

Formulación para incorporar conceptos de riesgo en el diseño estructural y su aplicación a un edificio de concreto reforzado para hospital en una zona de alto peligro sísmico

David de León* y José A. Bastida Arzate*

Recepción: 11 de julio de 2008
Aceptación: 30 de marzo de 2009

* Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma del Estado de México, México.
Correo electrónico: daviddelen@gmail.com;
azulado_69@yahoo.com.mx

Resumen. Las pérdidas humanas y económicas causadas por terremotos en zonas altamente sísmicas, se deben principalmente al hecho de que estos eventos son impredecibles en intensidad y tiempo de ocurrencia entre otras características. Los criterios de diseño sísmico de estructuras que se usan en la actualidad se basan en un coeficiente de diseño que considera parcialmente y subjetivamente los daños potenciales y las consecuencias que podrían ocurrir si se presentara el evento sísmico.

En el presente trabajo se propone introducir conceptos de confiabilidad, riesgo y costo esperado en el ciclo de vida para mejorar los procedimientos de diseño sísmico identificando, entre otros aspectos, el coeficiente sísmico óptimo necesario para minimizar los costos en el largo plazo.

Palabras clave: riesgo estructural, costo esperado en el ciclo de vida, edificio de hospital, peligro sísmico.

Formulation to Introduce Risk Concepts in the Structural Design and its Application to a Reinforced Concrete Building for a Hospital in a High Seismic Risk Zone

Abstract. Human and economic losses caused by earthquakes in high-risk earthquake zones are mainly due to the fact that they are unpredictable in intensity and occurrence, among other factors. Earthquake structural design criteria, used nowadays, are based on a design coefficient which considers partially and subjectively the potential damage and consequences that may occur if the earthquake event happens.

In this work, risk, reliability and expected life-cycle cost concepts are proposed to improve the current earthquake design procedures by identifying, among other aspects, the optimal earthquake design coefficient needed to minimize short and long term cost. It is often said that this type of procedure supports "risk-informed" decision making.

Key words: Structural risk, expected life-cycle cost, concrete hospital building, earthquake hazard.

Introducción

El enfoque de tomar decisiones ingenieriles con base en información de riesgo está sustentado por el análisis y la ponderación de consecuencias y la probabilidad de falla en estructuras importantes. A las posibles pérdidas de vidas humanas, una vez que ocurre un temblor importante, deben añadirse las pérdidas debidas a la interrupción de la actividad económica de la estructura en sí, de los servicios, del contenido, etc. Como el grado de

daño físico que sufren los edificios durante los terremotos es lo que más contribuye a las pérdidas económicas, se puede decir que el costo de las consecuencias está fuertemente relacionado con el nivel de seguridad sísmica del edificio.

El incorporar la información que proviene de análisis de riesgo y confiabilidad lo cual ha probado su eficacia en otras disciplinas de la Ingeniería como la Ingeniería Costo Fuera aporta elementos adicionales de juicio, o refinamientos riesgo/beneficio, para mejorar el desarrollo de criterios y especificaciones de diseño

que permitan medir y controlar los riesgos sísmicos y poner al dueño y a la sociedad en mejor posición para decidir, de manera consciente, el tamaño del riesgo que está dispuesto a correr y la magnitud de recursos necesarios para invertirlos en el diseño que sean congruentes con el tamaño del riesgo por asumir.

Con estos procedimientos, los reglamentos y códigos podrían mejorarse al contar con información que permite establecer parámetros de diseño que sean congruentes con el nivel de riesgo aceptable para la sismicidad de cada zona. Con esta visión se pueden establecer, entre otros objetivos, el minimizar fatalidades y pérdidas económicas esperadas en la vida útil de la estructura, de acuerdo con el nivel de riesgo aceptable. De manera adicional, se puede determinar el monto que se debe invertir en seguros para proteger de manera óptima tanto la vida humana como el capital de la infraestructura y recomendar el monto de la prima adecuada al nivel de riesgo de la instalación.

Una evaluación que trate de mitigar daños o colapsos en edificios, debido a acciones sísmicas, tiene sus bases en estudios de vulnerabilidad sísmica, los cuales calculan la probabilidad de falla de la estructura ante la ocurrencia de un suceso destructivo con distintas intensidades, y en análisis de costos de las consecuencias de la falla. Dichos estudios están orientados a prevenir daños esperados en estructuras, en el supuesto de que ocurran temblores de intensidad significativa. El componente de la evaluación económica de las consecuencias de falla de la estructura permite realizar un balance entre el costo de la seguridad y el de las consecuencias de la inseguridad.

Para puntualizar, se entiende que el riesgo es el producto de la probabilidad de falla por el costo de las consecuencias de falla, fatalidades, daños a las propiedades (edificio y contenidos) y pérdidas por la interrupción de la actividad económica debido a la ocurrencia del sismo.

$$R = P_f X C_f \quad (1)$$

La confiabilidad estructural y el costo del ciclo de vida son herramientas que miden el peso de la relación costo/beneficio de varias alternativas de diseños y sirve para equilibrar las tendencias opuestas que siempre se presentan entre el nivel de seguridad de la estructura y su costo, es decir, mientras más alta es la seguridad se generan mayores costos iniciales. Por otra parte, no deben perderse de vista los costos (futuros) derivados de las consecuencias de los daños producidos si en la vida útil de la estructura se presentan intensidades sísmicas que provocan daños o fallas. La decisión de seleccionar el nivel de seguridad reflejará la magnitud del riesgo que se está dispuesto a asumir. El objetivo es que el nivel de seguridad que ha adoptado corresponda al mínimo del costo esperado en el ciclo de vida (inicial y futuro) para todas las alternativas propuestas (De León, 1996).

El cálculo de la probabilidad de falla para los diseños alternativos requiere de los análisis de respuesta sísmica de estos diseños ante intensidades sísmicas representativas de las que se pueden presentar en el sitio, de acuerdo con su riesgo sísmico, con probabilidad no despreciable. Como medida de este riesgo, se utiliza una curva desarrollada para la zona III de la ciudad de México (Esteve y Ruiz, 1989) y se escalan las intensidades sísmicas. Posteriormente, mediante análisis de las respuestas, se obtienen las acciones mecánicas debidas a los posibles sismos.

Debe mencionarse que los análisis de respuestas considerando la contribución de elementos no estructurales es un tema que aún está en pañales, pero que es importante porque las respuestas y la probabilidad de falla pueden verse modificadas debido a esta contribución.

Los costos de daño incluyen los de restitución del edificio, las fatalidades potenciales, pérdidas de contenidos e interrupción del uso comercial del edificio. El cálculo de la pérdida por fatalidades se basa en un modelo (De León, 1996), que estima el número esperado de fatalidades dado el colapso de un edificio como el que se propone en el presente trabajo.

A continuación se presenta una breve descripción de la formulación.

1. Formulación

La formulación se puede esquematizar en los siguientes puntos:

- a) Cálculo de la probabilidad aceptable de falla
- b) Cálculo de la probabilidad de falla de diseños alternativos
- c) Obtención de las curvas de costo inicial
- d) Desarrollo de funciones de costo esperado de falla
- e) Identificación del diseño óptimo

1.1. Probabilidad aceptable de falla

El costo total esperado del ciclo de vida, $E[C_T]$, está compuesto por un costo inicial, C_i , y un costo esperado de falla o daño $E[C_D]$ (Ang y De León, 1997):

$$E[C_T] = C_i + E[C_D] \quad (2)$$

El costo esperado de daño incluye:

- a) Los costos esperados de reconstrucción, los cuales están en función de la gravedad de los daños que sufre la estructura.
- b) Pérdidas esperadas de contenidos (equipo, instalaciones, instrumentos, camas, etcétera).
- c) Pérdida económica por suspensión del servicio del hospital.
- d) Y costos esperados por posibles fatalidades.

Cada uno de estos costos depende de las probabilidades de falla que presente la estructura, donde, la probabilidad de falla “aceptable” (P_f) se obtiene (Sthal, 1986) a partir de la condición de minimización del costo esperado en el ciclo de vida $\partial[CT] / \partial P_f = 0$:

$$P_f = 0.435 \Delta C_i / [PVF (C_f)] \tag{3}$$

Donde PVF = Factor de Valor Presente

$$PVF = [1 - \exp(-rT)] / r \tag{4}$$

ΔC_i = Es la pendiente de la curva de costo inicial (costo de incrementar la seguridad de la estructura para reducir la P_f de 0.01 a 0.001, por ejemplo).

En la figura 1 se muestra una curva de P_f aceptable para varios valores de C_f y para el caso típico donde la tasa anual neta de descuento r es 8%, para México, y la vida útil T es de 50 años.

1.2 Probabilidad de falla de diseños alternativos

Una vez que se han establecido las características (tamaños de sección y áreas de refuerzo de acero) para los diseños alternativos, se calculan sus probabilidades de falla de acuerdo con: (figura 1)

$$P_f = P[R - C < 0] \tag{5}$$

Donde R y C son los valores de la resistencia y la carga en la sección crítica del elemento estructural crítico, es decir, el que podría fallar primero. Aquí se considerará, de manera simplificada y conservadora, que la falla de la estructura ocurre cuando falla el elemento estructural crítico.

Para representar la incertidumbre en las variables de diseño, comúnmente se emplean variables lognormales (Benjamín y Cornell, 1981) por lo cual la ecuación (4) adquiere la forma:

$$P_f = P \left[\ln \left(\frac{R}{C} \right) < 0 \right] \tag{6}$$

El concepto de índice de seguridad o confiabilidad β , de la expresión anterior es (Ang y De León, 2005):

$$\beta = \frac{\left[\ln \frac{R}{C} \right]_m}{\sigma_{\ln(R/C)}} \tag{7}$$

donde el subíndice m representa la media, es decir:

$\left[\ln \frac{R}{C} \right]_m$ es la media del logaritmo natural de R/C

La ecuación (7) puede simplificarse usando aproximaciones de primer orden (Benjamín y Cornell, 1981):

$$\beta = \frac{\ln \left(\frac{R_m}{C_m} \right)}{\sqrt{V_R^2 + V_C^2}} \tag{8}$$

Donde:

R_m y C_m : son las medias de la resistencia y el efecto de la carga, y

V_R y V_C : son los coeficientes de variación correspondientes.

Además, cuando el estado límite que rige el diseño es la interacción por flexo-compresión, como se verá más adelante es el caso del edificio considerado, puede usarse una versión alternativa:

$$\beta = \frac{\ln 1 - \ln(z)}{\sqrt{V_R^2 + V_{Ca}^2}} = \frac{-\ln(z)}{\sqrt{V_R^2 + V_{Ca}^2}} \tag{9}$$

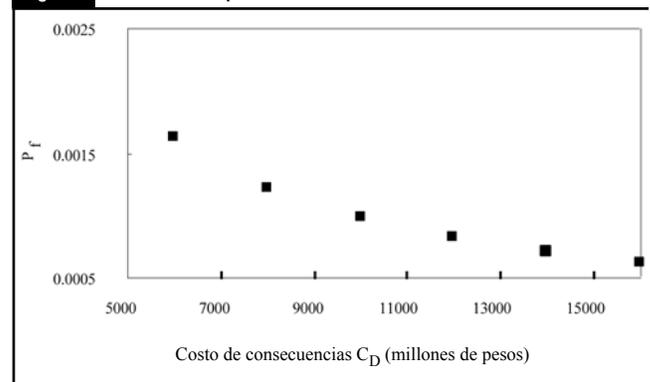
Donde:

$$z = \text{función_de_estado_límite} \tag{10}$$

$$P_f = 1 - \Phi(\beta) \tag{11}$$

El cálculo de z se realiza mediante simulación de Monte Carlo y el análisis de la respuesta sísmica de la estructura considerando acciones sísmicas derivadas de la curva de riesgo sísmico. Para el caso de la zona III del DF puede tomarse como base una curva propuesta previamente para las tasas de excedencia de intensidades (Esteva y Ruiz, 1989) y, a partir de ella, generar la distribución anual acumulada de intensidades, ver figura 1. La tasa media o promedio “ v ” de excedencias de intensidades “ y ”, establecida para la zona III del DF, se define en la ecuación (12).

Figura 1. Probabilidad aceptable de falla vs. costo de consecuencias.



Estas intensidades son aceleraciones máximas del terreno:

$$v(y) = 80 y^{-1.6} [1 - y / 500] \quad (12)$$

La probabilidad anual acumulada se obtiene de suponer una ocurrencia poissoniana de sismos. El proceso de Poisson es uno llamado “sin memoria” porque la probabilidad de que suceda un determinado temblor no depende de la historia previa de temblores. Es el modelo más sencillo para predecir la ocurrencia de temblores. Su representación matemática es:

$$P = e^{-vt} \quad (13)$$

Donde:

P: Representa la probabilidad anual acumulada de que se presente un temblor.

v: Es la tasa media de ocurrencia de temblores significativos en el D.F.

t: Es el intervalo de tiempo de ocurrencia de temblores, en años.

1.3. Funciones de costo inicial

Como ya se mencionó, a la probabilidad de falla de cada diseño alternativo, se le asocia su costo inicial respectivo, obtenido de un análisis ordinario de precios unitarios.

1.4. Funciones de costo esperado de falla

1.4.1 Costo asociado a fatalidades

Por otro lado, para el costo esperado relacionado con la pérdida de vidas humanas, se considera el costo que corresponde a la pérdida de una vida, desde un punto de vista matemático-financiero, y el número esperado de fatalidades (N_D), el cual se calcula utilizando la ecuación 8. El costo asociado con una pérdida de vida puede estimarse en términos de la estimación del capital humano, que consiste en el cálculo de la contribución de la pérdida debido a la muerte de un individuo durante su vida restante esperada. El número esperado de fatalidades

se estima de una curva desarrollada previamente para edificios típicos de la ciudad de México (De León, 1996), en términos de su área total de planta, dado que se presenta un terremoto con una tasa media de ocurrencia típica del sitio.

$$N_D = 45.48 + 5.53 A^2$$

Donde:

N_D : es el número de personas que podrían fallecer en caso de un colapso, y

A: es el área total del edificio dividida entre 1000 para aplicarse en la ecuación 14.

1.4.2 Costo asociado a interrupción del servicio hospitalario

De acuerdo con el número de camas, según el área de la planta del hospital, el porcentaje de ocupación usual y el costo en el año, se calcula cuánto ingreso generaría el hospital anualmente y esta cantidad se multiplica por el periodo de la interrupción del servicio debido a la reconstrucción del hospital.

1.4.3 Costo asociado a pérdida de contenidos

Para tener una estimación cercana del costo esperado de contenidos se debe tomar en consideración el tipo y costo de equipo e instalaciones del hospital.

1.4.4 Costo esperado en el ciclo de vida

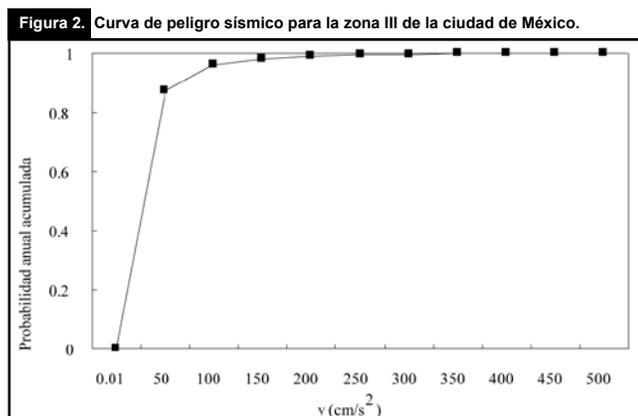
Finalmente, ya que se han calculado las probabilidades de falla, se obtiene el costo esperado del ciclo de vida de cada alternativa de diseño. El diseño que se debe recomendar es el que arroja el costo mínimo durante el ciclo de vida. El procedimiento se puede sintetizar como sigue:

a) Con base en la curva de riesgo sísmico para el DF, desarrollada a partir de tasas de falla propuestas por Esteva y Ruiz (1989), se establecen cuatro aceleraciones de suelo representativas de las que pueden presentarse en la zona blanda del DF.

b) Se proponen ocho diseños alternativos: el real, que sería el que obtendría mediante la aplicación de la norma vigente (RDF, 2004), 5 más con geometrías de secciones mayores al real, las cuales serían: 10, 15, 20, 30 y 50% más grandes, y 2 con secciones menores (10 y 15%).

c) Se identifica el modo de falla más probable mediante una serie de análisis de respuesta preliminares realizados para un diseño típico y aceleraciones de suelo típicas para el sitio.

d) Se evalúa la probabilidad de falla del edificio condicional ante cada una de las aceleraciones propuestas para cada uno de los diseños alternativos.



1.5. Selección del diseño óptimo

Se evalúa la función de costo esperado en el ciclo de vida para todas las alternativas de diseño y se elige el diseño que corresponda al valor mínimo del costo esperado en el ciclo de vida.

2. Aplicación al caso de estudio

2.1. Estructura del hospital

El edificio que se propone para desarrollar el estudio está ubicado en la zona centro de la ciudad de México, es decir, se encuentra construido en un terreno blando (Zona IIIb) por lo que se trata de un suelo con baja capacidad de carga, que pudiera ser algún tipo de arcilla o de limo.

2.2. Obtención del diseño óptimo

La probabilidad de falla se calcula como:

$$P_f = E \{z\} / \sigma_z \quad (15)$$

Donde z es el estado límite para la sección crítica:

$$z = 1 - \{Pa/Pr + Ma/Mr\} \quad (16)$$

Además:

P_a : Es la máxima fuerza axial aplicada

P_r : Es la fuerza axial resistente, es decir, la capacidad de carga

M_a : Es el momento máximo actuante o momento aplicado

M_r : Es el momento resistente

La falla se define conservadoramente como el evento donde el elemento más crítico falla. Esto implica que se está considerando que la estructura se colapsa en el momento en que se presenta la primera falla local, lo cual no ocurre en estructuras con cierta redundancia. Sin embargo ésta es una hipótesis conservadora que en un futuro deberá mejorarse. El edificio fue diseñado ignorando el criterio de “columna fuerte-trabe débil” y, por tanto, los análisis reflejan que el elemento estructural crítico es la columna.

Se calcula la probabilidad de falla y el índice de confiabilidad, para cada diseño alternativo, mediante la aplicación del teorema de probabilidad total, que representa la integración de las probabilidades condicionales multiplicadas por la probabilidad de ocurrencia de cada aceleración propuesta. Estas aceleraciones propuestas son $c = 0.15g$, $c = 0.25g$, $c = 0.35g$ y $c = 0.45g$.

De acuerdo con los parámetros que maneja la Cámara Mexicana de la Industria de la Construcción, CMIC (www.cmic.com.mx, abril de 2007), se obtiene el costo de edificación para hospitales a nivel nacional: costo por metro cuadrado = \$7 477.76/m².

Si el hospital tiene un área construida por nivel de 588.55 m² y está formado por 6 niveles, entonces, esto quiere decir que, de acuerdo con los parámetros que maneja la CMIC, el edificio tiene un valor aproximado de \$26 406 213.89.

La pérdida asociada a fatalidad está dada por el producto del número de personas que podrían fallecer en caso de un colapso del edificio (N_D), por el ingreso que dejarían de percibir en el resto de su vida laboral. Por lo que se necesita estimar el ingreso económico que dejarían de percibir las personas que, desafortunadamente, fallecieron en caso de que se presentara un colapso, para ello se realiza una suposición del número promedio de años que podrían haber tenido de vida productiva, en caso de que el colapso no ocurriera, donde, para fines del presente, el tiempo que se propone de “vida” laboral es de 25 años.

Siguiendo recomendaciones previas (De León, D., 1996 y Ang y De León, 1997) y considerando que el área de planta por nivel es 588.55 m² y área total = 3531.30 m², $N_D = 114.46$.

El Distrito Federal se encuentra en la zona centro del territorio mexicano y forma parte del Área Geográfica “A”. (www.sat.gob.mx, agosto de 2007). Para este caso, el salario que rige es: \$50.57, por lo que, para obtener el salario anualizado de una persona, se multiplica el salario medio (considerando que los ocupantes del hospital integran un salario promedio) por

Figura 3. Elevación de uno de los lados del edificio.

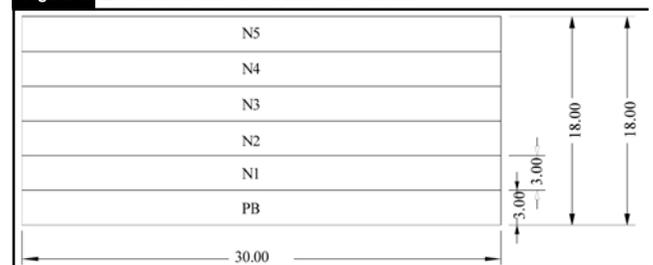
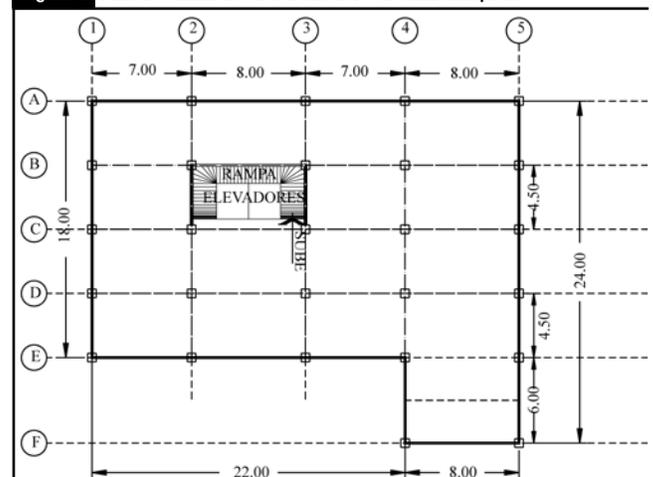


Figura 4. Planta estándar desde PB hasta N-5 de cada entrespiso.



el número de personas que podrían fallecer en caso de que se presentara el colapso de la estructura (N_D), por lo que la pérdida por fatalidades resulta del orden de \$200 millones de pesos.

Como se mencionó, la sección que se denomina “real”, es la sección producto de un análisis donde se utilizaron los criterios de diseño propuestos por el reglamento de construcciones actual, y a partir de ésta, se proponen las otras cuatro secciones para el análisis del proyecto. Con respecto a este diseño “real” se propusieron otros 7 diseños alternativos considerando cuatro casos de subdiseños (con secciones menores a las del diseño real) y 3 sobrediseños (con secciones mayores a los del diseño real). La finalidad es contar con diseños alternativos que puedan ser contrastados desde los puntos de vista de seguridad y economía.

Siguiendo un programa de obra, se logró determinar, tanto la duración de la obra, como los costos generados durante el desarrollo y construcción de la misma.

Según datos de la CMIC (www.cmic.com.mx, 2007), el costo de contenidos es de \$ 8 449 988.44

Tomando en cuenta que la tarifa promedio de renta de una habitación de hospital en el DF es de \$650.00 y si el hospital en cuestión tiene alrededor de 200 camas, entonces el ingreso por total de camas es \$130 000.00

Conforme a datos proporcionados por algunos hospitales, tanto de la ciudad de Toluca como del Distrito Federal, como son el promedio de ocupación, número y costo de operaciones quirúrgicas y costos de tratamientos, el total por servicios representa un monto mensual de: \$4 260 000.00 lo que arroja un monto anual de: \$ 51 120 000.00

Se estima que para la reconstrucción de un inmueble como éste se toma un tiempo aproximado de 1.5 años, entonces, el monto total de pérdida por interrupción del servicio es de \$76 680 000.00

Finalmente, se puede decir que el costo de las consecuencias de falla es de, $C_f = \$310\,157\,962.96$.

De manera similar se determinó el costo de falla para cada uno de los otros diseños alternativos.

Se realizó el análisis de confiabilidad simplificado de los casos considerados como diseños alternativos, utilizando técnicas de simulación de Monte Carlo, y se obtuvieron las probabilidades de falla correspondientes. Después de una serie de análisis sísmicos preliminares, se identificó que, como se mencionó antes, para todos los diseños el elemento crítico es una columna del primer piso que está sujeta a la peor combinación en cuanto a la relación de interacción por flexocompresión, por lo cual se utilizarán las cargas y resistencias en la sección de este elemento (columna) para el análisis de confiabilidad. Una primera observación es lo pobre

del diseño ya que, como se sabe, el propiciar que la falla de la trabe anteceda a la de la columna, resulta menos riesgoso.

Dado que el análisis de costos incluye las pérdidas del hospital debido a la falla potencial de la estructura, deben considerarse los costos “reales” de la atención médica, es decir, sin contar subsidios que el Estado aporta al sector salud. Esto significa que en el caso de hospitales públicos los resultados aplican igual que en los privados si se manejan los costos reales.

Ahora bien, dado que la propuesta pretende aplicarse a una población de estructuras de hospital, no sólo a una en particular, se requiere estimar el número total de construcciones del tipo considerado en la región sísmica en estudio. Se supone que existen 50 edificios con características similares al del estudio, estructuras de mediana altura, que serán utilizados como hospitales. Para hospitales de baja o gran altura los resultados de confiabilidad podrían ser distintos y debe realizarse el cálculo.

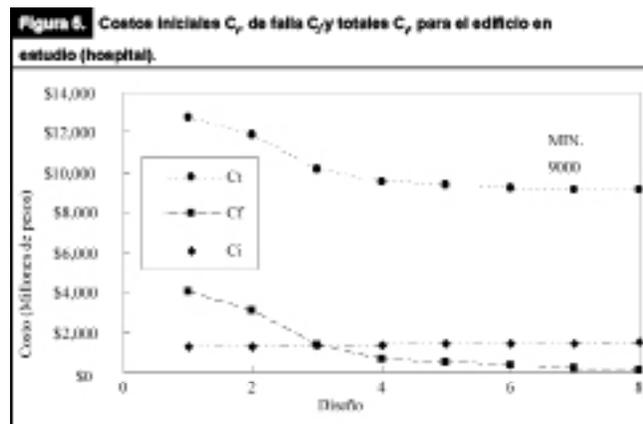
Por tanto, el costo de pérdidas para la población de edificios que podrían verse dañados ante la ocurrencia de un sismo, es $C_f = \$15\,500$ millones.

Con base en este dato, y con la ayuda de la figura 2, se concluye que la probabilidad anual aceptable de falla, para este costo de pérdidas es: $p_{fo} = 0.0007$.

Para la evaluación de confiabilidad de las alternativas de diseño, se requieren las capacidades de las secciones críticas. Éstas se calculan siguiendo procedimientos ordinarios de diseño de estructuras de concreto (Meli, R., 1991).

Cabe hacer mención que al considerar la curva de riesgo sísmico y al hacer la relación de interacción entre la carga axial y el momento, se identificó que de las cuatro aceleraciones propuestas, la de 0.15g es la que contribuye con el mayor peso en la probabilidad de ocurrencia y, por tanto, en la de falla de la estructura. Por tal motivo, para el análisis de las últimas 2 secciones, sólo se consideró dicha aceleración.

Los costos de los 8 diseños considerados, (para los 50 edificios) se muestran en la figura 5.



3. Discusión de resultados

Al buscar la probabilidad de falla aceptable entre las que se obtuvieron de los análisis, se observa que el diseño óptimo está cerca del que corresponde a la aceleración del suelo de $0.15g$ cm/seg². Esto se debe a que esta aceleración es la que más contribuye en la curva de riesgo sísmico. En otras palabras, es la que tiene mayor probabilidad anual de ocurrencia, de modo que al multiplicarse por la probabilidad de falla condicional a esa intensidad, produce el término más alto en la suma de términos de la probabilidad total. Esto se explica porque, aunque la falla total implica un costo mayor, la probabilidad de que ocurra en un año es mucho menor que la de temblores moderados por lo cual el producto de probabilidad por costo es mayor para estos últimos.

Además, es de notar que, comparada con la recomendación de la sección de 70×70 cm, que es la que se propone con un análisis convencional, los resultados muestran que es más conveniente desde el punto de vista del menor costo en el largo plazo la sección de 91×91 cm, ya que, utilizando esta sección, el costo esperado en el ciclo de vida es menor que el de todas las demás alternativas de diseño, además de que se está garantizando un mayor grado de seguridad y confiabilidad, especialmente por la importancia del tipo de estructura que se está analizando.

En otros países, las estructuras de hospitales tienen probabilidades de falla del orden de la obtenida en este estudio (10^{-3} y 10^{-4}) y los costos son también de miles de millones de USD.

Debe notarse que al simplificar el modelo de falla, de modo que el evento falla esté dado por la falla del primer elemento, se adopta una posición conservadora pues los modelos donde se considera como falla la combinación de fallas de varios elementos estructurales conducen a probabilidades de falla globales que son menores a las del primer modelo. Se ha visto (Ang y De León, 2005) que las diferencias son del orden del 20%.

En estos resultados influyó principalmente el costo de la interrupción del servicio por lo que las futuras especificaciones de diseño de hospitales deberán basarse en parámetros como la importancia, el costo del servicio y la funcionalidad requerida para controlar de manera objetiva el nivel de desempeño de los hospitales.

En esta aplicación el tipo de diseño ya estaba establecido, y se observa que el elemento crítico fue una de las columnas. De acuerdo con reglamentos modernos, en la práctica del diseño sísmico se debe procurar que se siga el mecanismo de columna fuerte-trabe débil, lo cual conduce a que la trabe sea el elemento crítico. En el presente caso, el diseño, que ya estaba establecido, no siguió esta regla.

La contribución de los elementos no estructurales es importante porque puede reducir el valor de la probabilidad de falla, así como incrementar el costo de reparaciones y daños a contenidos. Aunque no se considera normalmente, por tratarse de un tema incipiente, en el futuro deberá ser tratado explícitamente en los análisis de respuesta sísmica.

Conclusiones y recomendaciones

Se mostró un procedimiento para obtener las dimensiones óptimas de la sección crítica de una estructura, con base en la minimización del costo esperado en su ciclo de vida, es decir incorporando en la decisión el costo de las consecuencias de falla de la estructura.

Se incorporó también explícitamente el efecto del riesgo sísmico en términos de las probabilidades de que ocurran sismos de diversas magnitudes en la zona III del DF.

Se concluye que el efecto de muchos sismos de magnitud pequeña o moderada es mayor que el de uno excepcionalmente intenso, pero con probabilidad de ocurrencia baja.

El tamaño óptimo de la sección crítica de un edificio de hospital construido con concreto reforzado de 6 niveles localizado en la zona blanda del DF, es de 91×91 cm. Se ha obtenido un nivel de seguridad del orden del usado en países desarrollados (EU y Europa).

Para un hospital es de suma importancia considerar explícitamente el costo de las pérdidas por falla ya que el requisito de seguridad se ve impactado por dichos costos. Se recomienda que las futuras normas consideren de manera explícita el tipo de servicio y el costo de las consecuencias de afectar la operación del hospital debido a un desempeño estructural inadecuado.

El análisis de confiabilidad fue simplificado pues no se consideraron la redundancia y los estados y combinaciones de fallas de elementos que conducen al colapso global. Puede esperarse que los resultados varíen $\pm 20\%$ al incorporar estas consideraciones.

En estructuras importantes, es recomendable aplicar los conceptos mostrados para optimizar en el largo plazo debido a que las consecuencias de falla son especialmente relevantes, sobre todo para fines de normalización en zonas de alta sismicidad.

Se recomienda generalizar el estudio para poderlo aplicar a edificios con otras alturas, otros tipos estructurales, otros usos importantes y otras situaciones de riesgo (viento, deslizamiento de lodos, agrietamiento del suelo, etcétera).

Se recomienda evitar el diseño “trabe fuerte-columna débil” pues conduce a resultados de mayor riesgo.

Se recomienda incluir la contribución de los elementos no estructurales en los análisis de respuesta sísmica.

Bibliografía

- Ang, A. H-S. y D. De León (1997). "Determination of Optimal Reliabilities for Design and Upgrading of Structures", *Structural Safety*, Vol. 19.
- Ang, A. H-S. y D. De León (2005). "Modeling and Analysis of Uncertainties for Risk-Informed Decisions in Infrastructures Engineering", *Journal of Structure and Infrastructure Engineering*, Vol. 1.
- Bazán, E. y R. Meli (2002). *Diseño sísmico de edificios*. Ed. Limusa, México.
- Benjamín, J. y Cornell, A. (1981). *Probability, Statistics and Decisions for Engineers*, McGraw Hill Book Co, New York.
- De León (1996). "Integrating Socio-Economics in the Development of Criteria for Optimal Aseismic Design of R/C Buildings", Tesis Doctoral, University of California.
- Esteva, L. y S. Ruiz (1989). "Seismic Failure Rates of Multistory Frames", *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 115, Núm. 2.
- Meli, R. (1991). *Diseño estructural*. Limusa, México, DF.
- Noguéz Estrada, J. G. (1986). *Recomendaciones para el diseño sísmico en estructuras para casa habitación*. Toluca, México, pp.1-19.
- R.D.F. (2004). *Reglamento de construcciones para el Distrito Federal*. México, D.F.
- Sexsmith, R. G. (1993). *Seismic Risk Management for Existing Structures*. Department of Civil Engineering, 2324. Main Mall. The University of British Columbia. Vancouver, BC V6T 1Z4, Canada.
- Sthal, B. (1986). Edited by McClelland, B. and Reifel, M. D., "Reliability Engineering and Risk Analysis", Chapter 5 from Planning and Design of Fixed Offshore Platforms. Van Nostrand Reinhold Co. New York. www.cmic.com.mx, CMIC, abril del 2007.



CONVERGENCIA *Revista de Ciencias Sociales.*
Año 16, Número 51, septiembre-diciembre de 2009.

Publicación del Centro de Investigación y Estudios Avanzados en Ciencias Políticas y Administración Pública, de la Universidad Autónoma del Estado de México.







<http://convergencia.uaemex.mx>
www.redalyc.com.mx
revistaconvergencia@yahoo.com.mx
Telfax (722) 215 0494