

Sismicidad y seguridad estructural en las construcciones: lecciones aprendidas en México

Juan José Pérez-Gavilán, D Mec Num,⁽¹⁾ Jorge Aguirre, D en C Geof⁽²⁾ Leonardo Ramírez, D en Ing Civ.⁽³⁾

Pérez-Gavilán JJ, Aguirre J, Ramírez L.
Sismicidad y seguridad estructural en las construcciones:
lecciones aprendidas en México.
Salud Publica Mex 2018;60(supl 1):S41-S51.
<https://doi.org/10.21149/19300>

Resumen

Con la motivación de los eventos telúricos recientes, se revisa el ambiente sísmico en el que México está inmerso, así como su sismicidad. Se revisan también los mecanismos y regiones de generación de los temblores. Se mencionan algunos de los parámetros que determinan la intensidad y la magnitud de éstos así como la forma de hacer predicciones mediante las funciones de atenuación con los datos provenientes de las estaciones sismológicas. Se muestra además cómo los colapsos de las estructuras tras el sismo del 19 de septiembre de 2017 en la Ciudad de México se alinean en la zona de transición entre la vieja área lacustre del valle de México y la zona de lomas. En la parte estructural se presentan los criterios básicos de diseño y cómo los reglamentos de construcción intentan establecer cuál debe ser el desempeño de las estructuras ante acciones de distinta intensidad y frecuencia. Se da un ejemplo de la relación que existe entre resistencia, daño y desempeño estructural. Se presentan algunos daños observados y se hacen algunas reflexiones sobre los aspectos que influyen en la seguridad de las construcciones y qué deberían mejorarse.

Palabras clave: sismicidad; ambiente sísmico; seguridad estructural; desempeño estructural; daños

Pérez-Gavilán JJ, Aguirre J, Ramírez L.
Seismicity and structural safety in buildings:
lessons learned in Mexico.
Salud Publica Mex 2018;60(supl 1):S41-S51.
<https://doi.org/10.21149/19300>

Abstract

Motivated by the recent seismic events in México, the seismic environment of the country is reviewed together with the mechanisms and the regions that generate earthquakes. Some of the parameters used to determine the intensity as a difference with the magnitude of earthquakes and the way to make predictions with data coming for seismological stations using attenuation functions are mentioned. It is shown how the structures that collapse after the September 19th, 2017 earthquake in México City are aligned with the transition zone between the old lake region of the Mexican valley and the hill zone. The basic criteria for structural design and how the constructions codes establish the performance level of the structures subjected to actions of different frequency and intensity, are presented. An example is given regarding the relationship that exists between strength, damage and structural performance. Some of the observed damages are presented with ideas regarding some of the aspects that can be improved that have an influence in construction safety.

Keywords: seismicity; seismic environment; structural safety; structural performance; damage

- (1) Ingeniería Estructural, Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México. México.
 (2) Ingeniería Sismológica, Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México. México.
 (3) Sismología e Instrumentación, Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México. México.

Fecha de recibido: 5 de diciembre de 2017 • **Fecha de aceptado:** 18 de enero de 2018
 Autor de correspondencia: JJ Pérez-Gavilán. Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México.
 Av. Universidad 3000. 04510, Coyoacán, Ciudad de México, México.
 Correo electrónico: jperezgavilane@iingen.unam.mx

El día 19 de septiembre de 2017 a las 13:14:40 horas ocurrió un sismo de magnitud M_w^* 7.1 cuyo epicentro se ubicó en las coordenadas 18.4° latitud Norte y 98.72° longitud Oeste, con una profundidad de 57 km al suroeste de Axochiapan, Morelos y a 120 km de la Ciudad de México.¹ Debido a su magnitud y cercanía, entre otros factores, generó un movimiento muy intenso del terreno, que provocó daños importantes en las construcciones de la ciudad de México y en las poblaciones cercanas al epicentro.

En la Ciudad de México se observan tipos de falla cuyas causas son bien conocidas: planta baja débil, edificios en esquina, estructuras modificadas por los usuarios, cambios de uso, entre otros. En el interior de la república se observan fallas debidas a la mala estructuración de las edificaciones. Muchas de las estructuras son de autoconstrucción, por lo que no cuentan con los elementos mínimos para resistir las fuerzas generadas por un sismo.

Sin embargo, hay algunos aspectos novedosos que aún no están debidamente caracterizados y que serán materia de la investigación en los años siguientes. Los colapsos en las Ciudad de México se alinearon en la zona de transición, entre el borde del lago y la zona de lomas. Será necesario explicar con detalle las causas de este fenómeno. La edad de las construcciones y la posible acumulación de daño son aspectos que no están considerados en los reglamentos y que deben abordarse y normarse. La evaluación detallada de los daños apenas comienza.

Sismicidad

México tiene una actividad sísmica importante. En el periodo que va de 1990 a 2016, el Servicio Sismológico Nacional (SSN) reportó un promedio anual de 28 sismos de magnitud entre 5 y 5.9; 3.5 de magnitud entre 6 y 6.9, y uno de magnitud entre 7 y 7.9 cada dos años. En ese mismo intervalo de 27 años se reportó un sismo de magnitud entre 8 y 8.9. Como es de esperarse, los sismos de magnitud entre 4 y 4.9 son aún más abundantes, suceden en promedio 708 de ellos al año. En la figura 1 se muestran los epicentros de los sismos reportados por el SSN.

Zonas generadoras de sismos

Los sismos se concentran en franjas que coinciden con los límites de las placas tectónicas. Esto se debe a que

el mecanismo de generación de los sismos tiene que ver con la acumulación de energía elástica en los bordes de una falla. Reid, estudiando cuidadosamente las deformaciones permanentes generadas durante el sismo de 1906 en San Francisco, California, formula su *teoría del rebote elástico de los sismos*, que identifica de manera clara a las fallas geológicas como uno de los mecanismos de generación de los sismos.

Los bordes de las placas tectónicas son básicamente de tres tipos: de convergencia, de divergencia y de transformación. El límite de convergencia entre dos placas implica que una de ellas se mete por debajo de la otra en un movimiento que se denomina de *subducción*. El límite de divergencia se encuentra donde dos placas se separan y se genera nueva corteza, generalmente oceánica. En el límite de transformación, las dos placas se deslizan una al lado de la otra sin que haya destrucción o creación de corteza. El deslizamiento entre las dos placas involucradas no ocurre de manera suave; por el contrario, la superficie de contacto entre las placas se parece más a una zona rugosa que impide el deslizamiento. Este atoramiento entre las placas va acumulando energía elástica que eventualmente se libera en forma súbita, con lo cual se producen los sismos.

Sismos de subducción

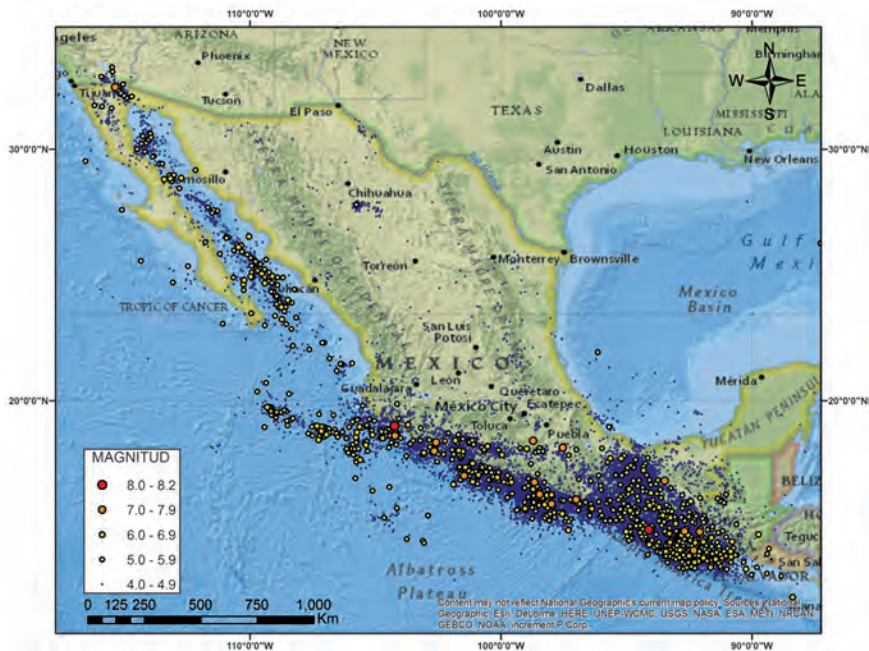
En la costa del pacífico de la república mexicana, las placas de la Rivera y la de Cocos subducen con respecto a la placa Norteamericana (figura 2). Esta zona de contacto es la que produce el mayor número de sismos y los de mayor magnitud en México. Esto se comprueba al comparar la posición de los epicentros en la figura 1 y la línea de contacto entre las placas de la figura 2.

Sismos intraplaca

Existe otro tipo de sismos conocidos como intraplaca, y los produce un mecanismo que, si bien está ligado a la subducción, presenta ciertas diferencias. Estos sismos ocurren a mayor profundidad y en un régimen de tensión que contrasta con el de compresión, que es el correspondiente para una zona de convergencia. En la figura 3 se ilustra que este tipo de sismos ocurren a una profundidad mayor que los de subducción y dentro de la placa subducida. En contraste, los sismos típicos de la zona de subducción, que se indican en la figura 3 con una línea roja en la zona de contacto entre las dos placas, son producidos por movimientos *interplaca*.

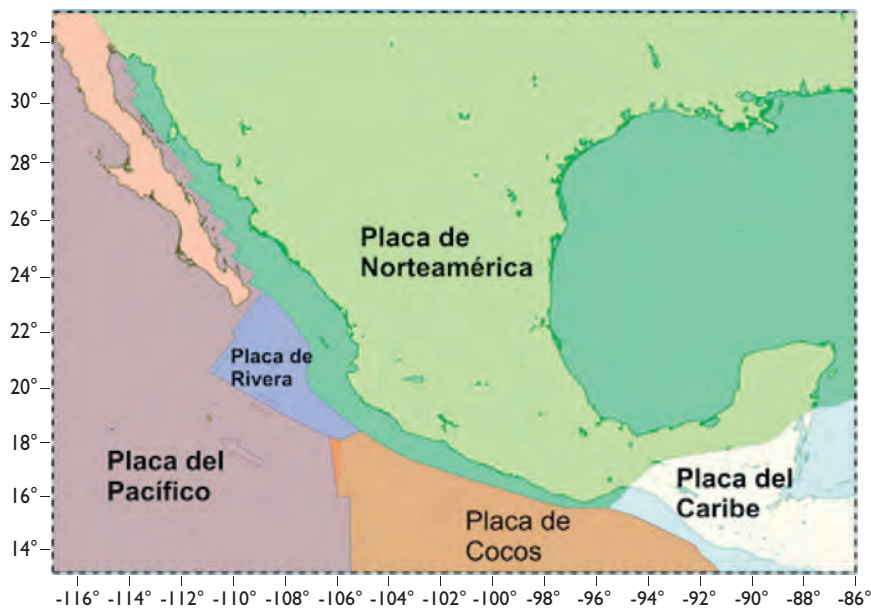
El sismo ocurrido el 19 de septiembre de 2017 corresponde a un sismo intraplaca que ocurrió, como ya hemos dicho, a 57 km de profundidad y con una magnitud de 7.1.

* M_w escala sismológica de magnitud del momento. Es una escala logarítmica basada en la energía total que se libera en un sismo.¹³



Fuente: Servicio Sismológico Nacional¹

FIGURA 1. SISMICIDAD DE MÉXICO (GENERADO EN ARCGIS CON MAPA BASE DE USGS EARTHQUAKE HAZARDS PROGRAM Y CON LAS LOCALIZACIONES REPORTADAS POR EL SERVICIO SISMOLÓGICO NACIONAL)



Fuente: Servicio Sismológico Nacional¹

FIGURA 2. PLACAS TECTÓNICAS EN MÉXICO



FIGURA 3. ESQUEMA DE LOS SISMIOS DE SUBDUCCIÓN DE INTERPLACA Y LOS SISMIOS INTRAPLACA

Intensidad y magnitud

La magnitud por sí misma no es suficiente para saber cuál es la intensidad con que se experimentará la sacudida de un sismo en un punto geográfico dado. La intensidad con que un sismo es percibido depende fuertemente, entre otros factores, de la distancia epicentral. En la figura 4 se presenta un mapa con la distribución de las intensidades que generó el sismo del 19 de septiembre de 2017. Se puede observar claramente que la mayor intensidad se presenta en las zonas adyacentes al epicentro, mientras que la intensidad va disminuyendo conforme se aleja de la zona epicentral. Una excepción ocurre en la cuenca del valle de México donde se presenta un manchón rojo a causa de los efectos locales presentes. Las intensidades se han clasificado en función de la aceleración máxima del terreno (PGA por sus siglas en inglés) en leve, para una PGA menor de 8 cm/s^2 , moderada, entre 8 y 100 cm/s^2 y fuerte para una PGA mayor a 100 cm/s^2 . El mapa presenta las aceleraciones máximas observadas, interpoladas con los datos de las estaciones que aparecen identificadas con cuatro letras. Abajo del mapa aparece la leyenda que indica la equivalencia entre el color y la PGA. En los sitios donde no se cuenta con información, además de la interpolación, se usó una relación de atenuación.

Leyes de atenuación

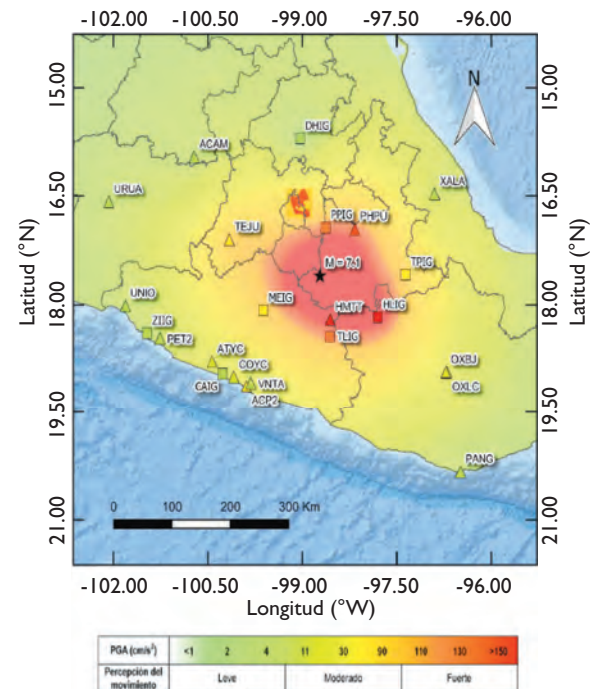
Las relaciones de atenuación ayudan a estimar los niveles de PGA que se espera observar para un sismo de magnitud dada a una distancia determinada. En la figura 5 se muestra la relación de atenuación correspondiente para este tipo de sismos² con una magnitud 7.1.

Los puntos indican las PGA observadas en las diferentes estaciones acelerográficas que lo registraron.

En la figura 5, las PGA de las estaciones situadas dentro de la cuenca de México están graficadas en rojo y anaranjado. Se puede observar que, a pesar de que los efectos de sitio tienden a amplificar el movimiento, esta relación de atenuación explica razonablemente los niveles de aceleración que se presentaron. Es la corta distancia desde la ruptura hasta la Ciudad de México lo que generó los grandes niveles de aceleración. Muestra de ello es que en una de las estaciones de la Ciudad de México se observó una aceleración máxima de 264 cm/s^2 en la componente EW y al menos dos estaciones más rebasaron los 200 cm/s^2 en la componente horizontal. Estas grandes aceleraciones provocaron daños importantes en la Ciudad de México. En la figura 6 se muestran los colapsos que provocó este sismo.

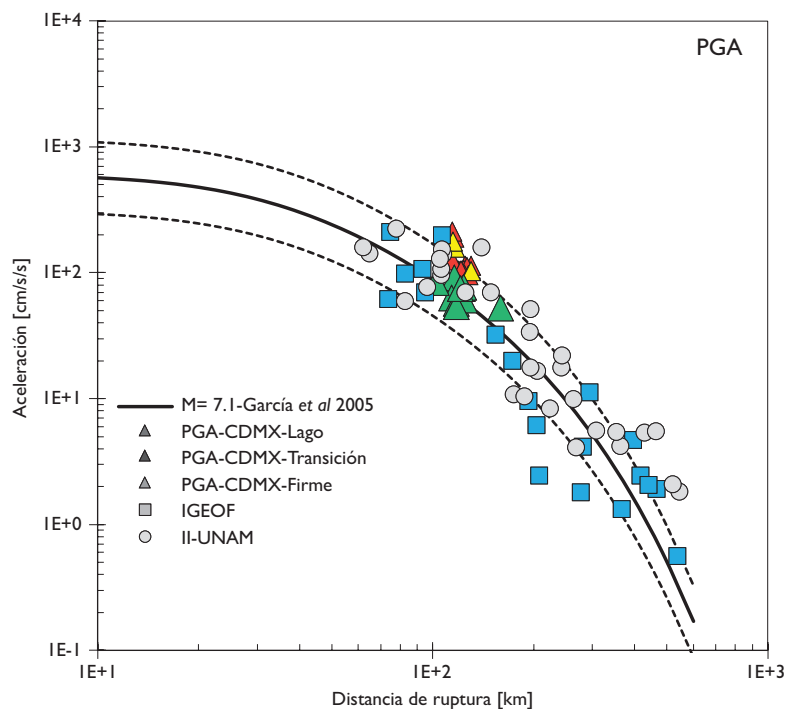
Colapsos y la zona de transición

En la figura 6 aparecen las zonas de daños generados por los sismos de 1957, 1979 y 1985. Se puede observar que existe una zona de intersección entre las zonas de



Fuente: Unidad de Instrumentación Sísmica²

FIGURA 4. MAPA DE INTENSIDAD DE LA ACELERACIÓN MÁXIMA DEL TERRENO EN (PGA)



CDMX: Ciudad de México

IGEOF: Instituto de Geofísica, UNAM

UNAM: Universidad Nacional Autónoma de México

FIGURA 5. RELACIÓN DE ATENUACIÓN DE GARCÍA Y COLABORADORES³ PARA SISMOS NORMALES Y DATOS OBSERVADOS DE LA ACELERACIÓN MÁXIMA DEL TERRENO (PGA)

esos sismos y la región de colapsos del sismo del 19 de septiembre de 2017. En el mismo mapa aparecen las curvas de isoperiodos[‡] de la Ciudad de México. La curva que aparece en blanco corresponde a 1 s y es el límite entre la zona de transición y la zona de lago. Se puede observar que la gran mayoría de los colapsos ocurrieron entre la curva de 1 s y la de 1.5 s.

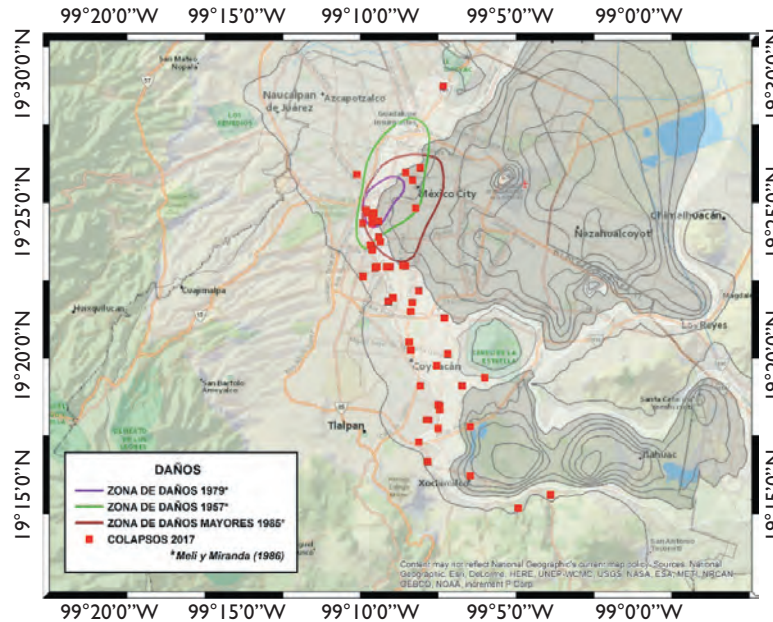
Seguridad estructural

El Estado mexicano intenta garantizar la seguridad de las construcciones mediante la emisión de reglamentos de construcción que establecen, entre otros aspectos,

[‡] Se refiere a los periodos de vibración del suelo. Si se imagina la oscilación lateral del suelo, el periodo es el tiempo que tarda en ocurrir una oscilación completa. El periodo de vibración depende de las propiedades del suelo. Un suelo rígido tiene un periodo de vibración corto mientras que el periodo de vibración de un suelo blando es mayor. Consecuentemente, en la zona lacustre, el periodo está relacionado con la profundidad del estrato blando. Los isoperiodos revelan indirectamente las curvas de nivel del lago.

los requisitos técnicos a los que deben sujetarse las construcciones a fin de que se satisfagan las condiciones de habitabilidad, seguridad, higiene, comodidad, accesibilidad y buen aspecto.¹ En el caso de la Ciudad de México, los requisitos técnicos están contenidos en las Normas Técnicas Complementarias para la definición de las cargas y criterios de diseño por sismo y viento; los criterios de diseño para estructuras de acero, de concreto, de mampostería y de madera, y un código separado para los criterios de diseño de cimentaciones. Las revisiones de estos códigos y el texto de dos nuevos (el de revisión y dictamen de la seguridad estructural y el de rehabilitación sísmica) fueron recientemente entregados a las autoridades de la Ciudad de México y aguardan su publicación.

Aunque cada municipio es responsable de emitir estos reglamentos, los municipios no cuentan con los propios, por lo que generalmente se utilizan los emitidos para la Ciudad de México o el Manual de Obras Civiles de la Comisión Federal de Electricidad (CFE). Sin embargo, la aplicación de dichas normas o manuales rara vez se establece como obligatoria, lo que crea un vacío legal en buena parte del país.



Fuente: Meli R, Miranda E. Evaluación de los efectos de los sismos de septiembre de 1985 en los edificios de la Ciudad de México.⁴

FIGURA 6. COLAPSOS OCURRIDOS POR EL SISMO DEL 19 DE SEPTIEMBRE DE 2017 Y LAS ZONAS DE DAÑOS GENERADOS POR LOS SISMOS DE 1957, 1979 Y 1985, REPORTADOS POR MELI Y MIRANDA⁴

Criterios básicos de diseño: desempeño

Para el diseño sísmico se establecen en forma implícita o explícita ciertos objetivos de desempeño de las estructuras ante distintos niveles de la intensidad de la acción sísmica. Por ejemplo, en el caso de edificios para oficinas, se espera que, para sismos de intensidad baja, que se producen con mucha frecuencia, la estructura pueda seguir operando sin daños, y para sismos ocasionales, pueda ser utilizada aunque haya sufrido daños menores en elementos no estructurales. Para un sismo de intensidad elevada y poco frecuente, la estructura debe mantenerse en pie para garantizar la vida de sus ocupantes. Un hospital, en cambio, es una estructura que debe mantenerse operando aun después de un sismo de gran intensidad para poder atender a los heridos y con ello salvar muchas vidas. El caso extremo es el de una central nuclear. Los daños que podría causar a la población la fuga de material radioactivo y las pérdidas económicas que resultan de que la planta deje de funcionar son enormes, por lo que se espera que la estructura sea capaz de evitar fugas de material radioactivo aun después de un sismo de magnitud extraordinaria y debe poder seguir operando aunque tenga daños menores (cuadro I).

Los reglamentos establecen niveles mínimos de desempeño, pero el dueño de una estructura puede y debe tomar decisiones acerca de los niveles de la suya para maximizar la rentabilidad de su inversión. La ingeniería moderna, idealmente, debería proveer la información necesaria para la toma de dichas decisiones.

Diseño por resistencia

En la norma mexicana, los niveles de desempeño no se verifican en forma explícita; en cambio, la metodología de diseño está basada en la resistencia. En esta metodología se garantiza que la estructura sea capaz de resistir las acciones de diseño; sin embargo, no siempre es claro cómo se asocian dichos criterios con distintos niveles de desempeño.

En el Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal (RCDF)⁵ se establecen los niveles de desempeño esperados en forma indirecta, mediante la definición de dos estados límite: el de servicio y el de resistencia. Para cumplir con el estado límite de servicio, la estructura debe analizarse ante una acción sísmica de baja intensidad y los desplazamientos laterales de la misma no deben exceder ciertos valores. De esta forma se intenta garantizar que la estructura sufrirá

Cuadro I
INTENSIDAD SÍSMICA MEDIDA EN PROBABILIDAD DE OCURRENCIA EN 50 AÑOS Y DESEMPEÑO ESTRUCTURAL

| | Operación completa | Operación daños menores | Protección de la vida | Protección contra colapso |
|-------------------------------------|--------------------|-------------------------|-----------------------|---------------------------|
| Sismos frecuentes (87% en 50 años) | | X | X | X |
| Sismos ocasionales (50% en 50 años) | | | X | X |
| Sismos raros (10% en 50 años) | | | | X |
| Sismos muy raros (2% en 50 años) | | | | |

Desempeño inaceptable

Objetivo básico

Objetivo esencial

Seguridad crítica

Fuente: Unidad de Instrumentación Sísmica²

daños menores ante la acción de sismos frecuentes. Para cumplir con el límite de resistencia, en cambio, la estructura debe analizarse ante la acción de un sismo intenso. La estructura en este caso debe poder resistir las fuerzas inducidas por el sismo.

Las resistencias en los elementos, tales como columnas o trabes, se calculan nominalmente al límite; esto quiere decir que la resistencia es la fuerza que inicia la falla del elemento. Para poder garantizar la estabilidad de la estructura, el valor de las acciones y de las resistencias nominales se afectan por factores de carga y resistencia, de modo que la probabilidad de exceder la magnitud de las acciones y de no alcanzar la resistencia calculada, respectivamente, sea muy baja (<2%). El estado límite de resistencia previene la posibilidad del colapso de la estructura y los daños que se pueden producir no ponen en peligro la vida de sus ocupantes. Sin embargo, el nivel de daño en la estructura puede ser considerable, lo que implica que ésta no podrá continuar en operación y requerirá extensas reparaciones.

Si la operación de una estructura se considera esencial, el factor de carga se incrementa para tratar de garantizar los mismos niveles de desempeño de una estructura convencional pero para una intensidad mayor de las acciones. Tal es el caso de estructuras como hospitales, escuelas, centrales eléctricas y telefónicas, etcétera.

Estado límite de resistencia y desempeño

En la figura 7 se observan muros de mampostería sometidos a cargas laterales cíclicas incrementales que

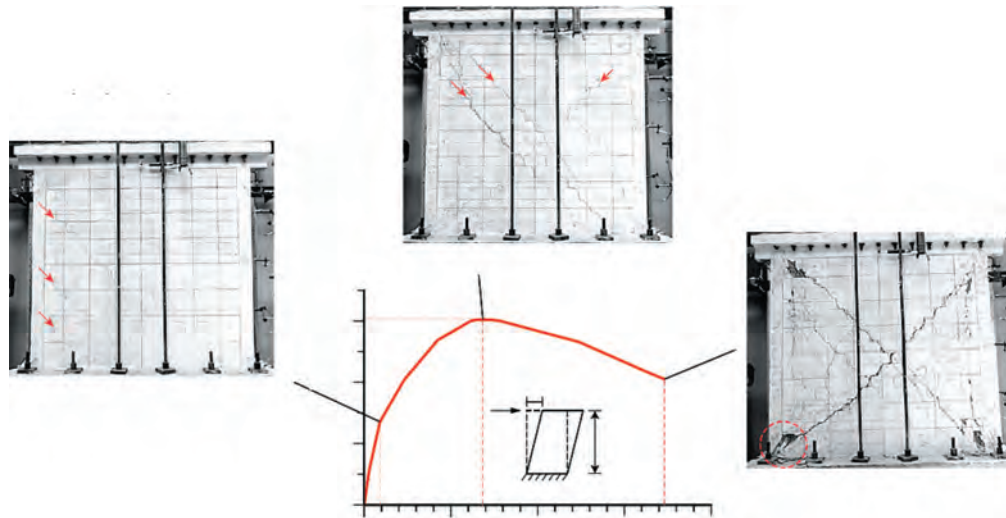
simulan la acción sísmica en el laboratorio. La curva muestra la envolvente de la fuerza lateral aplicada y la distorsión correspondiente sólo en sentido positivo. Los muros presentan distintos niveles de daño para distintos niveles de distorsión lateral, donde es el desplazamiento lateral y la altura libre del muro. La resistencia máxima, considerada en el límite de resistencia, está asociada a un nivel de daño que se considera reparable. Mientras que el nivel último es próximo al colapso, el castillo ya ha fallado y en algunos casos el daño ya no es económicamente reparable. En este caso, el criterio de límite de resistencia es consistente con un nivel de desempeño de protección de la vida y de protección contra colapso, pero será necesario suspender la operación y hacer una reparación extensa.

Algunos daños observados

A continuación, se presentan algunos casos de daños observados en el sismo del 19 de septiembre de 2017 en la Ciudad de México.

Daños en la infraestructura de salud

Los daños reportados en la infraestructura de salud están resumidos en el cuadro II.⁶ Los datos, sin embargo, son resultado de los primeros dictámenes realizados a las estructuras. No se tiene el dato de si fue evacuada la estructura en el caso de los hospitales del IMSS. Sin embargo, los dictámenes son públicos y pudo verificarse que, en los casos con daños graves, sí se tuvieron



Fuente: Cruz O. Contribución del refuerzo horizontal a la resistencia de muros de mampostería confinada

FIGURA 7. FUERZA LATERAL RESISTENTE Y NIVEL DE DAÑO



Muros no estructurales (Ing. Francisco García Jarque)



Colapso de estructura con planta baja débil (Jean Ingenieros)



Planta baja débil. Columnas con escaso refuerzo transversal (Dr. Eduardo Miranda)

FIGURA 8. ALGUNOS DAÑOS RECURRENTES. MÉXICO, SEPTIEMBRE DE 2017

CUADRO II
DAÑOS A LA INFRAESTRUCTURA HOSPITALARIA DESPUÉS DEL SISMO DEL 19 DE SEPTIEMBRE DE 2017

| Estructura tipo | Nivel de daño | | | | |
|---|---------------|-------|-------|-------|----------|
| | No | Menor | Medio | Grave | Evacuado |
| ISSSTE | | | | | |
| Hospital General de Alta Especialidad | 5 | 4 | 1 | - | 0 |
| Hospital General | 3 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Clínica Hospital | 8 | 5 | 3 | - | 0 |
| Centro Médico Nacional (consulta externa) | 1 | - | 1 | - | 1 |
| Clínica de Especialidades | 2 | 2 | - | - | 0 |
| Clínica Médica Familiar con Especialidades | 2 | 2 | - | - | 0 |
| Clínica de Medicina Familiar | 18 | 13 | 5 | - | 2 |
| Unidad Medicina Familiar | 14 | 12 | 1 | 1 | 2 |
| Total de estructuras | 53 | 39 | 12 | 2 | 6 |
| Unidades hospitalarias del ISSSTE | 16 | 10 | 5 | 1 | 1 |
| IMMS | | | | | |
| Nivel de daño | | | | | |
| | No | Menor | Medio | Grave | |
| Hospital de tercer nivel | 8 | 1 | 7 | 0 | |
| Hospital de segundo nivel | 7 | - | 2 | 5 | |
| Hospital de primer nivel | 2 | - | - | 2 | |
| Unidades Hospitalarias del IMMS | 17 | 1 | 9 | 7* | |
| Total de unidades Hospitalarias ISSSTE+IMMS | 33 | 11 | 14 | 8 | 1 |

* Las estructuras con daño grave tuvieron que suspender actividades parcialmente

ISSSTE: Instituto de Seguridad y Servicios Sociales de los Trabajadores del Estado

IMSS: Instituto Mexicano del Seguro Social

Fuente: datos obtenidos de Secretaría de Hacienda y Crédito Público⁸

afectaciones en la operación, pero generalmente solo en forma parcial.

Llama la atención el número de estructuras con daño grave. Como se mencionó anteriormente, este no es un desempeño aceptable para la magnitud del sismo y las aceleraciones registradas, ya que no exceden las consideradas por los reglamentos.

Daños en el patrimonio histórico

El daño al patrimonio histórico fue muy extenso, sobre todo en la llamada ruta de los conventos en Morelos, debido a la cercanía del epicentro. Se muestran algunos ejemplos en la figura 9.

Algunas reflexiones

En muchos casos, los colapsos o daños severos pudieron haber sido evitados. La responsabilidad no siempre recae en uno solo de los involucrados en el proceso, que va desde la concepción arquitectónica, el diseño estructural, la construcción y, no en menor grado, el uso que se da a la estructura. La autoridad interviene a lo largo de todo el proceso.

La concepción arquitectónica debe tomar en cuenta aspectos básicos para el buen desempeño de las estructuras. Se deben evitar, en lo posible, irregularidades desde el punto de vista estructural. Por ejemplo, que los elementos resistentes estén desalineados de nivel a



Santo Domingo de Guzmán, Tlaquiltenango



Santiago Apóstol, Jiutepec



Santo Domingo de Guzmán, San Andrés Hueyapan

FIGURA 9. DAÑOS AL PATRIMONIO HISTÓRICO DE MORELOS. SEPTIEMBRE DE 2017

nivel de una edificación, que existan cambios bruscos en el número y disposición de los elementos resistentes de una planta a la siguiente. Tener edificaciones muy esbeltas o alargadas, o bien tener entrantes o salientes bruscos en planta o elevación, por mencionar algunas de las irregularidades bien documentadas en las Normas Técnicas de Diseño por Sismo de la Ciudad de México.⁹ El cambio brusco de rigidez de la planta baja a las siguientes da lugar a uno de los problemas que generan más colapsos, y que es conocido como planta baja débil. Desafortunadamente, esta lección, no ha sido aprendida y en el reciente sismo se presentaron colapsos debido a este fenómeno.

Algunos de estos aspectos negativos llegan a los despachos de cálculo cuando el proyecto ya está en un estado avanzado de desarrollo y es poco susceptible hacer cambios. El ingeniero que debería objetar el diseño arquitectónico opta por intentar darle solución sin conseguirla. Es imprescindible que el ingeniero estructurista participe en la etapa inicial de la concepción del proyecto.

En la Ciudad de México, las figuras de director responsable de obra (DRO) y del corresponsable en seguridad estructural (CSE), previstas en el RCDF⁵ para garantizar la calidad de los proyectos y ejecución debida de las obras, no siempre han cumplido esta función debidamente.

Uno de los problemas recurrentes, que se observaron después del sismo, fue el daño de muros divisorios o de fachada que no cumplen una función estructural.

Para evitar la falla, estos muros deben separarse debidamente de la estructura y evitar el volteo fuera del plano.

La mayoría de los colapsos ocurridos en la Ciudad de México corresponden a estructuras con más de 30 años de existencia, lo que significa que fueron diseñadas con una versión anterior de los códigos vigentes, los cuales tuvieron modificaciones importantes tras el sismo de 1985. Adicionalmente, estas estructuras ya habían sufrido el sismo de septiembre de 1985. Este hecho ha generado la hipótesis de que varios colapsos pudieron deberse a la acumulación del daño. Este efecto no está contemplado en los códigos de diseño, por lo que será tema importante en la investigación de la energía estructural.

Los usuarios o propietarios últimos incurrir frecuentemente en modificaciones a la estructura que ponen en riesgo su desempeño ante un sismo. Estas modificaciones se dan, en muchos casos, junto con cambios en el uso de la estructura. Así, no son raros los casos de edificios originalmente construidos para vivienda, que son utilizados para oficinas y hasta para almacenar mercancías. Esta práctica compromete seriamente la estabilidad de las construcciones.

Más allá de la emisión de los códigos de diseño, las autoridades de todas las entidades federativas en general, y particularmente las de la Ciudad de México, no han cumplido con su función de garantizar que las construcciones cumplan los reglamentos.

El problema de la autoconstrucción sin el asesoramiento apropiado es quizá uno de los principales

causantes del colapso de las viviendas. La mayoría de los colapsos en los estados de Morelos, Oaxaca y Chiapas se presentaron en este tipo de estructuras y en las zonas más desprotegidas. El problema se reconoció desde el sismo de 1985, y se produjeron guías sencillas de autoconstrucción, encaminadas a dar los principios básicos a la población interesada en construir su propia vivienda para lograr una estructura con un buen desempeño sísmico.⁷⁻⁹ La difusión de estos materiales no ha sido suficiente y, lamentablemente, en muchas ocasiones las personas no cuentan con los recursos para la construcción de los refuerzos necesarios.

Es justo mencionar que la evidencia recabada, tanto en la Ciudad de México como en los estados mencionados, revela que una gran mayoría de las construcciones, expuestas a la misma acción sísmica que las otras que sufrieron extenso daño, tuvieron un desempeño adecuado. Este comportamiento, especialmente en estructuras de mampostería, pudo atribuirse al apropiado cumplimiento de los códigos de diseño. En muchos casos fue posible corroborar que cuando los muros de mampostería tuvieron el confinamiento adecuado, prescrito en las normas, las estructuras no sufrieron daños.

Conclusión

La cercanía del epicentro del sismo intraplaca del 19 de septiembre de 2017 produjo severos daños en la Ciudad de México. Los colapsos se presentaron en la zona de transición entre la vieja zona lacustre del valle y la zona de lomas.

El daño al patrimonio histórico, especialmente en el estado de Morelos, fue muy extenso y serán necesarias cuantiosas inversiones para rehabilitar los templos y los conventos dañados por el sismo.

En particular, los daños a la infraestructura hospitalaria en México revelan que el desempeño de estas estructuras está por debajo de un estándar aceptable, a juzgar por el número de centros de salud que suspendieron actividades, en forma total o parcial, ante un sismo que produjo aceleraciones en el rango de lo considerado por los reglamentos.

A 30 años del sismo del 19 de septiembre de 1985, el sismo del 19 de septiembre de 2017 revela que algunos de los vicios en el diseño y construcción de las estructuras que dieron lugar a muchos daños y colapsos en 1985 no han podido erradicarse con las consecuencias conocidas. El caso más emblemático es el de planta baja débil.

Deberá prestarse más atención a los elementos no estructurales y a la protección de los contenidos de las estructuras para prevenir los cuantiosos daños observados.

El problema del envejecimiento y acumulación de daño en las estructuras no se ha abordado debidamente;

sin embargo, ambos aspectos influyen negativamente en el desempeño de las estructuras y ponen en peligro a la población.

La seguridad de las estructuras, y por tanto de la población, ante la acción de un sismo intenso tiene que ver con un complejo sistema que está integrado por muchos grupos de interés: el estado rector encargado de prevenir los desastres, los desarrolladores, los que producen las normas, los diseñadores, los que construyen, verifican e inspeccionan las obras y los usuarios. El reto es hacer que el sistema produzca estructuras seguras y que cada quien cumpla cabalmente con sus responsabilidades.

Agradecimientos

Se agradece a Jean Ingenieros y al Ing. Jean Perrilliat por compartir sus reflexiones acerca del sismo de septiembre de 2017 y algunas de sus fotografías.

Declaración de conflicto de intereses. Los autores declararon no tener conflicto de intereses.

Referencias

1. Servicio Sismológico Nacional [sitio en internet]. México: SSN, 2017. Available from: <http://www.ssn.unam.mx/>
2. Unidad de Instrumentación Sísmica. Parámetros de movimiento del suelo, sismo de Puebla y Morelos (Mw 7.1) y 19 de septiembre de 2017 (preliminar). México: Instituto de Ingeniería, Coordinación de Ingeniería Sismológica, 2017.
3. García D, Singh K, Herraiz M, Ordaz M, Pacheco J. Inslab earthquakes of central México: Peak ground-motion parameters and response spectra. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 2005;95(6):2282. <https://doi.org/10.1785/0120050072>
4. Meli R, Miranda E. Evaluación de los efectos de los sismos de septiembre de 1985 en los edificios de la Ciudad de México. Parte I: Evaluación de daños. México: Instituto de Ingeniería, 1986.
5. Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal. México: Gaceta Oficial del Distrito Federal. 17 de junio de 2017.
6. Priestley MJN, Calvi GM, Kowalsky MJ. *Displacement-Based Seismic Design of Structures*. Pavia: IUSS PRESS, 2007.
7. Cruz O. Contribución del refuerzo horizontal a la resistencia de muros de mampostería confinada [tesis de maestría]. México, 2015.
8. Secretaría de Hacienda y Crédito Público. Fuerza México [sitio en internet]. México: SHCP, 2017. Available from: <http://www.transparencia-presupuestaria.gob.mx/es/PTP/fuerzamexico>
9. NTCS. Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo. México: Gaceta Oficial del Distrito Federal. 6 de octubre 6 de 2004: 55-77.
10. Centro Nacional de Prevención de Desastres. Cartilla breve para refuerzo de la vivienda rural de autoconstrucción contra sismo y viento. México DF: Cenapred, 2005.
11. Aragón CJ, Barrios BS, Flores CL. *Manual de Autoconstrucción sismo-resistente de viviendas de mampostería*. México: Cenapred, 2017.
12. Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural. *Guía de autoconstrucción de vivienda*. México: SMIE, 2015.
13. Hanks T, Kanamori H. A moment magnitude scale. *Journal of Geophysical Research*. 1979;84(B5):2348-50. <https://doi.org/10.1029/JB084iB05p02348>