

## CRITERIOS DE DISEÑO DE ESTRUCTURAS EN ZONAS SISMICAS

Mario Rodríguez\*

### INTRODUCCION

Los terremotos son fenómenos naturales que pueden producir pérdidas considerables tanto de vidas como económicas. En la actualidad no existen procedimientos confiables que permitan predecir la ocurrencia e intensidad de los terremotos. Como consecuencia, es necesario construir estructuras cuyo comportamiento ante estos fenómenos naturales minimize la cantidad de daños y pérdidas, mediante una inversión también mínima por parte de la sociedad.

Lo anterior plantea un problema bastante complejo, ya que por un lado no se conoce totalmente la naturaleza y características de las acciones sísmicas, y por otro lado todavía no se han desarrollado procedimientos analíticos completos que representen el comportamiento de las estructuras ante acciones sísmicas.

Ante esta situación los reglamentos de construcción en zonas sísmicas, pretenden dar lineamientos generales que tienen como objetivo mejorar el nivel de seguridad sísmica de las estructuras. Esto se logra mediante especificaciones de procedimientos, generalmente simplificados, para efectuar el análisis,

\*Investigador, Instituto de Ingeniería, UNAM

diseño y construcción de las estructuras.

En este trabajo se pretende resumir de manera simplificada, algunos de los criterios de reglamentos de construcción para zonas sísmicas, mencionado aquellos que toman en cuenta la naturaleza de los movimientos sísmicos, como también las características que deben de tener las estructuras ante estos fenómenos naturales.

#### ORIGEN Y CARACTERISTICAS DE LOS TERREMOTOS, Y CRITERIOS PARA EVALUAR SUS EFECTOS EN LAS ESTRUCTURAS

La mayor parte de los terremotos se originan por rupturas o deslizamientos de partes de la corteza terrestre, en zonas conocidas como fallas activas. Los movimientos del terreno que se generan generalmente se registran con los llamados acelerómetros. Estos son aparatos que empiezan a funcionar a partir de un cierto nivel de aceleraciones del terreno, con lo cual es posible obtener registros de las variaciones de las aceleraciones del terreno en función del tiempo.

En la fig 1 se aprecia el registro de aceleraciones obtenido en el edificio de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT), en la ciudad de México, durante el terremoto del 19 de septiembre de 1935.

El registro de la SCT tiene características singulares, ya que corresponde a un tipo de movimiento sísmico propio de suelos

blandos, y localizados lejos de las fallas activas.

En la fig 2 se aprecia un registro bastante conocido y empleado en estudios de Ingeniería Sísmica, este registro corresponde al terremoto ocurrido en California en mayo de 1940, este registro se conoce con el nombre de El Centro porque se registró en una ciudad con este nombre. Este registro corresponde a un movimiento sísmico propio de suelos duros y cercanos a fallas activas.

Los movimientos sísmicos provocan fuerzas en las estructuras, las que varían de intensidad durante la duración del evento sísmico. Una aproximación a los valores máximos de estas fuerzas puede calcularse empleando los llamados espectros de respuesta. Un espectro de respuesta puede definirse como la respuesta sísmica (medida como desplazamiento, velocidad o aceleración) que tendría una estructura sencilla de un grado de libertad, y se expresa en función del periodo natural de vibración que tiene la estructura, que a su vez depende de la rigidez y masa de esta. Estos espectros se calculan según el criterio que se muestra esquemáticamente en la fig 3. (ref 1). En esta figura se muestra el espectro de respuesta, en este caso de desplazamientos, que se obtendría a partir del registro de El Centro mencionado anteriormente.

Con valores de espectros de respuesta como los de la fig 3 podrían calcularse las fuerzas que actúan en las estructuras

para un movimiento específico del terreno, como en el caso de la fig 3, en la que se calcula la respuesta de una estructura de un grado de libertad para el temblor de El Centro. Sin embargo, los Reglamentos de Construcción para zonas sísmicas no estipulan se diseñen las estructuras para un movimiento sísmico específico, sino mas bien en general estos reglamentos sugieren se diseñe con un espectro de respuesta que trata de ser representativo de la actividad sísmica y características de las estructuras del lugar en que se construye. Esto se consigue mediante el empleo de los llamados espectros de respuesta de diseño.

Si se comparan los registros de la SCT y El Centro mencionado anteriormente, se concluye que tienen características bastante diferentes. Por ejemplo, el registro de la SCT indica que el movimiento sísmico se caracterizó por tener una cantidad importante de pulsos de aceleraciones fuertes, con una duración considerable, además este registro tiene asociados desplazamientos del terreno con periodos de vibración (los cuales pueden definirse como el tiempo que dura un ciclo de vibración) bastante grandes, del orden de 2.0 seg. Por otro lado, el registro de El Centro tiene sólo un par de pulsos de aceleraciones fuertes, en este caso mayores que los de la SCT, y con una duración bastante corta. Además los periodos del terreno para este movimiento sísmico son pequeños, menores de 0.5 seg.

La cantidad de pérdidas de vidas humanas y daños en edificaciones, para el caso del terremoto de California fueron bastante menores que los ocurridos en el terremoto de México del 19 de septiembre de 1985. Esto indica que la aceleración máxima del terreno no es un índice que defina por sí sólo la capacidad de destrucción de un movimiento sísmico. Esto indica una limitación de los espectros de respuesta comentados anteriormente. En la actualidad se viene estudiando la manera de hacer intervenir otros parámetros para definir de manera más realista la respuesta de la estructura; sin embargo, el problema es que estos parámetros deben tomarse en cuenta de manera sencilla en el proceso de diseño, como se hace por ejemplo en el caso del llamado espectro de respuesta anteriormente comentado.

Uno de estos parámetros es la influencia del tipo de suelo en la amplificación de movimientos del terreno debido a sismos. Es conocido que durante el terremoto de septiembre de 1985 en México, la mayor parte de daños de diversos niveles, e inclusive derrumbes, ocurrieron en la llamada zona del lago del Distrito Federal. Esta zona se caracteriza por tener un suelo arcilloso de poca resistencia y con un nivel freático bastante cercano a la superficie, este tipo de suelo, clasificado como blando, tiene en la zona de daños una profundidad de aproximadamente entre 20 y 40 metros, debajo de los cuales se encuentran los llamados depósitos profundos cuya capacidad

de soporte es mayor que la de los suelos blandos.

Existen algunas hipótesis que tratan de explicar la naturaleza de las amplificaciones de los movimientos sísmicos en la zona del Distrito Federal en donde se concentraron los daños. Estas hipótesis aun están en estudio; sin embargo, la distribución de edificaciones dañadas durante el último terremoto, ha permitido efectuar una zonificación sísmica de la ciudad. Como consecuencia, el nuevo Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal (ref 2), ha dividido la ciudad en varias zonas, y a cada una de ellas le corresponde un espectro de diseño con determinadas ordenadas espectrales, las cuales aumentan a medida que la zona sea de mayor riesgo sísmico. Además, los valores de estas ordenadas espectrales han aumentado con respecto a los que tenían antes del terremoto de septiembre de 1935.

En la fig 4 se aprecia la nueva zonificación para el Distrito Federal de acuerdo al nuevo Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal (ref 2). También en la fig 5 se aprecia los distintos espectros de diseño elásticos para la zonificación anteriormente mencionada según este Reglamento, como también el espectro de respuesta para el registro de la SCT comentado anteriormente. Se aprecia en esta figura que para un cierto intervalo de periodos del espectro, las ordenadas espectrales del registro de la SCT superan a las de diseño. Esto indicaría que las estructuras diseñadas con el RDF37 en

este intervalo de periodos estaría del lado de la inseguridad. En realidad esto no es así si se considera el comportamiento inelástico que tiene la mayor parte de las estructuras durante terremotos, este comportamiento hace que si las estructuras tienen un buen diseño, de manera que puedan absorber la energía de un terremoto sin llegar a niveles de daños graves o derrumbes, estas estructuras van a estar sometidas a fuerzas menores a las que indicarían espectros de respuesta elásticos como los mencionados anteriormente. Esto indica la importancia que tiene el que las estructuras tengan la capacidad de absorción de energía mencionada, la que también se mide con el parámetro denominado ductilidad, el cual es directamente proporcional al parámetro anterior. Los reglamentos de construcción en zonas sísmicas reconocen la importancia de la ductilidad, y muchos de los requisitos que se estipula para el diseño de las estructuras tienen como objeto mejorar las características de la ductilidad de las estructuras como se comenta más adelante.

#### CRITERIOS DE DISEÑO PARA MEJORAR LA RESPUESTA DE LAS ESTRUCTURAS A MOVIMIENTOS SISMICOS FUERTES

La mayoría de los reglamentos de construcción para zonas sísmicas en diversas partes del mundo, incluyendo México, tienen una filosofía de diseño bastante definida. Esta se basa en aceptar que las estructuras que se diseñan con esta filosofía

durante un sismo de intensidad moderada no van a tener daños, y tampoco daños importantes en los llamados elementos no estructurales, como por ejemplo los muros divisorios de tabique, bloque, etc. Además, dentro de esta filosofía, se acepta que las estructuras durante un evento sísmico importante, va a tener daños estructurales, pero sin llegar al colapso o derrumbe.

Para cumplir con lo anterior los reglamentos estipulan requisitos mínimos que deben cumplir los aspectos tanto constructivos como los de el análisis y diseño de las estructuras.

En lo que se refiere a los aspectos constructivos estos requisitos se refieren por ejemplo al control de calidad de los materiales y mano de obra, como también a la inspección en el campo, para que la construcción se efectue de acuerdo a lo previsto en el proyecto respectivo. También se dan algunos lineamientos para mejorar el mantenimiento y durabilidad de la construcción.

Las observaciones de daños en estructuras durante terremotos, muestran que debe tenerse un mayor cuidado con los aspectos constructivos que se estan comentando. Por ejemplo, es común encontrar en estructuras dañadas por terremotos que el proyecto original sufrió alteraciones durante la construcción, en algunos casos por la construcción de tuberías para agua, desagüe o ductos de aire, en estos casos estas tuberías o ductos

se diseñaron de manera aislada en el proyecto de instalaciones sin tomar en cuenta el proyecto estructural, afectando de manera importante el comportamiento de los elementos estructurales, y causando que estos se comporten de manera que no fue considerada en el diseño, y en algunos casos fueron las causas de fallas locales o incluso de un mal comportamiento sísmico.

Un problema de naturaleza similar es el referente a los elementos divisorios, llamados también no estructurales. Es común encontrar casos en que se construyen nuevos ambientes por necesidades de operación del edificio; sin embargo, es frecuente en estos casos encontrar que estos elementos se construyen de manera arbitraria sin considerar sus efectos en el comportamiento sísmico, afectando la seguridad de la estructura por un comportamiento no considerado en el proyecto original.

En cuanto a los requisitos que se estipulan para el análisis y diseño de las estructuras, estos se refieren a la selección de los materiales y sistemas estructurales, como también a la aplicación de métodos sencillos para evaluar el comportamiento sísmico de la estructura. En lo que sigue, estos aspectos se comentan brevemente.

Los materiales que se seleccionan para construir estructuras en zonas sísmicas deben de tener algunas características deseables desde el punto de vista de comportamiento sísmico,

especialmente en lo que se refiere a una adecuada ductilidad, y también a un comportamiento estable ante la repetición de pulsos intensos del movimiento del terreno. Algunos autores afirman que estas características las reúne las estructuras de acero; sin embargo, en algunos casos también estas estructuras pueden presentar un comportamiento inadecuado desde el punto de vista de ductilidad y estabilidad de la respuesta sísmica, estos casos se producen por ejemplo cuando se tienen problemas de pandeo local. Otros autores mencionan que las estructuras de concreto reforzado pueden tener un comportamiento sísmico adecuado si se cumplen los requisitos de diseño que exigen algunos reglamentos modernos. En México, y en otros países de América Latina, es más frecuente la construcción de estructuras a base de concreto reforzado que las de acero, esto se debe principalmente por razones de costos de estos materiales.

Como resultado de las experiencias que se han tenido con el comportamiento de estructuras durante terremotos en diversas partes del mundo, puede afirmarse que la selección del sistema estructural es el paso más importante en el proceso del diseño sísmico, ya que un buen sistema estructural tendrá un buen comportamiento sísmico. Entre las características que debe tener un adecuado sistema estructural puede mencionarse por ejemplo la regularidad en la geometría de la estructura, tanto en planta como en elevación, como también la regularidad

en resistencia y rigidez de los diversos elementos que forman la estructura. Las experiencias que se han tenido con estructuras irregulares muestran que este tipo de estructuras durante terremotos tienen un comportamiento estructural generalmente diferente al considerado en el proceso de análisis y diseño. Este comportamiento en algunos casos no puede ser cubierto de manera confiable por los reglamentos de construcción, porque no se ha avanzado lo suficiente en el estado del conocimiento, por este motivo debe tratarse de seleccionar un sistema estructural con características regulares.

En cuanto al tipo de sistema estructural para estructuras de varios niveles, en México básicamente se emplean las estructuras a base de marcos, y las combinaciones de estos con muros de concreto reforzado. También ha sido una práctica común, antes del terremoto de 1985, el empleo de estructuras a base de losas planas reticulares. Este último sistema en muchos casos tuvo un inadecuado comportamiento sísmico durante el último terremoto, por lo que el nuevo Reglamento de Construcciones (ref 2) estipula importantes modificaciones al uso de este sistema estructural. En lo que se refiere al empleo de estructuras a base de marcos, o combinaciones de éstos con muros de concreto, también se han introducido importantes modificaciones (ref 2) para el análisis y diseño de estos sistemas estructurales.

Estas modificaciones pretenden mejorar el comportamiento

sísmico de las estructuras, se estipulan por ejemplos mejores y nuevos criterios para lograr en las estructuras una mejor ductilidad y capacidad de absorción de energía, con lo cual se espera se logre disminuir la cantidad de daños en estructuras, lesiones o pérdidas de vidas humanas, que ocurrirían durante un terremoto importante, típico de la actividad sísmica que caracteriza a México.

#### REFERENCIAS

- 1) Chopra Anil "Dynamics of Structures, A Primer" Earthquake Engineering Research Institute
- 2) Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal, Diario Oficial, México, 3 de julio de 1987

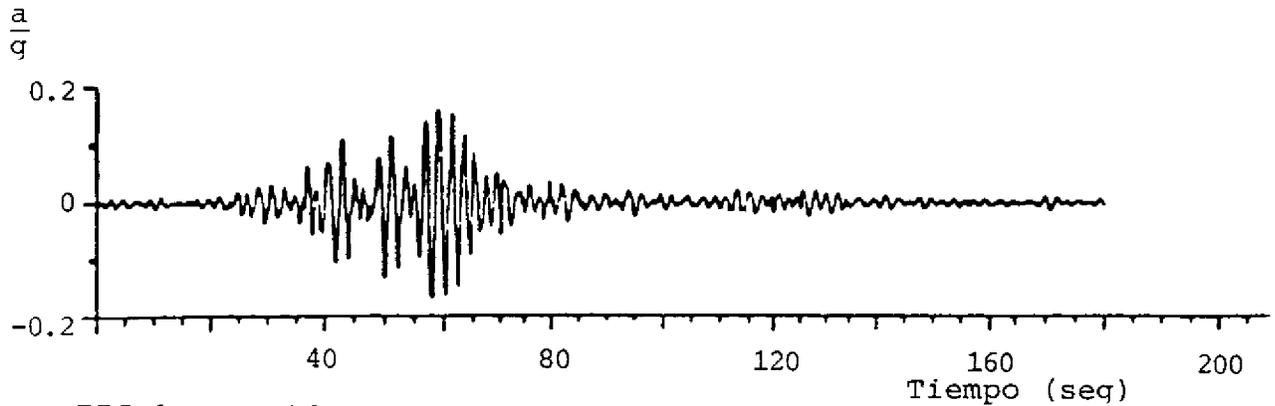


FIG 1. REGISTRO DE ACELERACIONES OBTENIDO EN EL TERRENO DEL 19 DE SEPTIEMBRE DE 1985 EN MEXICO, EDIFICIO DE LA SECRETARIA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTE

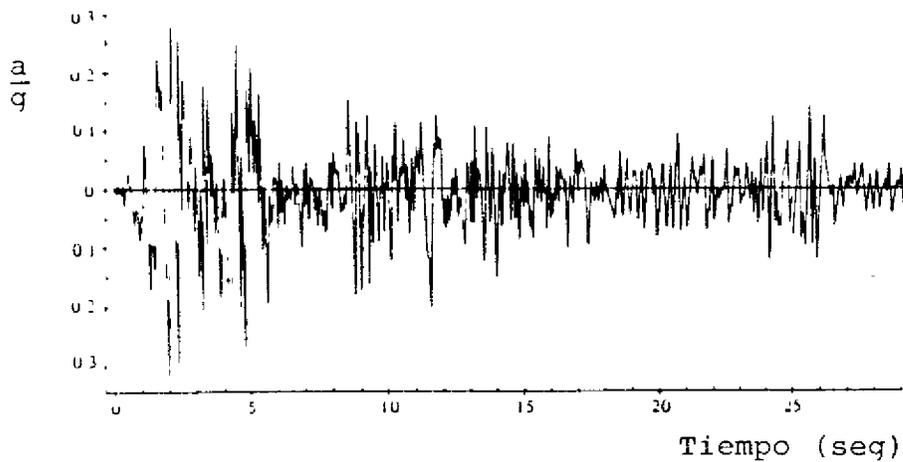


FIG 2. REGISTRO DE ACELERACIONES OBTENIDO EN EL TERREMOTO DEL 18 MAYO DE 1940 EN EL CENTRO, CALIFORNIA

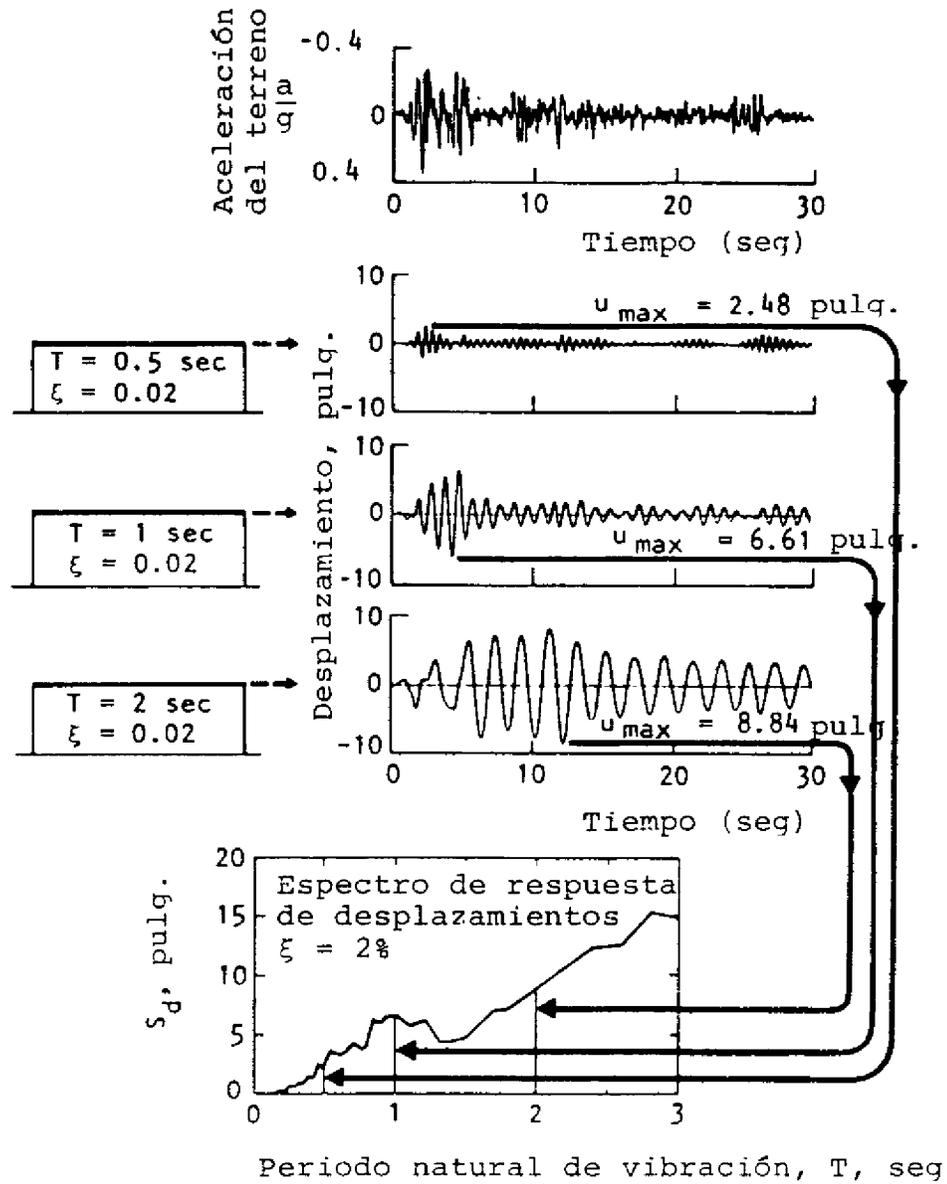


FIG 3. CRITERIO PARA CALCULAR ESPECTROS DE RESPUESTA DE DESPLAZAMIENTOS (REF 1)

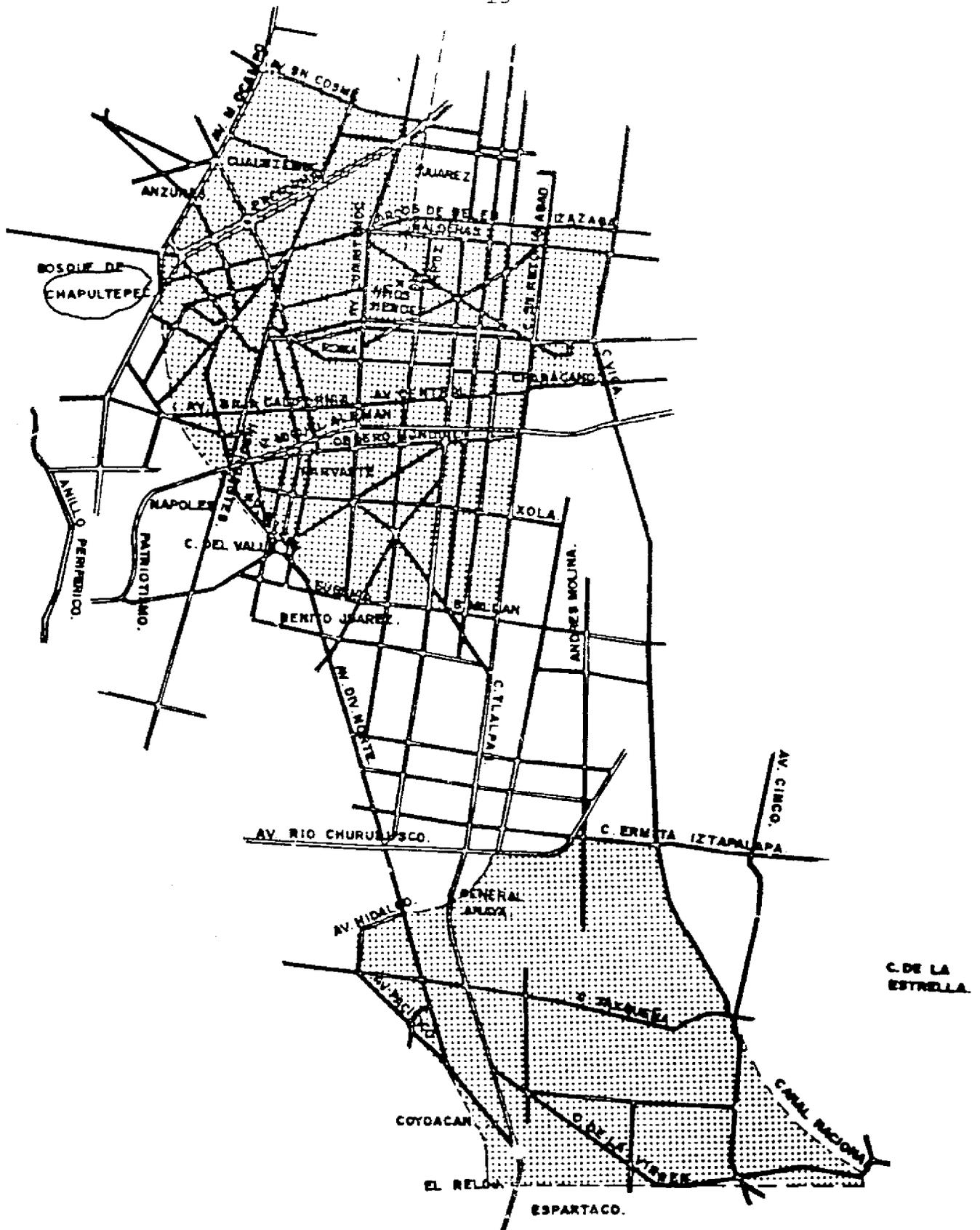


FIG 4. SUBZONIFICACION DE LA ZONA DEL LAGO Y DE LA ZONA DE TRANSICION DEL DISTRITO FEDERAL SEGUN EL RDF-87 (REF 2)

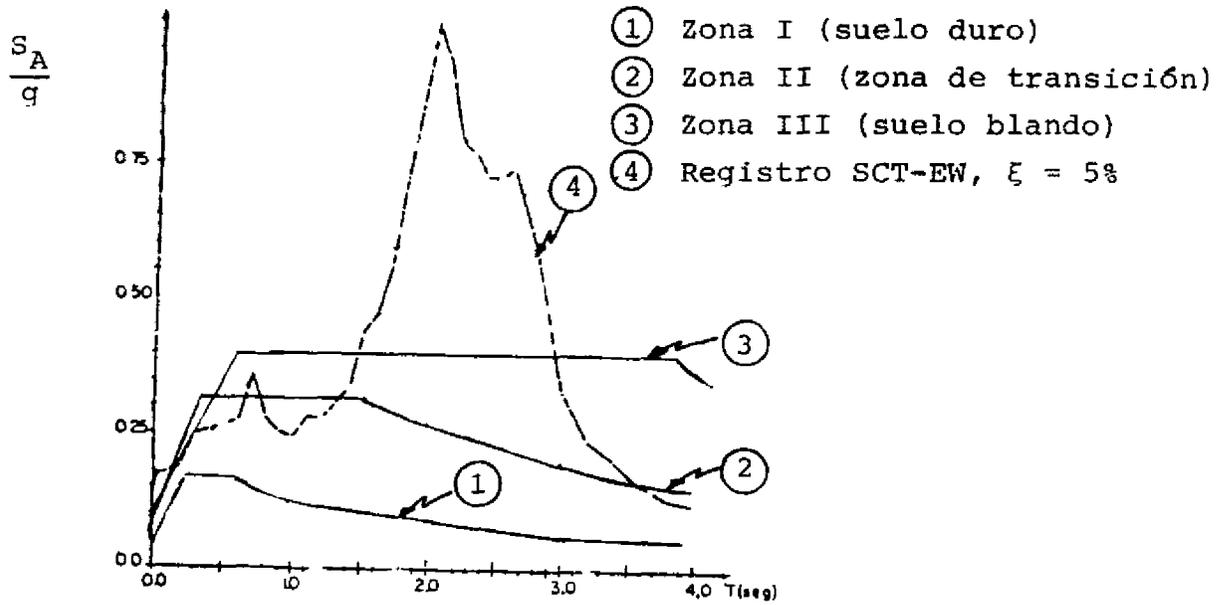


FIG 5. ESPECTROS DE RESPUESTA DE DISEÑO PARA EL DISTRITO FEDERAL SEGUN EL RDE-87 Y ESPECTRO DE RESPUESTA OBTENIDO PARA EL REGISTRO DE LA SCT-EW DEL 19 DE SEPTIEMBRE DE 1985