

5) Efectos P-delta. Los grandes desplazamientos de entrepiso observados y el desplome de muchos edificios son indicativos de la influencia decisiva de los efectos P-delta en los daños

6) Comportamiento inadecuado de losas planas ("waffle slabs"). Por razones de diseño incorrecto, las estructuras con losa plana en México solían ser muy flexibles e incapaces de desarrollar ductilidades elevadas. Muchas fallaron en las columnas, y en otros casos la columna penetró la losa, que posteriormente fallaba en cortante bajo la acción combinada de cargas verticales y laterales. Existieron casos en que las columnas punzaron varios niveles de losas.

7) Daños previos acumulados. Muchas estructuras en la ciudad presentaban desplome apreciable o asentamientos diferenciales producidos por cargas permanentes o terremotos previos; es probable que algunos elementos estructurales que no están a la vista también hayan tenido daños previos. Aunque no está clara la relación entre asentamiento diferencial, daño estructural y capacidad sísmica remanente, no hay duda sobre el efecto debilitador del daño acumulado.

8) Fallas de cimentación. Aunque son pocos los casos en que es evidente que la cimentación es la causa principal de la falla, existieron casos en que es fácil apreciar el gran riesgo impuesto por las reducciones de la capacidad del suelo en cortante después de la aplicación de muchos ciclos de carga alternante. Las cimentaciones sobre pilotes de fricción fueron especialmente susceptibles a estas reducciones.

Además de los daños en edificios, se tuvieron también numerosas fallas en las líneas de abastecimiento de agua (más de 60 fugas sólo en el DF) y electricidad. Se estima que el sismo dejó sin agua a cerca de 5 millones de habitantes del área metropolitana y que las fallas del acueducto del sureste ocasionaron la suspensión de un caudal de 7.6 m<sup>3</sup>/seg (Ayala y Urrego, 1992). Aunque los trabajos de evaluación y reparación de daños, así como los de mitigación por este concepto se iniciaron pocas horas después del sismo, el restablecimiento de la normalidad tomó más de dos meses. El sistema telefónico local sufrió graves perjuicios y el

servicio de larga distancia fue totalmente inoperante por varias semanas.

## PRINCIPALES ACCIONES TOMADAS DESPUÉS DE 1985

### Modificaciones al reglamento de construcción de la ciudad de México

Pocos días después del 19 de septiembre de 1985 se integró el Subcomité de Normas y Procedimientos de Construcción, dependiente de la Comisión de Reconstrucción formada por el presidente de la República. Este subcomité tuvo como primer objetivo la elaboración de normas de emergencia que se aplicarían obligatoriamente hasta en tanto no se publicara un nuevo reglamento, cuya elaboración tomaría más tiempo. Las normas de emergencia se expidieron cinco semanas después del terremoto. Los cambios que introdujeron estuvieron basadas en las investigaciones preliminares de los daños y en el conocimiento acumulado desde 1976 que por diversas razones no se había llevado a nivel reglamentario. A continuación se resumen las principales modificaciones que presentaron estas normas en lo que respecta a seguridad sísmica (Esteva, 1988):

1) Los coeficientes sísmicos de diseño fueron incrementados 67% en la zona de terreno blando y 33% en la zona de terreno intermedio; los coeficientes de la zona firme no sufrieron alteración.

2) Los factores reductivos de la resistencia nominal fueron disminuidos entre 20 y 30% para modos de falla frágiles en estructuras de concreto reforzado y acero; se aplicaron reducciones más drásticas a la adherencia entre el suelo y pilotes de fricción.

3) Los requerimientos para obtener comportamiento dúctil se hicieron considerablemente más estrictos

4) Se impusieron severas restricciones a las excéntricas de entrepiso provocadas por torsión.

5) Se hicieron más severas las ya existentes especificaciones relacionadas con uniformidad, en elevación, de la rigidez y resistencia de edificios.

6) Se propusieron limitaciones más estrictas en cuanto a desplazamiento de entrepiso permisible y en cuanto a separación mínima entre edificios adyacentes.

7) Se hizo obligatoria la participación de un supervisor independiente del constructor para edificios importantes a de gran extensión (área cubierta superior a 3000 m<sup>2</sup>)

8) Se hizo obligatoria la inclusión de detalles de conexiones y refuerzo en los planos estructurales.

9) Se impuso la necesidad de recabar permiso de la autoridad para cambiar el tipo de uso de una construcción. Se requiere para este fin un estudio detallado ejecutado por un ingeniero autorizado en que se demuestre que el nivel de seguridad de la edificación no es inferior al que ya poseía.

10) Se redefinieron los valores de las cargas nominales; se hicieron más estrictos los requerimientos de control de calidad en los materiales.

El reglamento de 1987 incluyó además los siguientes aspectos:

1) Se modificó el mapa de microzonificación reconociendo la existencia de una zona de mayor intensidad sísmica esperada dentro de la zona blanda del valle de México.

2) Se impuso la obligación de llevar a todas las construcciones importantes (pertenecientes al grupo A, según la clasificación del código) a niveles de resistencia última y condiciones de servicio compatibles con el nuevo código. Esta disposición se aplicó también a las estructuras ordinarias sobre cuya capacidad sísmica se tuvieran dudas, ya sea por los daños provocados por el temblor o por cualquier otra causa.

El Subcomité a cuyo cargo estuvieron las modificaciones a la norma está formado por destacados ingenieros diseñadores y constructores, arquitectos, investigadores y autoridades de la ciudad de México. Este cuerpo ha sesionado ininterrumpidamente desde 1985, analizando resultados que le presentan diversos grupos involucrados en el estudio, diseño y construcción de estructuras, y proponiendo modificaciones al código. El proceso de

actualización de este documento es ahora más dinámico que en el pasado, lo cual permitirá que el nuevo conocimiento y las experiencias derivadas de sismos en otras partes del mundo lleguen más rápidamente a la práctica profesional. El reglamento de construcciones de la ciudad de México es, a juicio del autor, la herramienta más eficiente de que dispone la ciudad para prevenir desastres sísmicos.

### Proyectos de investigación

Después de los temblores de 1985 se iniciaron numerosos esfuerzos para entender el fenómeno sísmico en todas sus facetas, y para extraer lecciones útiles en el mejoramiento de la seguridad sísmica de las edificaciones. Hasta ahora, la acción más redituable ha sido la instalación de la RACM, que a la fecha consta de más de 110 instrumentos digitales. La RACM es operada por cuatro instituciones: el Instituto de Ingeniería de la UNAM, el Centro de Instrumentación y Registro Sísmico de la Fundación Javier Barros Sierra, la Fundación ICA, y el Centro Nacional de Prevención de Desastres. Se cuenta en la actualidad con varios centenares de registros sísmicos en sitios con muy diversas características de suelo. En la figura 8 se presenta un mapa de la ciudad en que se muestra la localización de las estaciones acelerográficas que conforman la RACM. En la mayor parte de las estaciones se cuenta sólo con instrumentos de superficie de tres componentes; existen cerca de diez sitios en que se dispone de acelerógrafos enterrados a diversas profundidades (hasta un poco más de 100 m) cuyo objetivo es recabar datos sobre la amplificación que sufren las ondas sísmicas al atravesar los mantos blandos. Se cuenta también con media docena de edificios instrumentados que arrojarán información muy valiosa sobre el comportamiento de estructuras sometidas a solicitaciones importantes.

También, después de 1985, se iniciaron diversos proyectos para investigar la vulnerabilidad sísmica de las estructuras localizadas en la zona blanda del DF, la evaluación de las causas de los extensivos daños y el desempeño general de diferentes tipos de estructuras. Sería difícil describir todos los proyectos que se han realizado o están actualmente en ejecución. Nos concretaremos a describir sólo algunos, los cuales se han elegido por dos razones: 1) porque sus objetivos están directamente



vinculados con la prevención de desastres y el manejo de emergencias; y 2) por la mayor cercanía del autor con estos proyectos. Esta última razón sin duda propicia una visión sesgada de la situación de la investigación en México en estos temas.

#### *Mapas de riesgo sísmico para la ciudad de México*

En lo que sigue se describe sucintamente un modelo desarrollado para estimar intensidades sísmicas y pérdidas económicas esperadas en la ciudad de México por efectos de terremotos de gran magnitud que se generen en la costa del Pacífico. Mayor detalle sobre el sistema puede obtenerse en Ordaz et al (1992).

El modelo procesa información de diversos tipos: cantidad de construcción en el DF, propiedades de los suelos, intensidades sísmicas esperadas durante un temblor costero, y daños esperados a las construcciones de la ciudad. Los datos se almacenan en computadora, formando un sistema de información geográfico que permite generar mapas con la distribución geográfica de las variables de interés. En particular, pueden obtenerse mapas que muestran, con una resolución del orden de 500 m, los niveles de daño que se alcanzarían en la ciudad de México después de un temblor intenso. Los daños pueden estimarse en forma individual -para cada una de las 14 clases de estructuras que se consideran en el estudio-, o de manera acumulada, es decir, sumando los daños de todas las construcciones. La estimación puede llevarse a cabo para múltiples escenarios de ocurrencia de temblores; el análisis de los patrones esperados de daño durante los escenarios más probables resultará de gran utilidad para planear el manejo de un eventual desastre, en vista de que se conocerían de antemano las zonas que concentrarían las máximas afectaciones.

El sistema genera también mapas que muestran los distintos niveles de intensidad sísmica que se experimentarían en diversas zonas del DF como resultado de la ocurrencia de un temblor costero. En el modelo, la intensidad está expresada en términos de cantidades directamente relacionadas con el comportamiento de las estructuras ante sismo (seudoaceleraciones espectrales para 5% del amortiguamiento crítico). Por esta razón, el análisis de la distribución de intensidades esperadas ante temblores futuros permitirá saber con precisión en qué zonas de la ciudad son más vulnerables ciertos tipos

de estructura. Este conocimiento será útil para fines de reglamentación de la construcción y planeación de uso del suelo.

La zona estudiada comprende la porción más poblada del Distrito Federal. Esta zona fue dividida en 751 celdas, cuyas dimensiones típicas son del orden de 500 metros. La división fue efectuada tratando de que en cada celda los tipos y edades de la construcciones fuesen homogéneos, y utilizando como fronteras de celda límites naturales existentes, como calles y parques.

Para cada celda se determinaron las siguientes cantidades:

- a) Cantidad y calidad de la construcción
- b) Espesor de la capa más superficial de arcilla blanda y periodo predominante de vibrar del suelo
- c) Función de amplificación de las ondas sísmicas.

Para cada celda se determinó una función que mide cuánto se amplifican los movimientos sísmicos con respecto a los que se presentan en la zona de terreno firme de la ciudad. Estas funciones fueron calculadas con base en los registros sísmicos obtenidos en los últimos años y la información geotécnica descrita en el inciso anterior.

En el modelo que se expone, un escenario sísmico queda definido al postular la magnitud de un temblor hipotético y la distancia entre la ciudad de México y el área de ruptura de tal temblor. Dadas estas dos variables, es posible estimar el tamaño del movimiento sísmico en un sitio de terreno firme del DF mediante relaciones semiempíricas. En vista de que, como se describe en el inciso c), se dispone de funciones de amplificación entre este sitio y las 751 celdas de que consta el modelo, es posible también determinar el tamaño de los movimientos del terreno que se presentarán en cada celda. El tamaño de los movimientos del terreno se expresa en términos de *espectros de respuesta de aceleraciones*. En la figura 9 se presenta un mapa con la distribución de la aceleración máxima del terreno (en  $\text{cm}/\text{seg}^2$ ), en la dirección EW, para un temblor como el del 19 de septiembre de 1985. En las figuras 10-11 se presentan mapas similares para ordenadas del espectro de respuesta correspondientes a otros periodos. Nótese que las intensidades sísmicas son máximas cuando coinciden el periodo

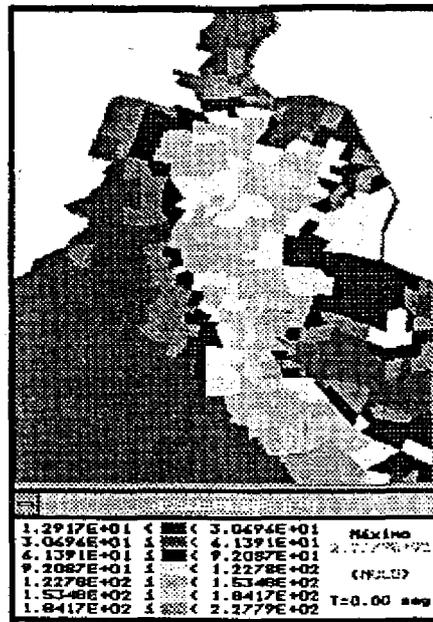


Figura 9. Distribución estimada de aceleración máxima del terreno para un temblor como el del 19 de septiembre de 1985 (M=8.1, R=280 km)

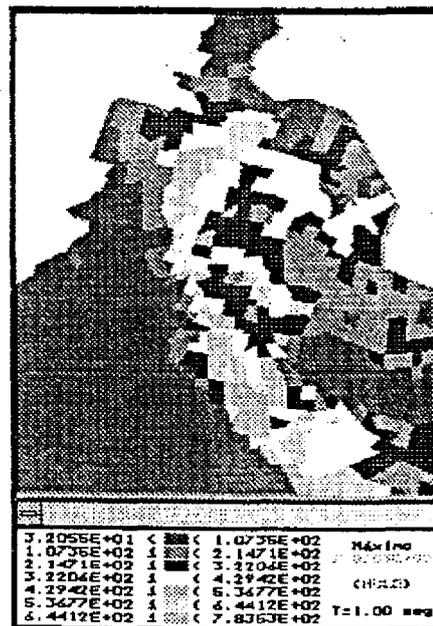


Figura 10. Distribución estimada de ordenada espectral de 1 seg. (5% de amortiguamiento) para un temblor como el del 19 de septiembre de 1985 (M=8.1, R=280 km)



Figura 11. Distribución estimada de ordenada espectral de 2 seg. (5% de amortiguamiento) para un temblor como el del 19 de septiembre de 1985 (M=8.1, R=280 km)

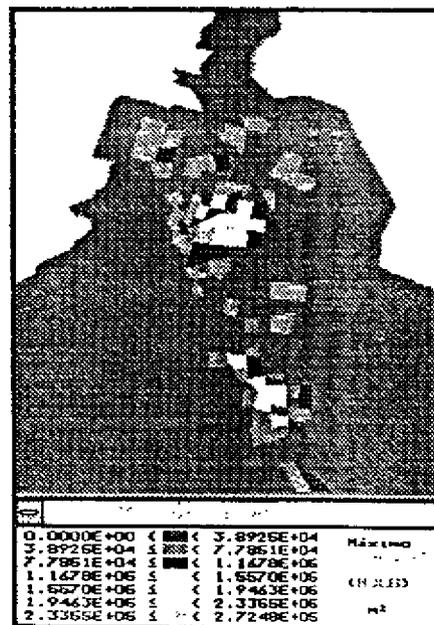


Figura 12. Distribución del daño total estimado para un temblor como el del 19 de septiembre de 1985 (M=8.1, R=280 km)

predominante del suelo y el periodo al que se miden las aceleraciones.

Una vez que se dispone de la cantidad de construcción por clase estructural y de una medida de la intensidad sísmica en cada celda durante el temblor postulado, procede calcular el daño esperado a las edificaciones. Para este propósito se derivaron relaciones intensidad-daño empíricas, a partir de estimaciones de las pérdidas económicas experimentadas durante temblores previos, particularmente los eventos del 14 de marzo de 1979 y 19 de septiembre de 1985. Estas estimaciones se basaron en información recopilada por las compañías de seguros y en los levantamientos de daños llevados a cabo después de los sismos de 1985. Las pérdidas económicas se expresan, en primera instancia, en términos de un índice de daño, cuyo valor esta entre 0 (pérdidas nulas) y 1 (pérdida total), que expresa qué fracción del valor de las construcciones se perdió. Posteriormente, este índice de daño es multiplicado por el área cubierta con estructuras de la clase considerada en el sitio que se estudia. De esta manera, el daño queda expresado en términos de un área equivalente perdida; el valor monetario de la pérdida podría entonces obtenerse multiplicando el área equivalente perdida por el valor de reconstrucción de un metro cuadrado del tipo de construcción considerada.

En la figura 12 se presenta un mapa con la distribución de daños totales calculados para un temblor como el de 1985. Nótese, al comparar esta figura con las figuras 9-11, que las zonas de máximo daño no necesariamente coinciden con las de máxima intensidad sísmica. Los patrones de daño están gobernados tanto por la distribución de intensidad sísmica cuanto por la cantidad de construcción y la vulnerabilidad de las clases estructurales predominantes en cada zona.

#### *Sistema de estimación temprana de daños*

En el modelo que se ha descrito en el inciso anterior, el cálculo de daños esperados se inicia estimando el tamaño de los movimientos del terreno que se producirían durante un temblor en un punto de la ciudad de México (la estación acelerográfica de Ciudad Universitaria). Sin embargo, si se conociera el tamaño de los movimientos del terreno en otro u otros sitios del DF, el cálculo de daños sería también factible. En vista de esto, el modelo, con

algunas simplificaciones, será útil para proporcionar una estimación preliminar, pero sumamente rápida, de los daños producidos por un temblor que realmente ocurrió.

Para esto, se han instalado estaciones acelerográficas que registrarán los movimientos del terreno en ciertos puntos de la ciudad y enviarán, en tiempo real, esta información a una computadora localizada en un puesto central de control. Estos datos servirán para determinar, de manera aproximada pero en unos cuantos segundos, el tamaño del temblor y algunas de sus características espectrales más relevantes. Esta información sobre el tamaño del temblor será introducida al sistema de información geográfica antes descrito, el cual se encargaría de estimar las intensidades sísmicas en toda la ciudad y, posteriormente, calcular los daños. Se considera que el sistema será capaz de generar un mapa de daños en pocos minutos. Esto quiere decir, en vista de la gran duración de los temblores en la ciudad de México, que quizá se pueda tener una estimación de los daños antes de que haya terminado el temblor.

La evaluación preliminar de los daños calculados, sea que se haga automáticamente o con la intervención de seres humanos, servirá para disparar las primeras acciones de manejo de la emergencia e información al público.

#### *Sistema de alerta sísmica*

Como se ha mencionado anteriormente, los temblores que históricamente han dañado a la ciudad de México se han originado en la costa del Pacífico. Existe en la actualidad un consenso entre los sismólogos mexicanos en el sentido de que la zona de la costa en que es más probable que ocurra un gran temblor a mediano plazo es la situada frente a las costas del estado de Guerrero (ver figura 1) a unos 300 km de distancia de la ciudad de México. Esto quiere decir que el tiempo que transcurre entre la generación del temblor y la llegada de las primeras ondas sísmicas al valle de México es del orden de un minuto. Además, normalmente las ondas que viajan más rápidamente no son las que transportan la mayor porción de la energía, por lo cual la diferencia entre el tiempo de origen y el de arribo de fases suficientemente energéticas es de más de un minuto. Esta situación -epicentros tan lejanos del valle de México- ha dado pie al diseño

de un sistema denominado Sistema de Alerta Sísmica (SAS) que tiene como objetivo el de detectar la ocurrencia de un temblor frente a las costas de Guerrero, estimar su tamaño y emitir una señal de radio a la ciudad de México indicando la posibilidad de que en aproximadamente un minuto arriben las ondas generadas por el temblor. Damos a continuación una breve descripción del SAS.

El sistema de registro consta de 12 estaciones, equipadas con acelerógrafos digitales de tres componentes, computadora y transmisores de radio, con una separación de 25 km entre estaciones; la red acelerográfica del SAS cubre la llamada brecha de Guerrero y, de hecho, está diseñada para detectar sólo los eventos que ahí se originen. Las estaciones acelerográficas son autónomas y transmiten con un sistema redundante de muy alta confiabilidad. Cada instrumento está dotado de un algoritmo que, en principio, permite diagnosticar en un máximo de 15 segundos si el registro que se está obteniendo corresponde a un temblor de magnitud superior a 6 o no; se estima, sin embargo, que conforme se obtengan más registros de movimiento fuerte será posible calibrar el algoritmo con mayor precisión y así obtener diagnósticos más finos sobre el tamaño del temblor. Cada instrumento emite su señal de aviso en forma independiente, y basta con que uno de ellos determine que se trata de un sismo con  $M > 6$  para que se active la señal de alarma. Esta señal sería enviada a un puesto central a cargo del Departamento del Distrito Federal (el Ayuntamiento de la ciudad de México), desde donde sería distribuida a instalaciones públicas críticas, tales como el Sistema de Transporte Colectivo (Metro), los sistemas de abastecimiento de agua y energía eléctrica y las plantas termoeléctricas, con el fin de tomar las medidas preventivas que puedan llevarse a cabo en unos 40 seg.

Los aspectos tecnológicos del sistema están en una fase avanzada de diseño, la transmisión radial de alta confiabilidad está resuelta y, de hecho, el SAS está ya operando en fase de prueba, aunque algunos aspectos, como el algoritmo de identificación del tamaño del temblor, están todavía en estudio. Sin embargo, no existen todavía estudios suficientes sobre las implicaciones sociales de un sistema como este, ni se ha determinado cuál será su utilidad real en los diferentes ámbitos de la ciudad. Con todo, se considera que el SAS será una

herramienta útil en lo que a prevención de desastres sísmicos concierne.

## COMENTARIOS FINALES Y CONCLUSIONES

El temblor de 1985 hizo ver que, aunque las intensidades claramente excedieron las disposiciones reglamentarias, muchos casos de colapso o daño severo podrían haberse evitado con prácticas más adecuadas de conceptos de ingeniería que ya eran comunes en esa época. Esta es una lección que muchos terremotos catastróficos en el mundo han enseñado pero que, por desgracia, no se recuerda lo suficiente; detrás de un gran número de daños por sismo hay un defecto que la ingeniería ya consideraba como tal. Las implicaciones a futuro de esto son grandes: es seguro que el colapso de estructuras durante sismo en cualquier ciudad podría evitarse con la sola revisión cuidadosa y la aplicación de prácticas convencionales de ingeniería. Esto, acompañado de un reglamento de construcción que se aplique, es, a juicio del autor, la mejor herramienta de prevención de desastres sísmicos con que contamos en la actualidad. Es de extrema importancia contar con mecanismos que permitan que los resultados de investigaciones o experiencias lleguen lo más pronto posible, pero después de una adecuada reflexión, a la práctica profesional.

La gran diferencia que puede existir en los movimientos del terreno en una misma región por efectos de amplificación local es decisiva en el riesgo que enfrentan las construcciones. Prácticamente la totalidad de los daños en 1985 en la ciudad de México ocurrieron en sitios de terreno compresible; este es un patrón que se repite sistemáticamente en todos los casos de catástrofes sísmicas. La importancia de la investigación cuidadosa del subsuelo y de la adecuada evaluación de la amplificación que por esta razón pueden sufrir las ondas sísmicas difícilmente puede ser sobreestimada. Esto lleva a la necesidad de contar con técnicas que permitan anticipar el tamaño de los movimientos del terreno que se presentarán durante escenarios sísmicos futuros, así como la distribución geográfica de los daños estimados. Esto es herramienta indispensable para la microzonificación sísmica y la planeación de uso del suelo y manejo de emergencias. De acuerdo con la experiencia mexicana, la inversión