

Peligro, vulnerabilidad y riesgo sísmico

Se presentan las principales variables que afectan el riesgo sísmico en obras de ingeniería, como marco de referencia para la toma de decisiones sobre los criterios de diseño por adoptar. Las características y los tiempos de ocurrencia de los temblores futuros se describen en términos probabilísticos mediante modelos de peligro sísmico; las posibles respuestas del sistema de interés y los consiguientes daños esperados se describen, también en forma probabilística, mediante las funciones de vulnerabilidad sísmica; el desempeño esperado de dicho sistema a



partir de su construcción se describe en términos del modelo probabilístico del riesgo sísmico al que estará expuesto como resultado de la interacción entre el peligro y la vulnerabilidad mencionados.

Introducción

Toda obra de ingeniería construida en un sitio donde pueden ocurrir movimientos sísmicos, ya sea de intensidad moderada o alta, está expuesta a la posibilidad de sufrir daños excesivos, o incluso un colapso, ante la acción de dichos eventos. Con el fin de evitar o reducir las consecuencias o el monto de estos daños, la ingeniería sísmica proporciona criterios, métodos y herramientas para el diseño estructural y la construcción de tales obras, así como para la evaluación, el mantenimiento y el refuerzo –en caso de ser necesario– de las construcciones existentes. Son muy elevados los márgenes de incertidumbre que afectan nuestra capacidad de predecir las intensidades máximas, duraciones, contenidos de frecuencias y más características detalladas del movimiento del terreno que puede presentarse en un sitio y un lapso determinado; esto afecta de manera considerable nuestro conocimiento sobre las relaciones entre las respuestas esperadas reales de las construcciones y los valores supuestos en el proceso de diseño estructural.





En la ingeniería sísmica lidiamos con diversos conceptos dentro de un marco de referencia basado en el análisis de probabilidades. Así, las características y tiempos de ocurrencia de los temblores futuros los describimos en términos probabilísticos mediante modelos de **peligro sísmico**; las posibles respuestas del sistema de interés las describimos mediante las **funciones de vulnerabilidad sísmica**; el desempeño esperado de dicho sistema a partir de su construcción, lo describimos en términos del modelo probabilístico del **riesgo sísmico** al que estará expuesto como resultado de la interacción entre el peligro y la vulnerabilidad mencionados.

En este texto se presenta un resumen de los conceptos fundamentales que se aplican en la determinación de funciones de peligro, vulnerabilidad y riesgo sísmico orientadas a la toma de decisiones en ingeniería, tanto para la formulación de criterios y normas para diseño como para establecer políticas y acciones específicas de inspección, mantenimiento, reparación y rehabilitación de sistemas estructurales. Por último, se proporciona una lista de referencias que pueden servir para profundizar en los problemas de los que aquí se presenta únicamente una visión panorámica.

■ Análisis de peligro sísmico

■ En su forma más simple, el peligro sísmico en un sitio se expresa por medio del valor esperado de la tasa de ocurrencia, por unidad de tiempo (año), de movimientos del terreno con intensidades iguales o mayores de cada valor dado (Esteva, 1967). Esta forma de describir el peligro sísmico lo supone como constante en el tiempo y es, por mucho, la empleada con más frecuencia, a pesar de que ignora las posibles fluctuaciones que el mencionado valor esperado pueda sufrir de acuerdo con la historia sísmica previa, como consecuencia de la evolución de los procesos físicos asociados a la acumulación y liberación de energía de deformación que se manifiestan en la actividad de las fuentes sísmicas cercanas al sitio de interés. Ésta es la forma adoptada en lo que sigue.

En un sitio o en una región dada, el peligro sísmico puede describirse en términos de las probabilidades de ocurrencia de movimientos del terreno de diversas intensidades durante lapsos determinados. Ello implica describir las posibles historias de ocurrencias de sismos como un proceso de eventos con intensidades aleatorias, que ocurren en instantes aleatorios (Esteva, 1976). En forma simplificada, también puede describirse el peligro sísmico mediante la tasa de ocurrencia de movimientos sísmicos con intensidades mayores que un valor de interés.

La intensidad de un evento está directamente relacionada con la amplitud del movimiento del terreno y puede medirse en términos de diversas variables. En general, conviene seleccionar la que presente una correlación más directa con sus efectos esperados sobre las obras o instalaciones consideradas.

Si se contara con información estadística suficiente sobre las características de los movimientos del terreno en un sitio dado, la determinación de la función de peligro sísmico en el sitio podría realizarse empleando directamente esa información. Sin embargo, esto en general no ocurre, por lo que es necesario acudir a estimaciones basadas en modelos probabilísticos que permiten calcular la intensidad de un temblor en un sitio a partir de la magnitud y de la distancia entre dicha fuente y el sitio de interés (Esteva, 1976). El peligro sísmico se suele represen-

Peligro sísmico

Descripción cuantitativa de las probabilidades de ocurrencia de movimientos sísmicos de distintas intensidades en un sitio dado durante intervalos de tiempo determinados.

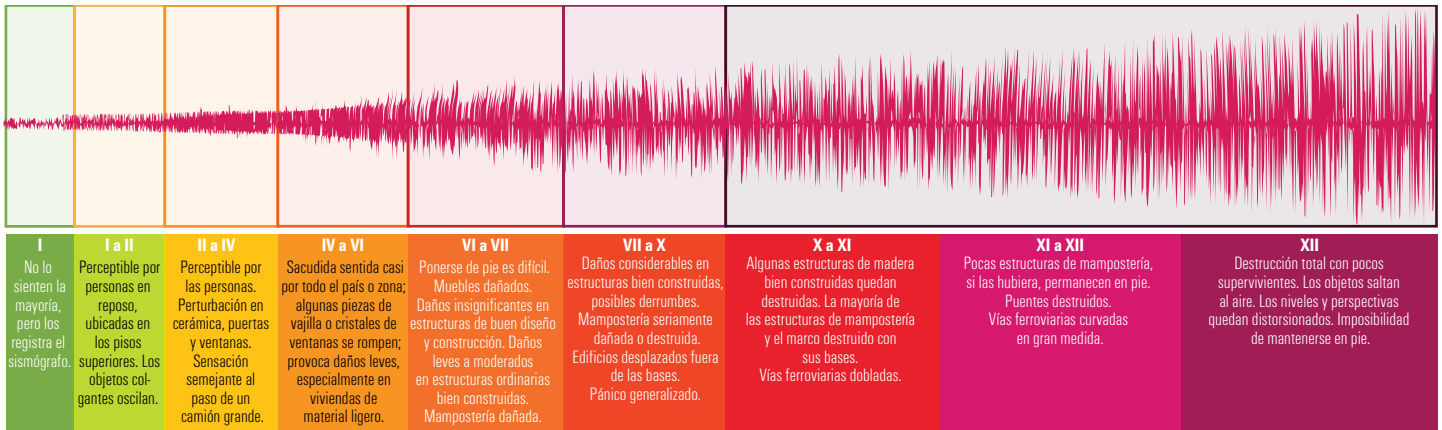
Función de vulnerabilidad sísmica

Relación cuantitativa entre la intensidad de un movimiento sísmico y los valores esperados de los daños probables que puede causar dicho movimiento en un sistema sobre el cual actúe, incluidas las probabilidades de ocurrencia de distintos modos de falla.

Riesgo sísmico

Descripción probabilística de las consecuencias esperadas de los daños que pueden presentarse en un sistema dado ante las acciones sísmicas que puedan ocurrir en dicho sitio, tomando en cuenta sus probabilidades de ocurrencia.





tar, por ejemplo, en términos de distribuciones de probabilidades de los tiempos de ocurrencia de temblores de diversas intensidades, del tiempo de espera para la ocurrencia de un temblor con una intensidad mayor o igual que un cierto valor dado, o del valor máximo de la intensidad durante un lapso determinado (Esteva, 1976).

■ **Análisis de vulnerabilidad sísmica de sistemas estructurales**

■ Las funciones de vulnerabilidad sísmica de una construcción son relaciones cuantitativas entre diversos indicadores de los daños probables que pueda sufrir una construcción ante un evento sísmico y la correspondiente intensidad del movimiento del terreno. El indicador que se emplee para cuantificar los daños probables dependerá de la aplicación que se tenga en mente. Por ejemplo, si el interés se centra exclusivamente en el nivel de seguridad con respecto al posible colapso de la construcción, la función de vulnerabilidad se expresará en términos de la probabilidad de que el sistema falle si se ve sometido a un movimiento sísmico de una intensidad considerada. Si nos interesa estimar los posibles niveles de daños físicos en la estructura, en los contenidos o en los elementos no estructurales o de relleno, será necesario obtener estimaciones probabilísticas de las respuestas dinámicas del sistema y de sus contenidos para cada intensidad sísmica empleando criterios y herramientas del análisis estructural. En tanto, para estimar las consecuencias económicas esperadas de

los temblores de diversas intensidades podrá partirse directamente de la información estadística –en caso de estar disponible– o se podrán emplear criterios que transformen la información sobre los daños físicos para una intensidad dada en valores esperados de los costos directos e indirectos de los daños para dicha intensidad, tomando en cuenta los costos esperados de daño tanto para la condición de colapso como para la de supervivencia.

La función de vulnerabilidad depende de la función de densidad de probabilidades del daño físico experimentado por todos los componentes estructurales y no estructurales que integran el sistema, así como de las consecuencias directas e indirectas de dicho daño. Su evaluación también debe tomar en cuenta el daño que puede experimentar el equipo, las instalaciones o los contenidos que puedan fallar, por ejemplo, por volcamiento, por distorsiones excesivas o por fatiga resultante de un número elevado de ciclos de respuesta dinámica.

Reyes (1999) presenta una lista de publicaciones en donde se reportan los resultados de pruebas de laboratorio orientadas a establecer relaciones cuantitativas entre los niveles de daño físico y las máximas amplitudes de la distorsión de diversos tipos de elementos y subconjuntos estructurales y de relleno. Ismael y cols. (2004) presentan algunos modelos simples para estimar la componente del valor del costo de daño correspondiente a la función de vulnerabilidad, e incluyen las contribuciones de costos directos e indirectos. Esteva y cols. (2009) presentan varios criterios para determinar las funciones de



vulnerabilidad sísmica relacionadas con la probabilidad de colapso de estructuras de edificios.

Si bien los criterios que expresan la condición de falla de un sistema sujeto a un movimiento sísmico con base en el concepto de *capacidad de deformación* representan un avance importante, presentan algunas limitaciones. Vamvatsikos y Cornell (2002) y Esteva e Ismael (2003) presentan criterios alternativos, basados en indicadores de daño que miden el deterioro que sufre el sistema estructural en sus propiedades mecánicas globales, como consecuencia de la amplitud y número de los ciclos de deformación que experimentan sus miembros.

Análisis de riesgo sísmico

Describimos el desempeño esperado de un sistema a partir de su construcción en términos del modelo probabilístico del *riesgo sísmico* al que estará expuesto, como resultado de la interacción entre el *peligro sísmico* en el sitio y la *función de vulnerabilidad sísmica* del sistema. Al igual que para el peligro sísmico, la representación probabilística del riesgo sísmico puede formularse por medio de diversos modelos, cada uno de ellos con distinta cantidad de información. En su forma más simple, el riesgo sísmico al que está sujeto el sistema se puede expresar en términos de

dos componentes: el valor esperado de la tasa anual de falla y el costo anual esperado de los daños en caso de que el sistema sobreviva.

Por otra parte, si es posible asignar un costo a las consecuencias de la falla, los dos conceptos citados pueden integrarse en un solo indicador que represente el costo anual esperado de los daños que puedan presentarse, incluyendo la falla. Este valor del riesgo sísmico toma en cuenta una medida cuantitativa de la amenaza sísmica, el costo inicial de la construcción, el costo esperado de daños como función de la intensidad (condicional a que la estructura no falle), el costo esperado de las consecuencias de la falla y la probabilidad de falla última (colapso) ante un temblor con intensidad igual dada; se incluyen también las aportaciones de los valores esperados de los daños en condiciones de supervivencia y falla. El costo inicial se puede estimar en forma aproximada, con base en el cálculo de la cantidad de material o volumen de obra que arroja un diseño preliminar del sistema con propiedades nominales, es decir, las que se suponen al diseñar, tomando en cuenta los factores de seguridad adoptados (Esteva *et al.*, 2002). Para algunas aplicaciones prácticas conviene expresar el riesgo sísmico en términos exclusivos del valor esperado de la tasa anual de falla.



Criterios de diseño sísmico basados en la optimización y el control de riesgo en el ciclo de vida

La *utilidad de una obra de ingeniería en su ciclo de vida* es un valor formado por la suma de las aportaciones a los costos y beneficios esperados por la operación de esa obra, desde su construcción hasta su demolición o abandono; esto último puede ocurrir a consecuencia de su posible colapso. Los componentes de esta utilidad incluyen valores positivos, como los beneficios esperados, y valores negativos, como los costos iniciales de construcción y los debidos a daños, fallas, acciones de mantenimiento y rehabilitación. Bajo la hipótesis de que en caso de falla o daño significativo el sistema de interés se repara o se reconstruye de acuerdo con el mismo diseño inicial, la función de utilidad en el ciclo de vida se



puede calcular tomando en cuenta el costo inicial y el costo anual esperado de los daños que puedan presentarse, considerando una tasa de descuento, o interés efectivo, que actualiza el valor de los costos.

El criterio de diseño propuesto considera un valor de la tasa anual de falla; si este valor es mayor que el que la sociedad está dispuesta a aceptar, deberá optarse por subir los requisitos de diseño, de tal manera que conduzcan a un nivel de riesgo que no exceda al tolerable. Con frecuencia, la discrepancia entre el valor del riesgo aceptable que resulta de un análisis de optimización y el tolerable por la sociedad está asociada al empleo de arreglos estructurales poco eficientes, que implican valores de costo inicial demasiado elevados para lograr niveles dados de desempeño; en muchos de estos casos, la mejor alternativa supone optar por un tipo de arreglo estructural más eficiente.

■ **Comentarios finales**

■ El análisis de los conceptos presentados en este trabajo hace ver algunos de los retos importantes que enfrenta la ingeniería sísmica moderna para establecer normas de diseño basadas en criterios de optimización y riesgo tolerable a largo plazo. Entre ellos, destacan los siguientes:

- a. Programas permanentes de actualización de normas:
 - Niveles de amenaza y riesgo.
 - Diseño basado en desempeño.
 - Métodos de análisis y diseño: equilibrio entre precisión y simplicidad.

- Zonificación y microzonificación sísmicas.
- Supervisión y control de calidad.
- b. Herramientas de trabajo:
 - Programas de computadora avanzados, eficientes y fáciles de aplicar.
- c. Educación continua:
 - Actualización de conceptos y criterios.
 - Métodos de análisis y diseño que logren un equilibrio adecuado entre simplicidad y precisión.

Luis Esteva Maraboto

Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México.

LEOstevaM@iingen.unam.mx

Lecturas recomendadas

- Esteva, L. (1967), "Criterios para la construcción de espectros para diseño sísmico", *Tercer Simposio Panamericano de Estructuras*, Caracas, Universidad Central de Venezuela.
- Esteva, L. (1976), "Seismicity", en C. Lomnitz y E. Rosenblueth (eds.), *Seismic Risk and Engineering Decisions*, Ámsterdam, Elsevier.
- Esteva, L. y E. Ismael (2003), "A maximum likelihood approach to system reliability with respect to seismic collapse", ponencia presentada en *11th IFIP WG7.5 Working Conference*, Banff, Canadá.
- Esteva, L., O. Díaz López, J. García Pérez et al. (2002), "Life-cycle optimization in the establishment of performance-acceptance parameters for seismic design", *Structural Safety*, 24(2-4): 187-204.
- Esteva, L., O. Díaz López y E. Ismael (2009), "Seismic vulnerability functions of multi-storey buildings: estimation and applications", *Structure and Infrastructure Engineering*, 6(1-2):3-16.
- Ismael, E., O. Díaz López y L. Esteva (2004), "Seismic vulnerability analysis for optimum design of multistory reinforced concrete buildings", ponencia presentada en *13th World Conference on Earthquake Engineering*, Vancouver, Canadá.
- Reyes, C. (1999), *El estado límite de servicio en el diseño sísmico de edificios* (tesis doctoral), México, Facultad de Ingeniería-UNAM.
- Vamvatsikos, D. y C. A. Cornell (2002), "Incremental dynamic analysis", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 31(3):491-514.