valle podría llevar a una microzonificación más detallada, con condiciones de diseño (coeficientes sísmicos o espectros) diferentes para un número mayor de zonas de las que ahora se consideran. Por el momento parece conveniente mantener solamente las tres zonas actuales, con sus límites modificados de acuerdo con la nueva información.

Una vez que se cuente con una base más amplia de resultados y con una interpretación más detallada, es probable que se llegue a subdividir la zona del lago en dos partes

con distintas características de las acciones sísmicas de diseño. El Reglamento actual apunta en esa dirección, al requerir que se hagan consideraciones más conservadoras en el diseño sísmico para una subzona de la zona del lago. Los resultados disponibles a la fecha sugieren que debe ampliarse el tamaño de esa subzona y deben hacerse más netas las diferencias de requisitos entre las dos partes.

Por otra parte el Reglamento actual ya permite diseñar con espectros específicos de sitio, determinados a partir del cálculo del periodo dominante del suelo en el sitio. Sin embargo, por considerar que se pueden tener errores significativos al estimar el periodo dominante del suelo y el fundamental de la estructura, se requiere considerar la ordenada máxima del espectro para un intervalo muy amplio de periodos. Es de esperarse que al conocerse con más precisión las características dinámicas del suelo en los distintos sitios, se llegue en futuras modificaciones del reglamento a diferencias más netas en los requisitos para cada sitio y, en particular, que se incluyan recomendaciones que tiendan a desalentar que el periodo fundamental de la estructura se encuentre dentro de cierto intervalo crítico particular para el sitio en cuestión.

La hipótesis de que el movimiento que puede esperarse con un sitio dado debido a sismos provenientes de la zona de subducción, es siempre del mismo tipo y difiere solo por un factor de escala que depende de la magnitud del evento y de la distancia epicentral, tiene una consecuencia importante en cuanto a la seguridad de los edificios existentes.

Si se acepta que las características del movimiento del terreno en un sitio dado van a ser siempre aproximadamente las mismas y que el sismo del 19 de septiembre de 1985 tuvo una intensidad no muy inferior a la que se considera como sismo de diseño, se debe llegar a la conclusión que un edificio en zona del lago que soportó ese evento sin sufrir daño estructural tiene una seguridad sísmica adecuada. De hecho debe ser capaz de soportar movimientos de intensidad significativamente mayor, aunque tenga que recurrir a disipar parte de la energía introducida por estos mediante algún comportamiento inelástico. Para edificios que caigan en esta situación debería omitirse el requisito de revisarlos de acuerdo con los requisitos del nuevo Reglamento de Construcciones.

Hay algunas reservas a la conclusión anterior. Debe comprobarse exhaustivamente que la estructura no haya sufrido daño estructural, ya que en estructuras que no cumplan con requisitos estrictos de ductilidad, la presencia de daños estructurales menores puede indicar el principio de un proceso de deterioro que los vaya debilitando por la

frecuente ocurrencia de eventos sísmicos de intensidad significativa. Por otra parte para edificios calificados como de Grupo A, o sea aquellos como hospitales y escuelas, para los que el Reglamento requiere un nivel de seguridad sustancialmente superior que para las otras edificaciones, no puede pensarse que el sismo del 85 haya constituido una prueba de carga cercana a la intensidad de diseño. El incremento de 50 por ciento en las fuerzas sísmicas de diseño especificado para las construcciones del Grupo A, lleva a pensar que se justifica la revisión con el nuevo Reglamento aunque el edificio no haya sufrido daños. Finalmente, debe considerarse que los eventos que son críticos para la seguridad de los edificios en la zona de lomas y en buena parte de la de transición no son los sismos de la zona de subducción en la costa del Pacífico, sino sismos de menor magnitud generados mucho más cerca del valle de México. Por tanto los edificios en estas zonas no han sido sometidos en 1985 a una prueba de carga similar a las condiciones de diseños y su buen desempeño en esa ocasión no es prueba suficiente de seguridad adecuada.

Conviene reiterar que los resultados aquí comentados representan una interpretación preliminar y aproximada de la información disponible y que es de esperarse que, una vez que los especialistas la analicen más rigurosamente, se obtengan mayores y más precisas orientaciones sobre la respuesta sísmica del valle de México. Además se irán recopilando muchos nuevos registros, que complementarán la información disponible.

De lo tratado hasta aquí, resulta evidente la gran utilidad de la red de acelerógrafos instalada en el valle de México. La gran calidad de los registros obtenidos refleja la excelente labor de los grupos de técnicos que, en las tres instituciones, han instalado y operado la red. La red actual está concentrada en las áreas de mayor densidad de construcción actualmente. Convendría aumentarla hacia zonas donde se espera en el futuro la mayor construcción de edificios de cierta altura. Es lamentable, por otra parte, que no se cuente todavía con una red de instrumentos para registrar la respuesta de edificios representativos de los tipos de construcción más comunes en la ciudad de México. Estos registros son necesarios para comprobar los criterios y procedimientos que ahora se emplean para predecir la respuesta sísmica de los edificios para distintos niveles de excitación que induzcan no solamente una respuesta lineal, sino que en ocasiones lleven a un comportamiento no lineal. La gran frecuencia de movimientos sísmicos de intensidad moderada o grande, en la zona de lago del valle de México, hace de este el sitio ideal para obtener una gran cantidad de información que tendría interés no solo local sino también internacional.

Reconocimientos

Las tres instituciones que operan partes de la red de acelerógrafos de valle de México han publicado y difundido, a los pocos días de ocurridos los eventos, informes con los resultados completos. Esto es encomiable ya que permite a distintos grupos interesados hacer análisis e interpretaciones independientes de las mediciones.

Los cálculos y la elaboración de los resultados aquí presentados fueron realizados por Lorenzo Sánchez a quien se reconoce su hábil y oportuna labor.

Referencias

1. Figueroa, J "Sismicidad en la cuenca del valle de México" Instituto de Ingeniería, UNAM Publ No 289, jul 1971
2. Meli, R. y E. Miranda "Evaluación de los efectos de los sismos de septiembre de 1985 en los edificios de la ciudad de México" Instituto de Ingeniería, Vol 2-1, 1986
3. Singh, S.K. et al "A Study of the Amplification of Seismic Waves in the Valley of Mexico with Respect to a Hill Zone Site" Earthquake Spectra, Vol 4, No 4, nov 1988.