

EL TERREMOTO DE MEXICO DE 1985 (II)

LUIS DE MINGO CACHÓN
y JUAN A. VAQUERO CIDONCHA*

En esta segunda y última parte del artículo aparecido en el número precedente de esta revista se completa el estudio realizado por los autores sobre los hechos acontecidos en México con ocasión de los terremotos ocurridos el 19 y 20 de septiembre de 1985.

Junto a las consideraciones realizadas en torno a las zonas afectadas y estimación de daños que fueron expuestas en el artículo anterior, en esta ocasión, los autores de este trabajo refieren un análisis de la edificación y de las causas posibles de los daños sufridos por los edificios para inferir, finalmente, algunas recomendaciones sobre los aspectos constructivos tendentes a mejorar el comportamiento de las estructuras frente al riesgo de terremoto.

Las conclusiones extraídas de este análisis mantienen una vigente actualidad tras las constantes manifestaciones de este fenómeno, que continúa asolando al continente americano con acontecimientos recientes como el terremoto ocurrido en octubre de este año en El Salvador.

En el artículo precedente, se observaba que México es un país propenso a la actividad sísmica debido a la especial configuración de su corteza terrestre. Así, en lo que va de siglo México ha padecido estadísticamente una media anual de 11 terremotos de especial significación y, particularmente en la década de los años 60, el número de terremotos ocurridos en el país se aproximó a 300 con un promedio de 26 terremotos por año.

En el terreno del control de pérdidas, resulta especialmente útil establecer normas especiales de diseño y de resistencia de la edificación a los terremotos. De esta forma, cabe esperar que las pérdidas directas sufridas por los edificios e instalaciones sean menores contribuyendo, en mayor medida, a minorar las consecuencias catastróficas derivadas de un terremoto en zonas urbanas densamente pobladas.

Al igual que en otros países, la construcción en México ha ido desarrollándose conforme a unas normas recogidas en un Reglamento de la Construcción. Obviamente, desde el punto de vista de la prevención, dichas normas deben ser dinámicas en base a la experiencia. El estudio de la edificación y de los daños sufridos con ocasión de un terremoto constituye un elemento importante de análisis para adaptar y mejorar las normas y criterios de construcción de cara a futuros terre-

* Luis de Mingo Cachón, Ingeniero Técnico Industrial, y Juan A. Vaquero Cidoncha, Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos, pertenecen al equipo técnico de CORPORACIÓN MAPFRE. Ambos presenciaron las consecuencias del terremoto a los pocos días de ocurrir el suceso.

motos. En ese sentido, el análisis que se desprende tras la inspección de numerosos edificios afectados por el terremoto aludido se resume a continuación

TIPOS DE DAÑOS SUFRIDOS POR LA EDIFICACION

Los edificios que sufrieron mayores daños fueron construidos, en un 70 u 80%, entre 1957 y 1976 y tenían una altura de 5 a 15 pisos.

Hubo edificios bien diseñados que vieron rebasada su resistencia por los grandes esfuerzos generados, dada la extraordinaria magnitud del terremoto. Otros fallaron, debido en parte a la baja calidad de los materiales y en parte a la escasa supervisión durante su construcción. Y algunos, debido a que ni se diseñaron ni fueron bien construidos.

Entre los daños observados pueden citarse:

- Cuarteaduras, grietas y desprendimientos en muros perimetrales ocasionados por los altos esfuerzos cortantes generados
- Grietas y desprendimientos en acabados de muros divisorios producidos en la distorsión de los mismos.
- Grietas en los huecos de escalera y de los ascensores motivadas por los altos esfuerzos cortantes y de torsión. Esta parte de la edificación es muy susceptible, ya que sirve de elemento transmisor de esfuerzos de la estructura a la cimentación.
- Grietas, fisuras y microfisuras en pilares causadas por esfuerzos de flexión y torsión
- Fallas y roturas de pilares debidas a esfuerzos cortantes y de torsión
- Roturas de vigas en la unión con los pilares provocadas por los esfuerzos de torsión.
- Fracturas en zonas de las vigas donde el área de acero requerido por flexión variaba bruscamente
- Fisuras y grietas en vigas ocasionadas por los altos esfuerzos cortantes
- Fallos de elementos estructurales como consecuencia de desviaciones geométricas.
- Pérdidas de recubrimiento de hormigón en pilares y vigas por colocación deficiente o escasa de cercos o estribos.
- Roturas de forjados y alabeo de los mismos, incluso con roturas y desprendimientos parciales de bovedillas, debidas a grandes deformaciones.
- Hundimientos de forjados planos debidos a punzamientos por cortante.
- Rotura en la banqueta donde se asienta el edificio
- Desplome e inclinaciones en edificios generados por asentamientos diferenciales.
- Deformaciones o roturas de los dispositivos hidráulicos y los anclajes en los pilotes de control.
- Caída de edificios provocada por el gran momento de vuelco generado al fallar la cimentación.
- Elevación del nivel freático que inundó los sótanos agravando los defectos por asentamientos diferenciales.

En un buen número de edificios inspeccionados se ha podido comprobar que, aunque los edificios presentaban daños externos menores, los daños estructurales eran muy graves. En otros, el colapso total o parcial se ocasionó paralelamente con el terremoto. Mediante las inspecciones realizadas en los edificios afectados, se procedió a evaluar y cuantificar los daños con objeto de emitir un dictamen sobre el estado del edificio y su posible reparación.

POSIBLES CAUSAS DE LOS DAÑOS SUFRIDOS POR LOS EDIFICIOS

Entre las causas que pudieron dar lugar al colapso parcial o total de las edificaciones ó contribuir a la generación de daños, se pueden citar.

- **Errores de diseño**

- Incumplimiento en el proyecto de lo prescrito por el Reglamento de Construcción.
- Resistencia insuficiente de los muros de cerramiento y de los divisorios para aguantar los empujes horizontales.
- Progresivas reducciones de sección de los pilares con la altura
- Cimentaciones mal diseñadas, que se vieron afectadas por los problemas creados por las condiciones del subsuelo del Valle, que dieron lugar a hundimientos e inclinaciones. En general, los edificios cimentados con pilotes de punta se comportaron bien, pero los cimentados con pilotes de fricción tuvieron problemas, ya que las arcillas sufrieron remodelaciones que cambiaron sus características.

- **Defectos en materiales de construcción**

- Deficiente calidad de los materiales, bajos límites de seguridad en el acero, utilización de acero estirado en frío, en lugar de laminado en caliente, lo que pudo haber originado fracturas en las armaduras

Por otro lado, la baja calidad de la arena y la grava del Valle da lugar a hormigones de calidad inferior.

- **Errores de ejecución de la obra**

- Inadecuada colocación de armaduras y cercos, hormigonados defectuosos y desviaciones geométricas en elementos estructurales

- **Errores al no respetar la separación entre edificios colindantes fijada por el Reglamento de Construcción**

- Este hecho ocasionó choques entre ellos al oscilar cada uno con un período diferente. En algunos casos, el edificio con menor altura sirvió de cuña para romper el más alto

- **Errores en el uso de las edificaciones**

- Distribución impropia de las cargas. Ejemplos de ello fueron los edificios dedicados a fabricar textiles, que no habían sido diseñados para ser utilizados como almacén de telas o para

soportar maquinaria pesada que elevase de forma ostensible la sobrecarga de la edificación. Otros de estos ejemplos fueron los edificios públicos con archivos en los últimos pisos. En todos se produjo el efecto del péndulo invertido.

- Remodelación interna de las edificaciones por obras de reforma, por ejemplo, al hacer amplios salones en los primeros pisos, derribando para ello muros divisorios.
- Incorrecta distribución en los edificios, dejando un primer piso para estacionamiento de vehículos. Esto agravó su riesgo frente al terremoto al hacer que esta zona de la edificación fuese muy flexible.

Como puede observarse, la mayoría de los errores de uso se deben a ignorancia y confianza de sus propietarios

- **Efectos producidos por resonancia de las estructuras**

El daño se concentró en edificios de mediana altura cuyo período de oscilación se encuentra próximo al dominante. Conforme se van produciendo daños, se reduce su rigidez y llegan a igualarse los períodos. Los edificios de gran altura y muy flexibles sufrieron pocos daños al tener períodos naturales que sobrepasan los dominantes del subsuelo.

- **Extraordinaria intensidad del terremoto**

En este apartado se resalta el hecho de que algunos edificios bien calculados y construidos con arreglo al Reglamento de Construcción también sufrieron daños, debido a la extraordinaria y excepcional intensidad de este terremoto que generó estados tensionales, en muchos edificios, superiores a los previstos en el proyecto

EJEMPLO DE UN BUEN DISEÑO ESTRUCTURAL FRENTE AL TERREMOTO

En medio de una zona profundamente devastada del Distrito Federal se encuentra un edificio que, como un buen ejemplo de edificación sismorre-

sistente, no sufrió apenas daños (unos cristales rotos y avería en un ascensor) por el temblor de los días 19 y 20 de septiembre. Se trata de la Torre Latinoamericana, situada frente a la Alameda Central.

La Torre Latinoamericana es una edificación de 43 plantas cuya construcción, por la problemática del subsuelo, constituido por arcillas volcánicas compresibles con un alto contenido de agua, supuso un gran reto a la ingeniería para resolver los problemas geotécnicos que presentaba su cimentación.

El terreno está formado, como indica la Figura 1, con el nivel freático entre 3 y 4 metros de la superficie. Tanto las capas de arcillas I como la III tienen un gran porcentaje de montmorillonita y son muy compresibles. Las características de estas arcillas son:

- CAPA I: $C = 0,34$; $\sigma = 0,42 \text{ kg/cm}^2$
- CAPA III: $C = 0,50$; $\sigma = 0,88 \text{ kg/cm}^2$

Por otra parte, las arcillas se encontraban en un proceso de consolidación.

El profesor Zeevaert (1953) superó el reto al resolver el problema de cimentar esta torre de 140

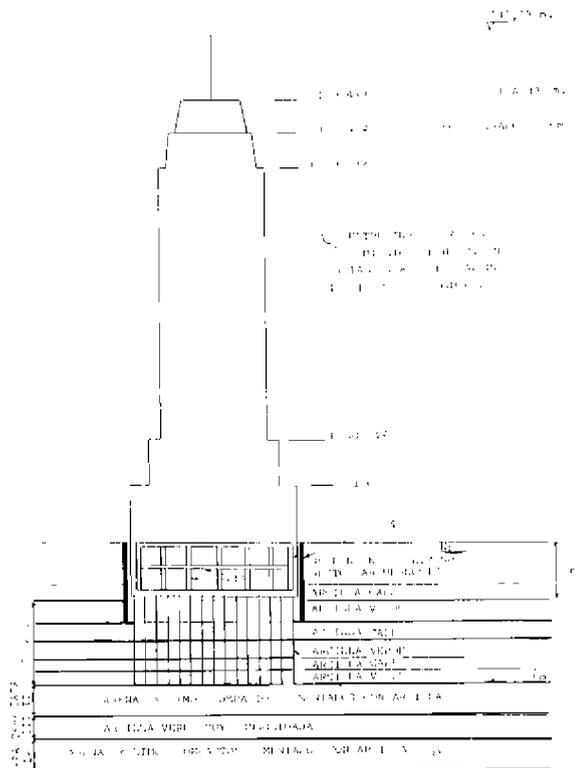


Fig. 1. — Torre Latinoamericana.

metros de altura y 23.500 toneladas de carga, con edificios próximos cimentados superficialmente.

De las soluciones propuestas:

- No se adoptó la solución de cimentación flotante en la capa de arcillas I, ya que en el caso de conseguir que la presión neta fuese nula, la torre se seguiría hundiendo al hacerlo el estrato sobre el que estaba cimentada, siendo éste el que más asientos sufre
- No se aceptó la medida de cimentación profunda con transmisión de las cargas por pilotes a la capa de arena IV, ya que con este sistema, al conseguir un cimiento con asientos pequeños, se tendrían importantes fenómenos de rozamiento negativo en los pilotes, al mismo tiempo que el edificio emergería de la superficie de forma notoria
- La solución realizada consistió en transmitir al estrato de arena II la parte de carga no compensada por flotación del edificio. La transmisión de $2,2 \text{ kg/cm}^2$ de presión total fue compensada en parte por 1 kg/cm^2 de presión del agua, con una losa de cimentación construida a 13 metros de profundidad, unida a los muros del sótano. Los $1,2 \text{ kg/cm}^2$ restantes se transmitieron por 361 pilotes de hormigón hincados en la capa de arena II.

Una vez eliminado el fenómeno de la subsidencia, debido al asentamiento de la capa I, el asiento del edificio se debería a dos factores: a la propia consolidación natural de todos los estratos de arcilla situados por debajo de las puntas de los pilotes, más el producido en el estrato III al recibir las presiones ejercidas por el propio edificio.

Su período vibracional era de 3,7 segundos y fue calculado para soportar un terremoto de magnitud 8.

CONFIGURACION GEOLOGICA DEL VALLE DE MEXICO

El Valle de México se ha ido configurando con el transcurso del tiempo. De las investigaciones

realizadas por el Ing. Loza y otros, se ha podido comprobar que en un principio la zona del Valle era una llanura, hasta que por el Este y el Oeste, debido a movimientos endógenos, se formaron dos grandes cordilleras. De este modo, la zona quedó confinada en dos sentidos, pero conservando su drenaje natural, es decir, se formó lo que se denomina un valle abierto. Con el transcurso del tiempo se crearon dos zonas de falla muy importantes, al Norte la Falla de Chapala-Acambay y al Sur la de Clarión, en la que se encuentran los volcanes de Popocatepetl e Iztaccihuatl; así, el Valle se cerró y las aguas de escorrentía, al encontrar impedido su desagüe natural por estas fallas, fueron llenando el Valle dando lugar a una laguna endorreica que se denominó Lago de Texcoco.

En el fondo del lago se fueron depositando los derrubios de ladera generados por la erosión de las aguas de lluvia, creando en él un depósito de aluviones de un espesor considerable.

La mayor parte de los edificios de la ciudad de México D.F. se encuentra cimentada sobre estos depósitos de aluvión, que, desde la zona más superficial hacia el interior, constan de las capas siguientes:

- Una capa de relleno de un espesor entre 5 y 10 metros.
- Una capa de arcilla blanda que varía en espesor, pudiendo llegar a unos 25-30 metros en las proximidades al centro de la ciudad.
- Una capa de arcilla y arena en estado de cementación que varía de uno a dos metros de espesor, pudiendo llegar en algunas zonas a 5 metros.
- Una segunda capa de arcilla que varía de 5 a 10 metros de espesor.
- Depósitos de arena, la profundidad a la que se encuentran varía desde 20 metros en el Suroeste de la ciudad, hasta cerca de 60 metros en la zona próxima al aeropuerto.

Un número importante de edificios de mediana y gran altura están cimentados por medio de pilotes sobre la primera capa de arenas cementadas, siendo un factor fundamental la profundidad de esta capa para evaluar el comportamiento del edificio a las vibraciones. Los investigadores de la Universidad Nacional Autónoma de México han encontrado correlaciones entre la distribución geo-

gráfica del daño estructural y la profundidad hasta los depósitos de arenas profundos, aunque mejores correlaciones se encuentran en la profundidad hasta la primera capa de arenas cementadas.

Propiedades dinámicas de las arcillas del Valle de México

Las arcillas que se depositaron en el fondo del lago de Texcoco y sobre las que se asienta la ciudad de México D.F. contienen un alto porcentaje de agua.

Se han realizado estudios muy profundos en laboratorio, con el fin de observar cómo influyen sus propiedades dinámicas en la transmisión de las ondas sísmicas; para ello se extrajeron testigos de la zona compresible. Se sometió a estas muestras a esfuerzos dinámicos de torsión, midiéndose su módulo de elasticidad transversal (G). En la Figura 2 se puede observar la curva de regresión estadística de G respecto al contenido de agua natural, estudiada por Raul J. Marsal, investigador de la Universidad Nacional Autónoma de México.

El módulo más frecuente en las arcillas del Valle varía entre 5 y 15 kg/cm^2 . Estas arcillas del Valle son de tener una fase sólida del 25% del peso total, poseen estructura y comportamiento elásticos frente a los esfuerzos dinámicos. La resistencia al corte es muy variable, alcanzando valores muy bajos en la zona compresible, alrededor de 0.5 kg/cm^2 e incluso menores.

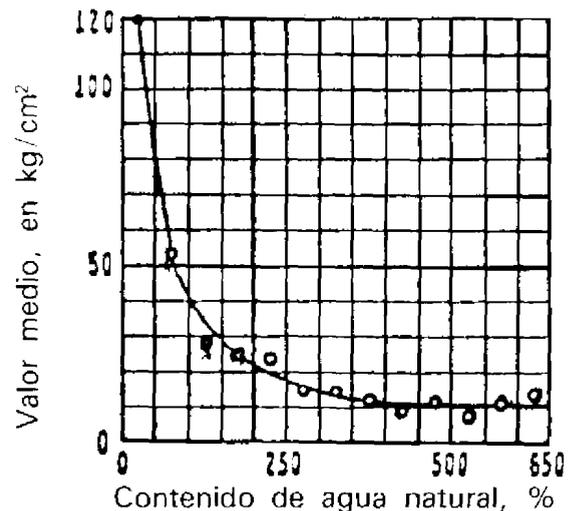


Fig. 2. Curva de regresión entre el módulo de elasticidad y el contenido de agua, de las arcillas del Valle (Prof. Marsal).

ZONIFICACION DEL ESTADO DE MEXICO Y DEL DISTRITO FEDERAL

Ante el gran riesgo sísmico de la zona, la Asociación Mexicana de Instituciones de Seguros ha adoptado un mapa sísmológico de la República (Fig. 3), en el que se zonifica el Estado en regiones calificadas de 0 a 3, de acuerdo al aumento en el riesgo sísmico.

De igual forma, en 1962 el Instituto de Ingeniería de la Universidad Autónoma de México elaboró un mapa en el que se delimitan las zonas en que se divide el distrito de Acapulco, según su riesgo

También en 1962 el mismo Instituto de Ingeniería de la Universidad Autónoma de México confeccionó los planos de zonificación sísmica del Distrito Federal (Fig. 5), que fueron adoptados por la Asociación Mexicana de Instituciones de Seguros. Las zonas en que la dividen son:

- Zona 2 De baja compresibilidad
- Zona T: De transición
- Zona C Compresible.

Todos estos mapas son utilizados por la Asociación Mexicana de Instituciones de Seguros (AMIS) para la suscripción de riesgos. Estas delimitaciones se han realizado tomando como base los es-



Fig. 3. Zonificación de la República de México.

sísmico. Dicho mapa fue adoptado por la Asociación Mexicana de Instituciones de Seguros y divide el distrito de Acapulco en dos zonas, la zona 3 y la zona R, de rellenos, que es más susceptible a sufrir daños por terremotos (Figura 4)

tudios geotécnicos de un gran número de sondeos realizados en las tres zonas.

La zona C comprende el fondo del antiguo lago de Texcoco y está constituida por estratos de ar-

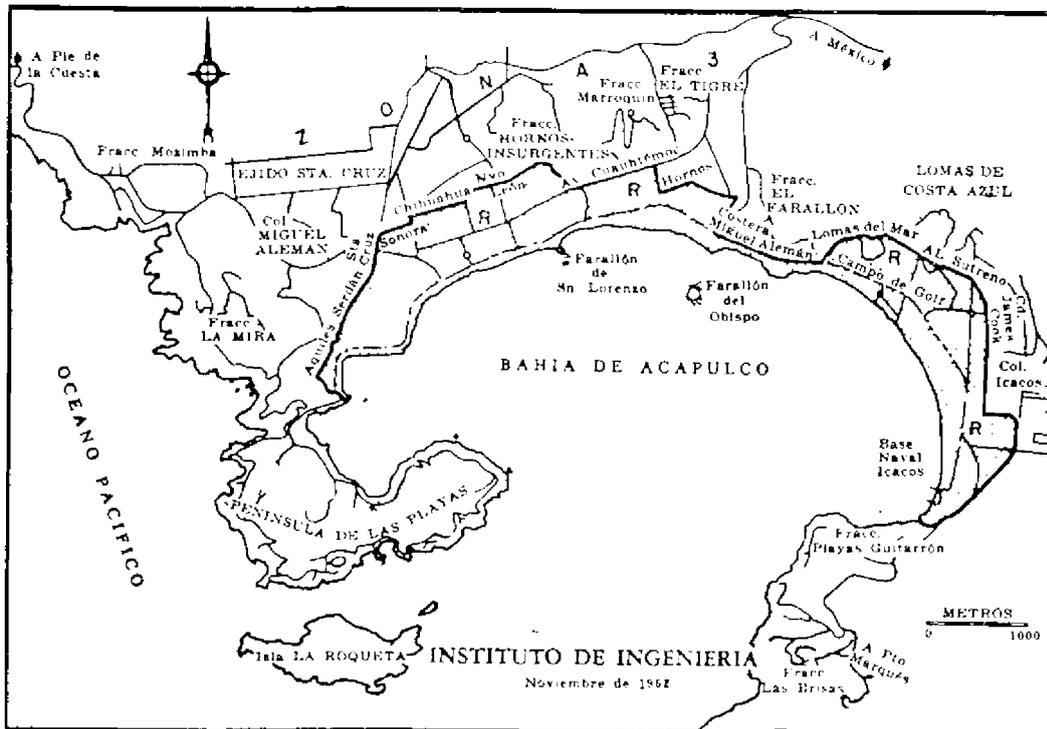


Fig. 4.—Zonificación del Distrito de Acapulco.

cilla y arenas de distintos espesores. La roca basal, según el estudio geofísico del Instituto Nacional de Investigación Científica, se ha localizado a unos 1.000 metros bajo la superficie.

La zona 2, en las proximidades de la sierra por el Sur y por el Oeste, tiene un subsuelo constituido por tobas volcánicas, conglomerados, arenas cementadas, etc. Los suelos de esta zona no presentan problemas de asentamientos importantes y su resistencia al corte puede superar los 5 kg/cm² en las capas ya cementadas.

La zona T o de transición se encuentra entre las dos anteriores. En ella, sobre las formaciones compactas y resistentes del mismo tipo que las descritas en la zona 2, se encuentran materiales areno-arcillosos o limo-arenosos, generalmente de origen volcánico y medianamente compresibles. Existen microzonas urbanas en las que se han localizado capas delgadas de arcilla blanda muy plástica

RECOMENDACIONES SOBRE ASPECTOS CONSTRUCTIVOS

Una vez conocida la magnitud de los daños producidos por los terremotos de septiembre de 1985, se debe insistir en una serie de recomendaciones que mejoren el comportamiento de las estructuras frente a los terremotos. De entre ellas, destacan:

- Realizar todo tipo de estudios geológicos y geotécnicos para analizar el subsuelo antes de realizar el proyecto
- Aumentar los factores de seguridad de acuerdo con la actividad sísmica y las condiciones geológicas de la zona donde se va a construir la edificación.
- Diseñar construcciones simétricas

