



Daños estructurales en Ciudad de México, producidos por los sismos del 28 de julio de 1957 y el 19 de septiembre de 1985*

Patricia Máximo Romero**✉
Rogelio Ramos Aguilar***
Ana Guadalupe Martínez Ortiz****
Andrés Hernández Sánchez*****

Cómo citar este artículo / To reference this article / Para citar este artigo: Máximo, P., Hernández, A., Ramos, R. y Martínez, A. (2017). Daños estructurales en Ciudad de México, producidos por los sismos del 28 de julio de 1957 y el 19 de septiembre de 1985. *Revista UNIMAR*, 35(2), 161-186.

Fecha de recepción: 21 de julio de 2017
Fecha de revisión: 09 de agosto de 2017
Fecha de aprobación: 21 de septiembre de 2017

RESUMEN

En este trabajo se presenta una reflexión sobre los daños en edificaciones desplantadas en la zona del lago de la Ciudad de México, causados por los sismos del 28 de julio de 1957 y del 19 de septiembre de 1985. El diseño estructural de las edificaciones y la falta de conocimiento de las propiedades dinámicas del suelo fueron las principales causas de su deficiente comportamiento estructural. A partir de los sismos, los especialistas mexicanos en esta área empezaron a analizar las fallas estructurales para determinar las causas que las originaron. Con las posteriores actualizaciones del Reglamento de Construcciones del Distrito Federal y de las Normas Técnicas Complementarias de Diseño fue cambiando la clasificación del tipo de estructuras y los coeficientes sísmicos aplicados al diseño estructural, y se siguen actualizando las normas para modificar los criterios y parámetros de diseño sísmico.

Palabras clave: daño, sismo, comportamiento dinámico, coeficiente sísmico.

Structural damages in Mexico City due to earthquakes of July 28, 1957 and September 19, 1985

ABSTRACT

The work reflects on the damages in buildings displaced in the lake area of Mexico City, caused by the earthquakes of July 28, 1957 and September 19, 1985. The structural design of the buildings and the lack of knowledge of the dynamic properties of the soil were the main causes of its poor structural behavior. From the earthquakes, the Mexican specialists in this area began to analyze the structural failures to determine the causes that originated them. With the subsequent updates of the Construction Regulations of the Federal District and the Complementary Technical Standards of Design, the classification of the type of structures and the seismic coefficients applied to the structural design was changed, and the Complementary Technical Standards are updated to modify the criteria and parameters of seismic design.

Key words: damage, earthquake, dynamic performance, seismic coefficient.

* Artículo Resultado de Investigación. El *Temblor de Ángel* y el *Sismo de Michoacán* provocaron daños y colapsos en estructuras desplantadas en la zona del Lago de la Ciudad de México. En este trabajo se muestra la características de los reglamentos y normas vigentes de diseño por sismo, que influyeron en el deficiente comportamiento sísmico de muchas estructuras.

** Maestra en Ingeniería; Ingeniera Civil. Profesora Investigadora, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, México. Correo electrónico: ing_patricia@yahoo.com.mx / patricia.maximo@correo.buap.mx

*** Maestro en Ciencias; Ingeniero Topógrafo. Profesor Investigador, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, México. Correo electrónico: rogelio_ramosa@yahoo.com / rogelio.ramos@correo.buap.mx

**** Estudiante de la Licenciatura en Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, México. Correo electrónico: AnaG_Mz@hotmail.com / ana.martinezo@alumno.buap.mx

***** Maestro en Arquitectura; Arquitecto. Profesor Investigador, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, México. Correo electrónico: andres_sanchez_hernandez@yahoo.com.mx / andres.sanchez@correo.buap.mx



Danos estructurais na Cidade do México produzidos por os sismos de 28 de julho de 1957 e de 19 de setembro de 1985

RESUMO

O trabalho reflete sobre os danos nos edifícios deslocados na área do lago da Cidade do México, causada pelos terremotos de 28 de julho de 1957 e 19 de setembro de 1985. O projeto estrutural dos edifícios e a falta de conhecimento das propriedades dinâmicas do solo foram as principais causas do seu fraco comportamento estrutural. A partir dos terremotos, os especialistas mexicanos nesta área começaram a analisar as falhas estruturais para determinar as causas que os originaram. Com as atualizações subsequentes do Regulamento de Construção do Distrito Federal e das Normas Técnicas Complementares de Projeto, estava mudando a classificação do tipo de estruturas e os coeficientes sísmicos aplicados ao projeto estrutural, e as Normas Técnicas Complementares foram atualizadas para modificar os critérios e parâmetros de projeto sísmico.

Palavras-chave: dano, sismo, comportamento dinâmico, coeficiente sísmico.

I. Introducción

La República Mexicana se localiza en una de las zonas sísmicas más activas del mundo; forma parte del Cinturón Circumpacífico, lugar donde se concentra la mayor actividad sísmica del planeta. La interacción entre las placas tectónicas de Norteamérica, Cocos, Pacífico, Rivera y del Caribe, son la principal causa de la alta sismicidad del país. Se identifican cuatro regiones sísmicas, clasificadas en función de la cantidad de sismos que se presenta en ellas. Los estados sujetos a la mayor actividad sísmica son los de la costa del Pacífico (Chiapas, Oaxaca, Guerrero, Michoacán y Jalisco), así como en la región de Mexicali, Baja California.

Los efectos sísmicos en la Ciudad de México están relacionados directamente con los tipos de suelo sobre los cuales se ha desplantado un gran número de estructuras con diversas configuraciones.

En esta zona, el contenido de agua es mayor; el índice de plasticidad excede y el índice de compresión puede llegar a un valor de , excediendo su valor con respecto al de la mayoría de los suelos, que es menor a. (Díaz, 2006, p. 111).

La aplicación de las cargas en la zona del lago de la Ciudad de México inició desde la fundación de Tenochtitlán en el siglo XIV, donde los aztecas construyeron templos, edificios y viviendas sobre pequeños islotes ubicados en el lago de Texcoco, uno de los tres lagos que formaban parte de la Cuenca de México; posteriormente la ciudad se extendió mediante la unión de los mismos. En el año 1521 llegaron los españoles e iniciaron la conquista de Mé-

xico, destruyeron las edificaciones construidas por los aztecas y reconstruyeron la ciudad con edificios y templos de estilo arquitectónico español, caracterizados por sus grandes dimensiones. La ciudad siguió creciendo lentamente hasta que en la década de los 40 se inicia una etapa de construcción de edificios altos, con un notable incremento de cargas sobre ese suelo lacustre, amplificador de las ondas sísmicas.

Tipos de suelo en el valle de México

Zona de Lago o Zona III (A, B, C, D): localizada en regiones donde antiguamente estaban los lagos de Texcoco y de Xochimilco. Los suelos son depósitos lacustres muy blandos y compresibles, con altos contenidos de agua, lo cual favorece la amplificación de las ondas sísmicas.

Zona de transición o Zona II: presenta características intermedias entre las zonas I y III.

Zona de terreno firme o Zona I (Lomas): situada en las partes más altas del valle, formada por suelos de alta resistencia y poco compresibles. La amplificación de las ondas sísmicas es reducida y los movimientos son de corta duración.

La Figura 1 muestra las zonas delimitadas por el tipo de suelo en el Valle de México.



Figura 1. Tipos de suelo en el Valle de México.

Fuente: Google Imágenes.

El sismo del 28 de julio de 1957, comúnmente conocido como 'Temblor del Ángel', dejó pérdidas humanas y estructuras severamente dañadas; el epicentro se localizó en las costas de Guerrero; su magnitud estimada fue de 7.5 en la escala de Richter. Causó daños importantes en edificaciones de la ciudad de México, principalmente en la zona del lago, donde la amplificación de las ondas sísmicas en combinación con las características de los edificios y los reglamentos utilizados para su diseño y construcción, fueron algunas de las causas que originaron su deficiente comportamiento estructural. Después de este sismo fueron creadas Normas de Emergencia con modificaciones en los coeficientes sísmicos, que, según los ingenieros e investigadores, eran adecuadas para diseñar edificaciones con un grado de seguridad satisfactorio.

El sismo ocurrido el 19 de septiembre de 1985 fue mucho más destructivo; hubo innumerables pérdidas humanas por el colapso y modos de falla de las edificaciones ubicadas en su totalidad en la zona del lago; la magnitud fue de 8.1 grados en la escala de Richter; el epicentro se localizó frente a las costas de Guerrero y Michoacán, por lo que comúnmente es conocido como 'Sismo de Michoacán'.

Desde la publicación del primer Reglamento de Construcciones del Distrito Federal (RCDF), se ha

actualizado periódicamente tanto el reglamento como las Normas Técnicas Complementarias de Diseño (NTCD), teniendo como objetivo mejorar la calidad de los diseños estructurales y la respuesta sísmica de las construcciones sometidas a sismos de magnitudes significativas.

2. Metodología

Este es un trabajo de recopilación de datos obtenidos de diferentes fuentes de información. Se leyó artículos relacionados con los temas, analizando la información y comparándola con la obtenida en medios de comunicación que se encuentran en internet, donde muestran los daños en las estructuras causados por los sismos mencionados. Uno de estos medios de comunicación es el periódico 'El Universal', que recabó información importante de los desastres ocurridos y de la evolución del RCDF.

Es importante señalar que uno de los aspectos más importantes de este artículo es la organización de la información acerca de las actualizaciones del coeficiente sísmico, según las experiencias que dejaron los sismos y las actualizaciones de las NTCD.

3. Resultados

Se presenta los coeficientes sísmicos aplicados al diseño de diferente tipo de estructuras, según su uso,

dependiendo del tipo de terreno caracterizado en la actualización del reglamento correspondiente.

Los datos más sobresalientes de los sismos difieren en las fuentes de información consultadas, por tanto, se hace un resumen de esta información.

También se presenta las causas de las fallas y colapsos de las construcciones con diferentes y similares configuraciones estructurales, observando que el tipo de suelo influyó en su deficiente comportamiento estructural. Los criterios de análisis y diseño que se utilizaba no fueron suficientes para proporcionar la seguridad estructural requerida.

A continuación se realiza una breve descripción cronológica de las modificaciones del RCDF.

1. El 20 de enero de 1920 se publicó el primer RCDF.

2. En 1942 se emitió una versión que sustituyó al Reglamento de 1920, asumiendo las recomendaciones de otros códigos de construcción como los de San Francisco y los Ángeles, California. Este Reglamento restringía la altura de las construcciones a un máximo de 35 metros. La Tabla 1 muestra la clasificación de las estructuras y su descripción según su importancia y forma de ocupación, así como los coeficientes sísmicos recomendados, relacionados con la clasificación del tipo de las construcciones.

Se estipulaba que para calcular la fuerza sísmica se multiplicara el peso total de la estructura, incluyendo cargas vivas y muertas arriba del nivel considerado, por un coeficiente sísmico, determinado por la relación entre la aceleración del temblor supuesto y la aceleración de la gravedad.

Tabla 1. Clasificación de acuerdo al tipo de construcción y su correspondiente coeficiente sísmico según el RCDF publicado en 1942

Clasificación (Tipo)	Características	Coeficiente sísmico
I	Plantas de bombeo, depósitos de agua potable, estaciones de bombeo, plantas de energía, de tratamiento de aguas negras y monumentos que se desea conservar.	0.10
II	Escuelas, teatros, salas cinematográficas y similares.	0.05
III y IV	Hoteles, casas de vivienda o departamentos, edificios de despachos, plantas industriales, etc. Almacenes, elevadores de granos, etc.	0.025
VII y VIII	Residencias de lujo.	0.01

Elaboración: M.I. Patricia Máximo Romero.

No se tomaba en cuenta el tipo de terreno en el que las construcciones eran desplantadas, ni el incremento de las aceleraciones en los niveles superiores, provocado por la flexibilidad de la estructura. Se exigía la presentación de cálculos sísmicos para edificios con altura mayor a 16 metros o del doble de la menor dimensión de la planta, con excepción de las estructuras para lugares de reunión (Paredes, 1999).

3. En 1957, como consecuencia del sismo del 28 de julio, hubo adiciones al Reglamento a través de las Normas de Emergencia, en las cuales los coeficientes sísmicos eran mayores y dependían del

tipo de suelo en el que se construyera: firme, de transición o blando, así como del tipo de la estructura y su uso.

Se hizo especificaciones respecto a aceleraciones variables con la altura para obtener una envolvente de fuerzas sísmicas más adecuadas. Se permitió estructuras de mayor altura, pero detallando que aquellas mayores a 45 metros de altura, requerían un análisis dinámico especial. La Tabla 2 describe la clasificación de las construcciones de acuerdo a su uso, relacionadas con el RCDF publicado en 1942.

Tabla 2. Clasificación de las construcciones según su uso y su relación con la del RCDF publicado en 1942

Clasificación	Anteriores (Tipo)
A	I y II
B	III, IV, V y VI
C	VII y VIII

Elaboración: M.I. Patricia Máximo Romero

La Tabla 3 describe la clasificación de las construcciones según su estructuración, relacionada con el RCDF publicado en 1942.

Tabla 3. Clasificación de las construcciones según su estructuración y su relación con la clasificación en el RCDF publicado en 1942

Tipo	Construcciones
1	Estructuras de concreto o acero con muros de relleno que contribuyen a aumentar su rigidez, ligados y distribuidos adecuadamente.
2	Construcciones de concreto o acero que no tienen elementos ajenos a la estructura que contribuyan a aumentar su rigidez. Los contraventeos y muros de concreto ligado estrechamente a la estructura, eran considerados parte integrante de ésta.
3	Construcciones soportadas únicamente por muros de carga

Elaboración: M.I. Patricia Máximo Romero.

La Tabla 4 muestra los coeficientes sísmicos especificados para calcular la fuerza cortante en la base de los edificios.

Tabla 4. Clasificación de los coeficientes sísmicos según el grupo, clase de construcciones y tipo de terreno

Grupo	Clase	Tipo de terreno		
		Blando	Transición	Firme
		A	B	C
A	1	0.15	0.13	0.12
	2	0.20	0.18	0.15
	3	0.15	0.18	0.20
B	1	0.007	0.06	0.05
	2	0.10	0.09	0.07
	3	0.07	0.09	0.10
C	1, 2 y 3	0	0	0

Elaboración: M.I. Patricia Máximo Romero.

Se supuso una relación lineal de aceleraciones con valor nulo en la base y máximo en el extremo superior, tal que a , siendo V la fuerza cortante en la base, P el peso total del edificio y C el coeficiente sísmico.

Se aplicó por primera vez el criterio de diseño límite, con factores de seguridad de en flexión y de en carga axial para estructuras de concreto reforzado, y de y de , respectivamente para estructuras de acero.

El objetivo de la modificación de los coeficientes sísmicos y de los esfuerzos era el de obligar a que todas las estructuras fueran analizadas por sismo, entre otros.

“Las Normas de Emergencia limitaban también los desplazamientos relativos horizontales entre dos puntos sucesivos de restricción de columnas o muros de 0.002 de la diferencia de elevaciones entre dichos puntos, con [algunas] excepciones” (Paredes, 1999, p. 34).

Tabla 5. Clasificación de las construcciones según su uso y su relación con la clasificación en el RCDF publicado en 1942

Grupo	Características de las estructuras
A	Edificios gubernamentales y de servicios públicos (plantas de bombeo, centrales telefónicas y eléctricas, estaciones de bomberos y otros); hospitales (edificaciones esenciales); museos (edificaciones con gran valor); y aquellos con una superficie total construida superior a (escuelas, estadios, salas de espectáculos, templos, estaciones, terminales y similares).
B	Construcciones para la habitación privada o de uso público donde no existe frecuente aglomeración de personas, bardas cuya altura excediera de ; bodegas para guardar materiales y equipos costosos y aquellas cuyas fallas pudieran poner en peligro otras construcciones de este grupo o del grupo A.
C	Construcciones aisladas cuya ejecución no exigía la intervención del director responsable de obra y cuya falla por sismo no pudiera causar daños a estructuras de los dos primeros grupos, a seres humanos o materiales o equipos costosos.

Elaboración: M.I. Patricia Máximo Romero.

También se realizó una clasificación con respecto a la estructuración, como se muestra en la Tabla 6.

Tabla 6. Clasificación de las construcciones según su tipo y comportamiento mecánico

Tipo	Comportamiento mecánico
1	Estructuras que se deformaran básicamente por flexión de los miembros estructurales al ser sometidas a cargas laterales. Se incluía construcciones con altura máxima de 7 m o 2 pisos que cumplieran con los requisitos del método estático simplificado.
2	Estructuras cuyas deformaciones ante la acción de cargas laterales eran debidas básicamente a esfuerzo cortante o fuerza axial en los miembros estructurales.
3	Tanques elevados, chimeneas y construcciones soportadas por una sola hilera de columnas orientadas perpendicularmente a la dirección que se analizara o cuyas columnas no estuvieran ligadas a los distintos niveles por elementos rígidos y resistentes capaces de distribuir adecuadamente las fuerzas horizontales.

Elaboración: M.I. Patricia Máximo Romero

4. En 1966 se publicó otro Reglamento y aparecieron las Normas de la Dirección General de Obras Públicas.

En 1957 la Torre Latinoamericana tenía instalados dispositivos para medir el desplazamiento relativo entre algunos niveles, con lo cual se estimó el coeficiente sísmico de para esta estructura, incluyendo esta información en las Normas de Emergencia.

Se incorporó la zona de transición del suelo a la zona de suelo blando. Fueron modificados los grupos de edificios según su destino. La Tabla 5 muestra la nueva clasificación de las estructuras según su destino.

La Tabla 7 muestra los coeficientes sísmicos especificados para estructuras del grupo B.

Tabla 7. Coeficientes sísmicos para estructuras del grupo B en zonas de alta y baja compresibilidad

Estructuración Tipo	Zona de alta compresibilidad	Zona de baja compresibilidad
1	0.06	0.04
2	0.08	0.08
3	0.15	0.10

Elaboración: M.I. Patricia Máximo Romero.

“Para las estructuras del grupo A estos valores se multiplicaban por y para las del grupo C no se requería diseño por sismo” (Paredes, 1999, p. 35).

La Tabla 8 muestra los aspectos más relevantes de los tipos de análisis que se permitía en el RCDF.

Tabla 8. Tipos de análisis y sus especificaciones respecto a la fuerza sísmica, características de los suelos y de las estructuras

Tipo de análisis	Especificaciones
Estático simplificado	Para construcciones de uno o dos niveles, con muros y cargas que satisficieran una serie de requisitos, donde se verificaba que la resistencia al corte de los muros era suficiente.
Estático	Las fuerzas sísmicas actuantes en cada nivel eran obtenidas aplicando la fórmula , donde es el coeficiente sísmico de la tabla anterior; es el peso total de la estructura; es el peso de cada nivel; es la altura con respecto a la base. Se revisaba el efecto de momentos de volteo y efectos torsionales debido a la disposición asimétrica de cargas o de elementos resistentes, incrementando la excentricidad calculada en y adicionando una excentricidad accidental del de la máxima dimensión del piso, medida perpendicularmente a la dirección de análisis.

Dinámico

Compatible con las características de los sismos y el comportamiento del subsuelo y de las estructuras. Se proponía espectros de diseño tanto para terreno compresible como para terreno firme, pues incluían reducciones por amortiguamiento estructural. Las fuerzas eran calculadas suponiendo los efectos de cada modo de vibrar, pero en ningún caso se aceptaba fuerzas sísmicas de diseño menores que de las obtenidas con el método estático. Se restringía los desplazamientos relativos laterales, las deformaciones y la separación en colindancias.

5. A finales de 1976 fue aprobada una nueva versión del RCDF, modificando su forma y contenido. Con respecto a la forma, el título IV, Art. 202, establecía la obligatoriedad de apegarse a las NTCD en las que se especificaba los requisitos generales de seguridad y servicio para los materiales y sistemas estructurales particulares.

Se estableció una nueva zonificación cambiando los espesores de material compresible correspondientes para el tipo de suelo en el Distrito Federal: blando, de transición y firme.

Se modificó la forma para calcular los desplazamientos de la estructura bajo el sismo de diseño.

“[Fueron duplicadas] las excentricidades accidentales, usadas para el cálculo de efectos torsionantes en cada nivel de los edificios. También, se [consideró] tres métodos de análisis sísmico” (Paredes, 1999, p. 40).

6. En 1977 se publicó la cuarta edición del RCDF y se emitió el manual de las Normas Técnicas Complementarias para el Diseño y Construcción de Estructuras de Concreto, Mampostería, Acero y Madera.

“Se implementó la figura de director responsable de obra. Fue conocido como un documento de vanguardia a nivel mundial e influyó en los códigos de Nueva Zelanda, Canadá, Estados Unidos, El Salvador, Nicaragua y Venezuela” (Grajeda, 2005, párr. 5).

7. En 1984 se inició una nueva revisión del Reglamento para incluirle los nuevos avances tecnológicos.

8. Después del sismo del 19 de septiembre de 1985 y su réplica, fueron emitidas las Normas de Emergencia que debía aplicarse en los proyectos de reparación de todas las construcciones dañadas por estos sismos, así como las nuevas edificaciones desplantadas en las zonas de terreno blando y transición.

Entre las modificaciones más importantes figura el incremento de los coeficientes sísmicos elásticos a en la zona blanda y a en la zona de transición. También se cambió las aceleraciones del terreno a y para cada zona, respectivamente.

9. El 3 de julio de 1987 se publicó la quinta edición del RCDF, con modificaciones técnicas y administrativas que arrojaron las experiencias del sismo de 1985.

Con respecto a la seguridad estructural, se incorporó algunas medidas tomadas de las Normas de Emergencia de 1985; las estructuras fueron clasificadas en dos tipos según su destino; los proyectos arquitectónicos deberían considerar la estructuración regular para reducir los efectos sísmicos que provocan momentos torsionantes importantes.

10. El 2 de agosto de 1993 se publicó otra versión del RCDF (Grajeda, 2005).

11. El 16 de febrero de 2004 se publicó en la Gaceta Oficial del Distrito Federal un nuevo Reglamento de Construcciones que incorporó numerosos avances científicos y tecnológicos.

Se creó la manifestación de construcción y desapareció el permiso de construcción; se implementó las obligaciones de los directores responsables de obra y corresponsables, y se presentó los criterios para el diseño estructural de las edificaciones (Grajeda, 2005).

12. El 6 de octubre de 2004 se publica en la Gaceta Oficial del Distrito Federal, las Normas Técnicas Complementarias. En ellas se considera las zonas del Distrito Federal que fija el artículo 170 del Reglamento. Adicionalmente, la zona III se subdivide en cuatro subzonas. La Tabla 9 muestra la zonificación sísmica de la Ciudad de México y la Figura 2, la misma clasificación.

Tabla 9. Clasificación de las zonas sísmicas en la Ciudad de México y sus correspondientes coeficientes sísmicos

Zona	I	II	III a	III b	III c	III d
Coefficiente sísmico (c)	0.16	0.32	0.40	0.45	0.40	0.30

Elaboración: M.I. Patricia Máximo Romero.

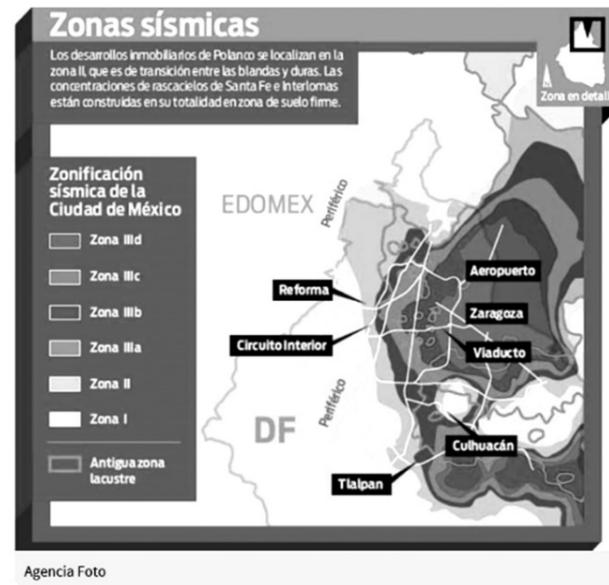


Figura 2. Zonificación sísmica de la Ciudad de México. Fuente: <http://www.excelsior.com.mx/2012/03/26/comunidad/821395>

Estas normas establecen que se puede aplicar el método de análisis simplificado, estático y dinámico; también dan una explicación detallada de los requisitos y características de las estructuras y del tipo de análisis que deberá utilizarse, los valores del factor de comportamiento sísmico y del factor de reducción de fuerzas sísmicas, cuyos requisitos para su aplicación son especificados.

Uno de los factores más importantes que influyó en el deficiente comportamiento estructural de edificios, ocasionado por el sismo de septiembre de 1985, fue la falta de condiciones de regularidad, por tanto, en estas normas ya se detalla los requisitos que se debe cumplir y que están en función de la configuración estructural, la rigidez, la resistencia al corte y la excentricidad torsional de entrepiso.

La Tabla 10 muestra los datos más relevantes del 'Temblor del Ángel' según diferentes fuentes de referencia. Se observa que las pérdidas humanas, materiales y económicas, difieren notablemente.

Tabla 10. Datos más sobresalientes del 'Temblor del Ángel' según diferentes fuentes de referencia

Fuente de información	Centro de Información y Registro Sísmico (CIRES)	(Orozco y Reinoso, 2007, p. 62)	ICA, 1992	Blog de Tomás Montero Torres
Magnitud	7.7	7.5 en la escala de Richter	Sin datos	7.7 en la escala de Richter
Hora	Sin datos	02 horas, 40 minutos y 51 segundos	Sin datos	02:44 am
Localización	Frente a las costas de Guerrero	Costas de Guerrero	Costa del Pacífico	Acapulco, Guerrero
Intensidad	X en la Escala de Mercalli	VII en la escala de Mercalli Modificada	Sin datos	Sin datos
Pérdidas humanas	52 muertos y 569 lesionados	50 pérdidas humanas en todo el país	39 en Ciudad de México	700 muertos y 2500 heridos
Pérdidas materiales	100 derrumbes	Además de la ciudad de México, se reportó daños en edificios de diferentes poblaciones del estado de Guerrero, expresados en: 95 % en San Marcos, 90 % en Chilpancingo, 70 % en Chilapa, 60 % en Huamuxtitlán, 60 % en Tuxtla y pérdidas estimadas en 360 mil pesos en Ayutla.	Daños más severos reflejados en el centro de Ciudad de México. Se reportó alrededor de 1.000 edificios dañados, incluyendo daños en bardas y estructuras con grietas y fisuras en acabados.	Sin datos
Pérdidas económicas	100 millones de pesos de aquella época.	Dos millones de pesos de esa época en pérdidas causadas por daños en la propiedad particular y gubernamental.	Sin datos	Sin datos

Elaboración: M.I. Patricia Máximo Romero.

Es difícil proporcionar datos exactos de las características de este sismo, así como de las pérdidas humanas, materiales y económicas. Las fuentes de referencia muestran resultados de acuerdo con periodos diferentes de recopilación de información.

La Figura 3 muestra el área de influencia de las ondas sísmicas causadas por el sismo del 28 de julio de 1957. El sismo se sintió en parte de los estados de Veracruz, Oaxaca, Puebla, Morelos, Tlaxcala, México, Distrito Federal, Hidalgo, Guerrero, Michoacán, Colima, Jalisco, Guanajuato y Querétaro.

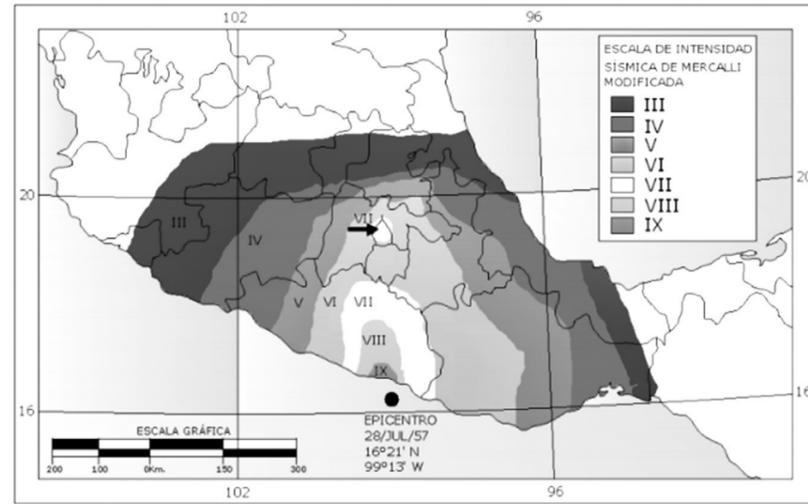


Figura 3. Curvas de isosistas y epicentro del sismo del 28 de julio de 1957. Elaboración: M.I. Patricia Máximo Romero.

Orozco y Reinoso (2007) realizaron un estudio estadístico de varios edificios existentes durante el sismo de 1957, con el objetivo de conocer detalladamente las causas que influyeron en su comportamiento estructural. El estudio se limitó a la Delegación Cuauhtémoc, zona donde se presentó la mayoría de los daños.

Descripción de los daños en la ciudad de México

La estatua de la Victoria Alada (El Ángel), que coronaba la Columna de la Independencia, cayó al suelo y posteriormente fue reconstruida casi en su totalidad para colocarla en su lugar un año más tarde.

La Tabla 11 muestra la localización de algunas estructuras dañadas, su sistema estructural, el tipo de daño y su modo de falla.

Tabla 11. Datos más sobresalientes del 'Temblor del Ángel' según diferentes fuentes de referencia

Dirección	Calle y número	Año de construcción	Niveles	Uso	Sistema estructural	Cimentación	Periodo del suelo aproximado (segundos)	Tipo de daño	Daño estructural
Abraham González no. 3		1947	10	Oficinas	Marcos de concreto	Pilotes de madera	2.16	Grave	Flexión en columnas, tensión diagonal en trabes y pandeo en losas
Casco de Santo Tomás		1950	4	Escuela	Marcos de concreto	Superficial	0.7	Grave	Flexión en columnas y tensión diagonal en trabes de crujeas alejadas de zona de esquina
Aquiles no. 29	Serdán	1951	9	Oficinas	Marcos de concreto	Cajón de cimentación	2.04	Grave	Tensión diagonal en trabes. Falla de control de pilotes

Insurgentes no. 263		1946	9	Oficinas	Marcos de concreto	Pilotes de madera	1.78	Grave	Flexión en columnas y tensión diagonal en trabes
Insurgentes no. 368		1948	5	Banco	Marcos de concreto	Superficial	1.44	Grave	Flexión en columnas
Lecumberri no. 63		1946	2	Cine	Nave industrial	Superficial	2.62	Grave	Volcamiento de armaduras de techo
Reforma no. 35		1956	14	Oficinas	Marcos de concreto	Cajón de cimentación	2.06	Grave	Compresión y tensión diagonal en trabes. Flexión en columnas
Reforma no. 77		1943	14	Oficinas	Marcos de acero	Pilotes de madera	2.06	Grave	Flexión en columnas
Villalongin		----	5	Oficinas	Marcos de concreto	Pilotes de madera	1.28	Grave	Tensión diagonal en trabes
Reforma no. 1		1934	16	Oficinas	Marcos de concreto	----	2.05	Grave	Sin datos exactos. El edificio fue demolido después del sismo
----	----	1957	8	Comercio y oficina	Marcos de concreto	Cajón de cimentación	----	Grave	Fractura en parte superior de varias columnas, tensión diagonal y corte en vigas y falla total en algunas
----	----	----	16	----	Marcos de concreto	Pilotes de madera	----	Grave	Seis columnas fallaron casi totalmente y las restantes se agrietaron. Tensión diagonal en trabes
----	----	----	7	----	Marcos de concreto	Cajón de cimentación	----	Grave	Grietas en unión de columnas perimetrales con trabes. Tensión diagonal en vigas principales y escaleras a punto de derrumbe

Elaboración: M.I. Patricia Máximo Romero.

La Tabla 12 muestra los datos más sobresalientes de las estructuras que colapsaron totalmente. Se observa que éstas no cumplían con la condición de regularidad en planta. Además, las losas se desplomaron al fallar las columnas (piso débil).

Tabla 12. Datos más sobresalientes del 'Temblor del Ángel' según diferentes fuentes de referencia

Uso	Sistema estructural	Observaciones	Estructura
Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura del Instituto Politécnico Nacional ¹	Marcos de concreto reforzado. La planta baja no tenía ningún muro	El modo de falla fue producto del mecanismo de piso débil en la planta baja. No hubo pérdidas humanas pues el sismo ocurrió en horario fuera de clases.	

Edificio principal de la Escuela Superior de Comercio y Administración del Instituto Politécnico Nacional

Marcos de concreto reforzado. La planta baja no tenía ningún muro.

El modo de falla fue producto del mecanismo de piso débil en la planta baja.



Uno de los módulos se derrumbó totalmente²

Edificio en la esquina de las calles de Frontera y Álvaro Obregón

Marcos de concreto reforzado

El modo de falla fue el producto de flexión en columnas con deficiente refuerzo transversal

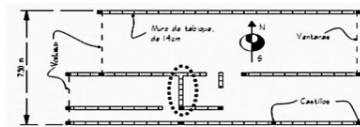


La construcción se desplomó sobre sus propios cimientos. Edificio destinado a la vivienda. Se reportó 31 pérdidas humanas³

Casa en la cerrada de Romero de Terreros no. 52

Estructura en proceso de construcción con muros de mampostería unidos con dalas y castillos de concreto reforzado

El plano de la casa muestra la deficiencia de muros y castillos en la dirección Norte-Sur



Se reportó el desplazamiento de la estructura en esa dirección⁴

Elaboración: M.I. Patricia Máximo Romero.

La Tabla 13 muestra datos de sistemas estructurales de concreto reforzado y acero, colapsados parcialmente.

Tabla 13. Colapsos parciales en sistemas estructurales de concreto reforzado y de acero

Ubicación	Sistema estructural	Observaciones	Estructura
Edificio en Insurgentes No. 337 esquina con Coahuila	Estructura de marcos de concreto reforzado.	El modo de falla fue por cortante en columnas. Propiedad del actor mexicano Mario Moreno "Cantinflas"; solo quedó en pie la planta baja.	

¹ Fuente: <http://www.redalyc.org/pdf/618/61807604.pdf>

² Fuente: <http://www.mexicomaxico.org/IPN/CronoIPN.htm>

³ Fuente: <http://www.redalyc.org/pdf/618/61807604.pdf>

⁴ Fuente: <http://www.redalyc.org/pdf/618/61807604.pdf>

Cine Encanto, ubicada en la calle Serapio Rendón

Estructura con columnas de concreto reforzado y armaduras de acero

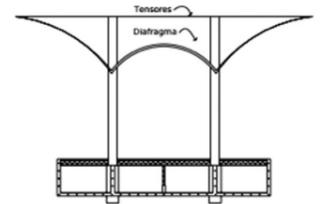
Perdió el techo y parte de los muros se desplomaron.



Mercado de la Merced

Estructura con cubierta formada por 94 cascarones de concreto reforzado, apoyados cada uno en pares de columnas de concreto reforzado empotradas en cajones de concreto reforzado con dimensiones de excavación que compensaban el peso propio de la estructura.

Seis cascarones de concreto se desplomaron. En la imagen de la figura superior se muestra un diagrama de la estructura original

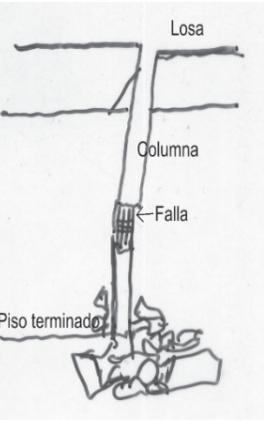
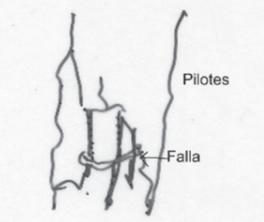
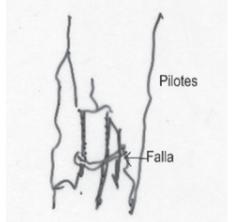
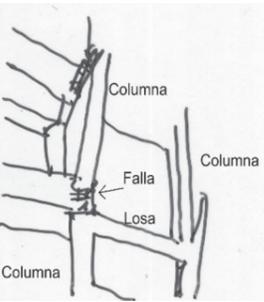
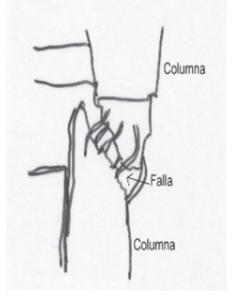


Elaboración: M.I. Patricia Máximo Romero

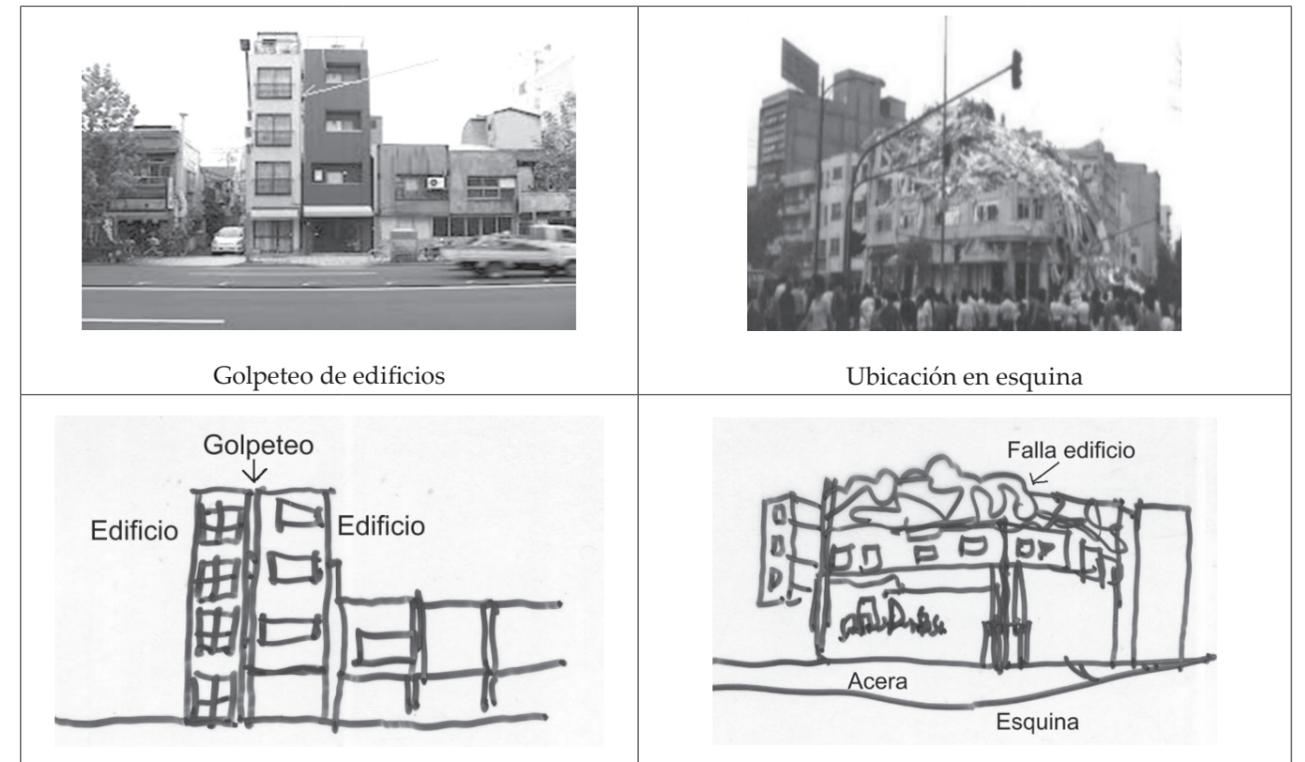
Sobresalen igualmente los datos del derrumbe pertenecientes a los niveles superiores de las oficinas de 'Elevadores Schindler', ubicadas en la calle Geranio esquina con Abedules en la colonia Atlampa, y el derrumbe del cuerpo de oficinas de 'Muebles y Mudanzas', ubicado en Insurgentes No. 1338, Embotelladora 'Canada Dry', estructuras formadas por dos cuerpos: al frente por oficinas de un piso con muros de concreto reforzado y en la parte posterior por bodegas de muros de tabique con castillos de concreto reforzado y armaduras de acero.

La Tabla 14 muestra ejemplos de los tipos de fallas en elementos estructurales. Se observa que las fallas por flexión en columnas, la de tensión diagonal en vigas y el pandeo de losas, fueron debidas al escaso refuerzo longitudinal y de cortante. Los pilotes fallaron por la falta de confinamiento del concreto y escaso acero de refuerzo. Se observó fallas en conexiones viga-columna y la presencia de articulaciones plásticas. Las estructuras rebasaron el límite elástico lineal y entraron al rango elástico no lineal.

Tabla 14. Tipos de fallas identificadas en elementos estructurales ocasionadas por el 'Temblor del Ángel'

Tipo de falla	Esquema	Tipo de falla	Esquema
 <p>FALLA EN LAS COLUMNAS POR FLEXIÓN</p> <p>Flexión en columna⁵</p>	 <p>Losa</p> <p>Columna</p> <p>Falla</p> <p>Piso terminado</p>	 <p>Tensión diagonal en vigas</p>	 <p>Losa reticular</p> <p>Falla</p> <p>Nervio</p>
 <p>Pandeo en losa</p>	 <p>Pilotes</p> <p>Falla</p>	 <p>Falla en pilotes</p>	 <p>Pilotes</p> <p>Falla</p>
 <p>Conexión viga-columna</p>	 <p>Columna</p> <p>Falla</p> <p>Losa</p> <p>Columna</p> <p>Columna</p>	 <p>Articulación plástica en columna</p>	 <p>Columna</p> <p>Falla</p> <p>Columna</p>

⁵ Fuente: http://www.files.cenapred.gob.mx/es/ReunionNacionalGeologicos2014/RedNacionalEvaluadores/EvaluacionEdificios/2014Evaluaciondeedificios_05-Danio.pdf



Fuente: Bosquejos elaborados por el M. en Arq. Andrés Hernández Sánchez e imágenes extraídas de http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lic/murillo_j_cg/capitulo4.pdf

El 'Temblor del Ángel' hizo evidente que el Reglamento publicado en 1942 no cumplía con los requisitos de análisis y diseño sísmico para que algunas estructuras mostraran un comportamiento sísmico satisfactorio.

Sismo del 19 de septiembre de 1985 (sismo de Michoacán)

El sismo del 19 de septiembre de 1985 es un sismo histórico que causó innumerables pérdidas humanas y daños incuantificables en la infraestructura de Ciudad de México, principalmente. La respuesta y solidaridad de los mexicanos estuvo presente, pues colaboraron arduamente en las actividades de rescate. La Figura 4 muestra que fue un sismo prácticamente superficial, localizado muy cerca del límite de los estados de Michoacán y Guerrero.



Figura 4. Características del sismo del 19 de septiembre de 1985 (sismo de Michoacán).

Fuente: Google Imágenes.

La Tabla 15 muestra los datos más relevantes del sismo de Michoacán según diferentes fuentes de referencia. Se observa que los datos de pérdidas humanas, materiales y económicas difieren notablemente.

Tabla 15. Datos más sobresalientes del 'Sismo de Michoacán' según diferentes fuentes de referencia

Fuente de información	Estudio de las intensidades del sismo del 19 de septiembre en Ciudad de México. (Iglesias et al., 1987, citados por Ruiz y Juárez, 1996). Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco. División de Ciencias Básicas e Ingeniería. Departamento de Materiales. México, junio 1987	CIRES	Comportamiento esperado en los próximos sismos intensos en la CDMX. Raúl J. Izquierdo. 15 de junio 2016
Magnitud	La magnitud Ms, obtenida a partir de la amplitud máxima observada en los sismogramas fue de 8.1. El sismo fue seguido por varias réplicas, la mayor de las cuales se presentó 36 horas después con una magnitud Ms de 7.5, ubicándose su epicentro a 340 km de Ciudad de México.	8.1	Sin datos
Hora	7:17	07:19 am La duración fue de casi 4 minutos, de los cuales un minuto y treinta segundos correspondieron a la mayor intensidad del movimiento.	Sin datos
Localización	Frente a las costas de Guerrero y Michoacán se inició el deslizamiento entre la placa de Cocos y la de Norteamérica. El epicentro se localizó a 400 km de Ciudad de México	Costas de Michoacán y Guerrero. Rotura de contacto entre las placas de Cocos y de Norteamérica. Extensión de 50 km x 170 km. Aproximadamente a 80 km de profundidad.	Sin datos
Intensidad	Se elaboró un mapa de intensidades a partir de la evaluación de la capacidad sísmica de las estructuras dañadas; para ello se evaluó un gran número de edificios distribuidos ampliamente sobre la zona urbana.	IX en la Escala de Mercalli modificada sobre la superficie directamente en la zona de ruptura.	
Pérdidas humanas	Miles de víctimas	Muertos, heridos, desaparecidos, damnificados	Heridos: más de 40 mil. Muertos: varias versiones desde dos mil hasta 40 mil. Rescatados de los escombros: 4.100.

Pérdidas materiales	210 edificios en total, parcialmente derrumbados o con daños severos, algunos de ellos de más de 15 pisos de altura, sin tomar en cuenta las viviendas de uno o dos pisos, y miles con diversos grados de daño.	Destruídas; inmuebles en peligro de caer; interrupción en el servicio de agua, energía y teléfonos; fugas de agua y gas; múltiples rupturas en el asfalto y la paralización total en el servicio de transporte colectivo.	Total de edificios: 1.404.000 Viviendas con daños parciales: 70 mil. Edificios colapsados: 252. Edificios demolidos: 165. Usuarios sin servicio eléctrico: más de 1 millón 200 mil. Estaciones del Sistema de Metro: 32 Averías en la red de agua potable: Acueducto suroriente 28 fracturas, red primaria 167 fugas, red secundaria 7.229 fugas. Drenaje afectado: Río La Piedad 6.500 metros, Río Churubusco en menor grado, 300 metros del interceptor oriente.
	La réplica causó daños adicionales y el colapso de algunas estructuras dañadas por el evento principal. Según datos del Grupo ICA, los daños se concentraron principalmente en las estructuras de más de 6 pisos, predominando los daños en estructuras de losa reticular sobre las de marcos, en una proporción de dos a uno.		
Pérdidas económicas	Sin datos	Sin datos	Sin datos

Elaboración: M.I. Patricia Máximo Romero.

La cantidad y tipo de daños en las edificaciones estuvieron directamente relacionadas con el tipo de suelo en el que se desplantaban. El sismo causó el asentamiento excesivo de muchos edificios e inclinaciones importantes, incluso el derrumbe total de algunas estructuras.

Los daños presentados en las construcciones e instalaciones de todo tipo sirvieron para investigar el origen de las fallas y el estudio de las características del sismo, con el objetivo de obtener datos que pudieran ayudar a entender el fenómeno sísmico y el comportamiento dinámico de las estructuras.

El área más afectada comprendió una superficie de (del Distrito Federal), básicamente de la delegación Cuauhtémoc, en la que se concentraba la mayor actividad comercial, hotelera, turística y de servicios públicos de la capital, por consecuencia, con una mayor densidad de población.

Se desconoce el número total de víctimas, pues hay apreciaciones que varían de 3.629 (según la última cifra oficial dada en 2011) hasta 40.000. Sin embargo, la mayoría de las estimaciones reportan alrededor de 10.000 muertos.

Asimismo, hubo escenarios de desastre en las delegaciones Venustiano Carranza y Benito Juárez, algunas partes de Coyoacán, Gustavo A. Madero y Miguel Hidalgo, barrios populares como Guerrero, Tepito, Morelos, entre otros, colonias como Roma, Atlampa y Peralvillo, etcétera.

El centro histórico de Ciudad de México tiene 700 manzanas en diez kilómetros cuadrados, alrededor de tres mil edificios con valor patrimonial y 1.500 con valor arquitectónico. Desgraciadamente, fue una de las zonas más afectadas por el sismo, con más de 300 edificaciones dañadas severamente. Después de la catástrofe, el Instituto Nacional de Antropología e Historia (INAH) realizó inmediatamente un relevamiento para conocer su estado de conservación. En el caso de las vecindades declaradas monumento y comprendidas en el decreto expropiatorio, el INAH se limitó a supervisar los proyectos de Renovación Habitacional Popular. La Tabla 16 muestra las edificaciones con daños causados por el sismo del 19 de septiembre de 1985.

Tabla 16. Edificios dañados severamente y colapsados como consecuencias del 'Sismo de Michoacán'

 <p>Talleres de costura, Zona Textil de la avenida San Antonio Abad⁶</p>	 <p>Edificio Nuevo León ubicado en la Unidad habitacional Nonoalco (Tlatelolco). En esta zona colapsaron cuatro edificios⁷</p>
 <p>Edificio ubicado en el cruce de las avenidas Insurgentes y Uruapan. El edificio fue demolido y se construyó otro⁸</p>	 <p>Daños después del sismo en el Hotel Regis⁹</p>

 <p>Secretaría de Comunicaciones y Transportes¹⁰</p>	 <p>Centro Histórico¹¹</p>
 <p>Hospital Juárez¹²</p>	 <p>Hotel Versailles¹³</p>
 <p>Construcciones en la avenida Eje Central¹⁴</p>	 <p>Instalaciones del Metro¹⁵</p>

⁶ Fuente: Google Imágenes

⁷ Fuente: <http://www.vertigopolitico.com/articulo/34994/Terremoto-del-85-el-antes-y-despues-en-la-Ciudad-de-Mexico>

⁸ Fuente: <http://www.vertigopolitico.com/articulo/34994/Terremoto-del-85-el-antes-y-despues-en-la-Ciudad-de-Mexico>

⁹ Fuente: <http://www.vertigopolitico.com/articulo/34994/Terremoto-del-85-el-antes-y-despues-en-la-Ciudad-de-Mexico>

¹⁰ Fuente: <http://www.vertigopolitico.com/articulo/34994/Terremoto-del-85-el-antes-y-despues-en-la-Ciudad-de-Mexico>

¹¹ Fuente: Google Imágenes

¹² Fuente: Google Imágenes

¹³ Fuente: Google Imágenes

¹⁴ Fuente: http://www.bbc.com/mundo/noticias/2015/09/150917_mexico_sismo_antes_despues_fotos_an

¹⁵ Fuente: http://www.bbc.com/mundo/noticias/2015/09/150917_mexico_sismo_antes_despues_fotos_an



Elaboración: M.I. Patricia Máximo Romero.

La Tabla 17 muestra algunos ejemplos de estructuras y las fallas que provocaron su deficiente comportamiento sísmico.

Tabla 17. Tipos de fallas identificadas en elementos estructurales ocasionadas por el 'Sismo de Michoacán'

Uso	Sistema estructural	Observaciones	Estructura
Edificios destinados a oficinas y bodegas (archiveros, papel, rollos de tela o costales de granos)	Losas y columnas de concreto	Falla en la conexión de las columnas y losas. Las columnas débiles, la sobrecarga sobre las losas y la fuerza cortante producida por el sismo, fueron la causa del mal comportamiento de la estructura ²⁰	 <small>Foto: Terremoto de México '85. München Rück, 1986.</small>

Edificios multi-familiares	Estructura de marcos de concreto reforzado	Estructuración irregular en planta o en elevación. El piso débil causó daños importantes en algunas estructuras.	
Edificios destinados a bodegas y locales	Losas reticulares y columnas de concreto reforzado	Los daños fueron causados por columnas débiles en los entrepisos.	
Edificios	Estructura de marcos de concreto reforzado	Estructuración con piso débil causó daños importantes en algunas estructuras. La resistencia de los elementos verticales como muros y columnas, elementos que transmiten las fuerzas laterales en un determinado nivel o piso, como las del sismo, difieren del inferior o superior en un 20 % o más.	
Casa habitación	Losas de concreto, castillos y muros de mampostería	La demolición de muros de carga y su sustitución por traveses causaron daños importantes en inmuebles de propiedad privada. Las traveses solo toman las cargas verticales, pero no reemplazan la capacidad de carga horizontal ni la rigidez de los muros.	
Edificios multi-familiares	Estructura de marcos de concreto reforzado y muros de mampostería	Las fallas y colapsos más importantes estuvieron en edificios con periodo dominante cercano a dos segundos, que coincidió con el periodo dominante del sismo. Los colapsos fueron totales o parciales.	

¹⁶ Fuente: <http://cronicasdeasfalto.com/caida-y-renacer-del-barrio-bravo-despues-del-temblor-de-1985/>

¹⁷ Fuente: <http://cronicasdeasfalto.com/caida-y-renacer-del-barrio-bravo-despues-del-temblor-de-1985/>

¹⁸ Fuente: http://www.bbc.com/mundo/noticias/2015/09/150917_mexico_sismo_antes_despues_fotos_an

¹⁹ Fuente: <https://www.forbes.com.mx/lecciones-del-terremoto-de-1985-en-el-df-estas-preparado/>

Edificio	Estructura de marcos de concreto reforzado y muros de mampostería	Efecto de los muros de relleno (no estructurales). Los muros de relleno aportaron rigidez a las columnas, evitando el colapso del edificio	
Edificios de alturas diferentes		Golpeteo de edificaciones. La separación entre los edificios no era la adecuada	
Edificio	Estructura de marcos de concreto reforzado y muros de mampostería	Volcamiento por la falla de cimentación	

Elaboración: M.I. Patricia Máximo Romero con imágenes extraídas de Google Imágenes.

Después de los sismos de septiembre de 1985, se hizo varios estudios para analizar los modos de falla de las estructuras y sus causas.

Las características estructurales que incrementaron el daño en construcciones afectadas por este sismo pueden ser evidenciadas en la Tabla 18.

Tabla 18. Características estructurales que incrementaron el daño en estructuras afectadas por el 'Sismo de Michoacán'

Características estructurales	
Columna corta	Mala calidad de los materiales
Sobrepeso	Insuficiente rigidez lateral
Golpeteo	Escaso refuerzo en trabes
Ubicación en esquina	Escaso refuerzo en columnas
Ubicación en cuña	Cambio de rigidez en elevación
Irregularidad en elevación	Presencia de apéndice
Irregularidad en planta	Columna esbelta

Hundimientos	Irregularidad de rigidez en planta
Daños previos	Edad de la estructura
Grado de conservación	Claros grandes
Problemas de construcción	Articulación plástica
Modificaciones autoconstruidas	Aplastado por edificio vecino

Fuente: http://www.smie.org.mx/SMIE_Articulos/co/co_16/te_08/ar_13.pdf

La Tabla 19 "muestra los daños estructurales y las causas más comunes que dieron origen a los daños en las estructuras" (Soto, 2008, p. 19).

Tabla 19. Daños estructurales y sus causas más comunes

Elemento estructural	Tipo de daño	Causa más común
Columnas	- Grietas inclinadas	- Cortante
	- Grietas verticales	- Flexocompresión-adherencia
	- Desprendimiento del recubrimiento	- Flexocompresión
	- Aplastamiento del concreto	- Flexocompresión
Vigas	- Pandeo del acero de refuerzo	- Flexocompresión
	- Grietas inclinadas	- Cortante o Torsión
	- Roturas de estribos	- Cortante o Torsión
	- Grietas verticales	- Flexión
	- Rotura de refuerzo	- Flexión
Unión viga-columna	- Aplastamiento de concreto	- Flexión
	- Grietas inclinadas	- Cortante
	- Falla por adherencia del refuerzo de vigas	- Cortante
Sistemas de piso	- Grietas alrededor de columnas en losas o placas planas	- Penetración
	- Grietas longitudinales	- Flexión
Muros de concreto	- Cortante	- Cortante
	- Grietas inclinadas	- Flexocompresión o deslizamiento
	- Grietas horizontales	- Flexocompresión o deslizamiento
	- Aplastamiento del concreto	- Flexocompresión o deslizamiento
Muros de mampostería	- Pandeo del acero de refuerzo	- Flexocompresión o deslizamiento
	- Grietas inclinadas	- Flexión
	- Grietas verticales en las esquinas y en el centro	- Volteo
	- Grietas horizontales	- Deslizamiento

Elaboración: M.I. Patricia Máximo.

Las fallas en las columnas fueron las que causaron los daños más importantes en las estructuras. En la Figura 5 se muestra un ejemplo del armado de dos columnas; la primera diseñada con los requisitos del Reglamento del Distrito Federal de 1966, y la segunda, con los requisitos del RCDF 1987-2004. En la primera columna se observa el escaso refuerzo que provocó en algunos casos, fallas por flexión y cortante.



Figura 5. Comparación cualitativa de la cantidad de acero y su distribución en columnas según los Reglamentos del D. F. (1966 y 2004).
Fuente: http://www.cenapred.unam.mx/es/documentosWeb/Enaproc/EvaluacionEstructuras_.pdf

4. Discusión

En el año de 1957 la ciudad de México no contaba con una red de acelerógrafos que proporcionara información suficiente para conocer de forma aproximada los parámetros que definen el movimiento del suelo en la zona del lago, útiles para mejorar los criterios de diseño sísmico. En 1960 fueron instalados los dos primeros acelerógrafos en esa ciudad, uno en la Alameda Central y otro en Ciudad Universitaria, dando inicio a la Red Acelerográfica del Instituto de Ingeniería.

En 1978 se instaló un arreglo de instrumentos sísmicos en la Costa de Guerrero y en agosto de 1985 el II-UNAM, conjuntamente con la Universidad de Nevada-Reno (UNR) terminan el proyecto de instalación de 20 estaciones acelerográficas en esa región, permitiendo que se registraran los sismos del 19 y 20 de septiembre de 1985, con magnitudes de 8.1 y

7.6, respectivamente (Universidad Nacional Autónoma de México, UNAM, 2014).

Los daños estructurales que dejaron el 'Temblor del Ángel' y el 'Sismo de Michoacán', dejaron al descubierto que las actualizaciones del RCDF y de las NTCD, no cumplían con los requisitos para que las estructuras se comportaran adecuadamente ante excitaciones sísmicas de esas magnitudes. Estas experiencias sirvieron para que se revisara y modificara periódicamente, tanto el reglamento como las normas.

En Ciudad de México se identificó las zonas de suelo duro, de transición y blando, observando que los mayores daños se presentaron en la zona de suelo blando, donde se amplifica las ondas sísmicas, causando severos daños e incluso el colapso de edificios altos con periodo fundamental de vibrar cercano al del suelo donde estaban construidos. Los investi-

gadores concluyeron que el 'Sismo de Michoacán' dañó o colapsó estructuras con periodos cercanos a dos segundos.

También se realizó la microzonificación sísmica de Ciudad de México, relacionándola con los coeficientes sísmicos recalculados.

La última actualización de las Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo (NTCDS) se dio a conocer en el año de 2004, donde se incluye criterios de diseño como la revisión de desplazamientos laterales, separación de edificios colindantes, factores de reducción para fuerzas sísmicas, tipo de análisis (método simplificado, estático y dinámico), condiciones de regularidad, entre otras.

Como resultado de las investigaciones, ahora se sabe que la respuesta dinámica de una estructura depende de sus características (configuración estructural, geometría de las secciones, materiales, entre otras) y del tipo de suelo.

En la actualidad, como producto de las investigaciones, existen modelos matemáticos que estudian el comportamiento dinámico de estructuras mediante el movimiento de sistemas oscilatorios representados por ecuaciones diferenciales que describen el cambio de posición de éstos con respecto al tiempo. Igualmente, se investiga sobre modelos reales, instrumentando las estructuras con acelerógrafos que registren movimientos fuertes (sismos) o vibración ambiental; los datos registrados son procesados en softwares especializados para determinar frecuencias y periodos de vibración. Otra forma de conocer la respuesta dinámica de las estructuras es haciendo ensayos de modelos dinámicos a escala de estructuras, que proporcionan información sobre las cargas dinámicas que se induce y la respuesta de la estructura.

La aplicación de los métodos mencionados servirá para conocer de forma aproximada la respuesta dinámica de las estructuras. Por tanto, será necesario calibrar por lo menos los modelos mediante dos métodos.

Los modelos matemáticos, la experimentación y el uso de nuevas tecnologías han permitido un mayor conocimiento sobre la respuesta dinámica de las estructuras, mejorando los criterios de diseño rela-

cionados con las adecuadas configuraciones estructurales, coeficientes sísmicos, requisitos de refuerzo en columnas, vigas, losas y conexiones.

5. Conclusiones

Los daños severos y colapsos en estructuras fueron causados por la aplicación de criterios de diseño sísmico que no cumplían con los requisitos para que tuvieran el comportamiento dinámico esperado.

Se desconocía que el suelo blando de Ciudad de México amplificaba las ondas sísmicas, obligando que muchas estructuras rebasaran el límite elástico lineal y sufrieran daños severos o colapsos.

El sismo del 28 de julio de 1957 causó daños y colapsos en estructuras con columnas, vigas y losas que tenían escaso refuerzo de acero y secciones pequeñas. Se presentó el fenómeno de golpeteo debido a los grandes desplazamientos laterales de las estructuras colindantes. También hubo fallas en conexiones viga-columna, entre otros.

El sismo del 19 de septiembre de 1985 causó severos daños en edificios que tenían entre 5 y 15 niveles, cuyo periodo fundamental fue muy cercano al periodo fundamental del suelo, lo que causó que el sistema estructural entrara en resonancia. También colapsaron edificios por la irregularidad en planta y en elevación, fallas en columnas, vigas y losas debidas al escaso acero de refuerzo y secciones pequeñas. Hubo fallas por sobrecargas en losas, fallas en conexiones viga-columna, colapsos por piso débil, modificaciones estructurales no calculadas, etc.

La Figura 6 muestra que los edificios con muros de cortante tuvieron un buen comportamiento estructural.



Figura 6. Los edificios con muros de cortante tuvieron buen comportamiento sísmico.

Fuente: Google Imágenes.

En el periodo comprendido entre 1942 y 2004, el RCDF y las NTCDS han sido modificados aplicando valores de los coeficientes sísmicos que se ha incrementado con el objetivo de mejorar el comportamiento sísmico de estructuras desplazadas en la zona de suelo blando de Ciudad de México. En el RCDF de 1942, para estructuras del tipo II, el coeficiente sísmico, tenía un valor de γ , mientras que en las NTCDS de 2004, los coeficientes sísmicos en la misma zona varían de α a β .

Actualmente, los investigadores trabajan en una propuesta para actualizar las Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo y Construcción con el objetivo de mejorar el comportamiento sísmico de las estructuras.

A partir de 1985 no se ha presentado un sismo de magnitud similar a la del 'Sismo de Michoacán', pero se espera que las modificaciones que se ha hecho al RCDF y a las NTCDS, cumplan con los requisitos para evitar otro escenario de desastre por sismo.

6. Conflicto de intereses

Los autores de este artículo declaran no tener ningún tipo de conflicto de intereses del trabajo presentado.

Referencias

- Díaz, J. (2006). Los suelos lacustres de la ciudad de México. *Revista Internacional de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil*, 6(2), 111-130.
- Grajeda, E. (02 de septiembre de 2005). Cronología del Reglamento de Construcciones. *El Universal*. Recuperado de <http://archivo.eluniversal.com.mx/notas/302917.html>
- Orozco, V. y Reinoso, E. (2007). Revisión a 50 años de los daños ocasionados en la ciudad de México por el sismo del 28 de julio de 1957 con ayuda de investigaciones recientes y sistemas de información geográfica. *Revista de Ingeniería Sísmica* 76, 61-87.
- Paredes, T. (1999). *Modelo de reglamento de construcción para el estado de Tlaxcala. El caso de Huamantla, Tlaxcala* (Tesis de Maestría). Instituto Tecnológico de la Construcción. Recuperado de https://infonavit.janium.net/janium/TESES/Maestria/Paredes_Quirban_Tiberio_44909.pdf
- Soto, E. (2008). Rehabilitación de estructuras de concreto (Tesis de Maestría). Universidad Nacional Autónoma de México. Recuperada de <https://es.scribd.com/document/347257193/Rehabilitacion-de-Estructuras-de-Concreto-Tesis-UNAM-pdf>
- Universidad Nacional Autónoma de México. (2014). Base de datos de registros acelerográficos de la Red Sísmica Mexicana: Recuperado de <http://aplicaciones.iingen.unam.mx/AcelerogramasRSM/RedAcelerografica.aspx>

UNIMAR