

# Evaluaciones en el ciclo de vida sobre el uso de pruebas para reparar estructuras dañadas por sismos

David De Leon (1)\*, Luis Esteva (2), David Delgado (3) y Juan Carlos Arteaga (3)

- (1) Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma del Estado de México, Ciudad Universitaria, Toluca, Estado de México, 50000, México, e-mail: daviddeleonescobedo@yahoo.com.mx
- (2) Instituto de Ingeniería, UNAM, Circuito Escolar, Ingeniería S/N, C.U., Coyoacán, 04510 Ciudad de México, México, e-mail: [lestevam@iingen.unam.mx](mailto:lestevam@iingen.unam.mx)
- (3) Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma del Estado de México, Ciudad Universitaria, Toluca, Estado de México, 50000, México, e-mail: delgadoh01@yahoo.com
- (4) Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma del Estado de México, Ciudad Universitaria, Toluca, Estado de México, 50000, México, e-mail: jcarteaga\_mx@yahoo.com.mx

## Presentación:

En este artículo se propone un procedimiento para valorar la efectividad económica de estudios/pruebas para reducir la incertidumbre en el nivel de daño, en casos donde no hay certeza, en construcciones dañadas por sismo que requieran reparación. Se consideran diversos niveles de daño, de importancia de la estructura y de exposición sísmica. El artículo hace un balance entre el costo de los estudios/pruebas y el beneficio de reducir la incertidumbre, que conlleva menores pérdidas esperadas.

## Antecedentes

En el pasado, se han propuesto métodos para recomendar espectros de diseño sísmico para diversas zonas de la Ciudad de México; el Reglamento de edificios de 1987 explora los pros y contras de las aproximaciones determinísticas y probabilistas (Rosenblueth y otros, 1989).

Uno de los primeros trabajos que presentó el cálculo de pérdidas potenciales por sismo para edificios, incluyó un tratamiento explícito de incertidumbres (Ellingwood, 2007).

Otro ejemplo del tratamiento del riesgo en estructuras es el esfuerzo del Comité Conjunto en Seguridad estructural (JSCC, 2008) que provee recomendaciones para sistemas estructurales complejos.

El uso de la optimización en el ciclo de vida, como herramienta en la toma de decisiones, has sido explorado y aplicado (Esteva y otros, 2011) y se han desarrollado funciones de vulnerabilidad y confiabilidad que no requieren de las capacidades de deformación lateral.

Habiendo tantas incertidumbres en Ingeniería Sísmica, los ingenieros usualmente deciden de manera subjetiva cómo reparar de manera conservadora de acuerdo a su juicio

ingenieril y experiencia. Este escenario es similar a lo que se conoce como “gansos negros” o la “tormenta perfecta” (Paté- Cornell, 2012), frases que remarcan la situación donde la estadística no es suficiente para resolver la ausencia o las limitaciones de ciertas normas y estándares.

Se presentó un procedimiento para calcular la confiabilidad de estructuras tomando en cuenta el daño acumulado por la posible ocurrencia de temblores en el futuro bajo la hipótesis de que los sismos ocurren según un proceso de Poisson (Santa\_Cruz y Gresia, 2020).

Se aplicó incertidumbre epistémica a movimientos del terreno con correlación espacial, para un conjunto de edificios, para mostrar su efecto en el cálculo de pérdidas financieras (Gómez-Zapata y otros, 2022)

Sin embargo, hasta ahora, no hay estudios de la efectividad en costo de los estudios y pruebas para realizar reparaciones por daños sísmicos, ni se han identificado la reducción en incertidumbre epistémica ni los límites hasta donde conviene invertir en esos estudios y pruebas.

### **Procedimiento propuesto**

La decisión de realizar o no estudios y pruebas para la reparación de estructuras dañadas por sismos se basa en las siguientes 3 variables:

- Nivel de daño que tengan las estructuras
- Nivel de consecuencias de falla (asociado a la importancia de la estructura)
- Nivel de peligro sísmico del sitio.

Se emplean simulaciones de Monte Carlo para la ejecución de los cálculos.

La medida de conveniencia económica de estas alternativas se realiza mediante el costo esperado en el ciclo de vida:

- Incluyendo el costo de los estudios y pruebas en la probabilidad anual de falla (incertidumbre epistémica en la media del índice global de daño)
- Sin incluir el costo de estudios/pruebas (usando la probabilidad de falla original sin reducción de la incertidumbre epistémica)

Estas evaluaciones se realizan para todos los casos de: nivel de daño, importancia de la estructura y peligro sísmico.

En consecuencia, se evalúan los siguientes estados:

LD (daño bajo), HD (daño alto)

LI (baja importancia), HI (alta importancia)

LH (bajo peligro), HH (alto peligro)

$$P_f^1 = P(F|LD, LH, LI) \quad (1)$$

$$P_f^2 = P(F|LD, LH, HI) \quad (2)$$

$$P_f^3 = P(F|LD, HH, LI) \quad \dots \quad (3)$$

...

$$P_f^8 = P(F|HD, HH, HI) \quad (4)$$

El siguiente diagrama de bloques ilustra, de manera, simplificada, los cálculos necesarios para implementar el procedimiento en los casos considerados. Una limitación del estudio es que no se toma en cuenta el tiempo que se emplearía en los estudios y pruebas y que podría retrasar los trabajos de reparación. Ver la Fig. 1

### Valor presente del costo esperado en el ciclo de vida

La herramienta de decisión elige entre las 2 alternativas:

$$E(LCC_1) = E(C_{f_1}) + RC_1 \quad (5)$$

Donde LCC es el costo en el ciclo de vida,  $C_f$  es el costo de falla y RC es el costo de reparación; el subíndice 1 aplica a la alternativa que sí hace los estudios y pruebas. Aquí la probabilidad de falla del edificio considera una reducción en la incertidumbre epistémica, producto de la información de las pruebas/estudios y esta incertidumbre epistémica, que se supone que baja a 0.2, se denota por  $CVe$  y significa que la media del índice global de daño tiene un coeficiente de variación de 0.2.  $RC_1$  incluye el costo de los estudios/pruebas

$$E(LCC_2) = E(C_{f_2}) + RC_2 \quad (6)$$

El subíndice 2 es para la alternativa que excluye los estudios/pruebas. Aquí, la probabilidad de falla del edificio se calcula considerando que la incertidumbre epistémica es de 0.4, es decir,  $CVe = 0.4$ .  $RC_2$  no incluye el costo de los estudios/pruebas.

El valor presente del costo esperado de daño es:

$$E(C_f) = PWF(P_f)C_f \quad (7)$$

$PWF$  es el Factor de valor presente, y  $P_f$  es la probabilidad de falla del edificio:

La incertidumbre epistémica en  $D$ , que es la media del índice global de daño, se incorpora con:

$$LN(\check{D}, CVe) \quad (8)$$

$\check{D}$  es la mediana del índice global de daño.

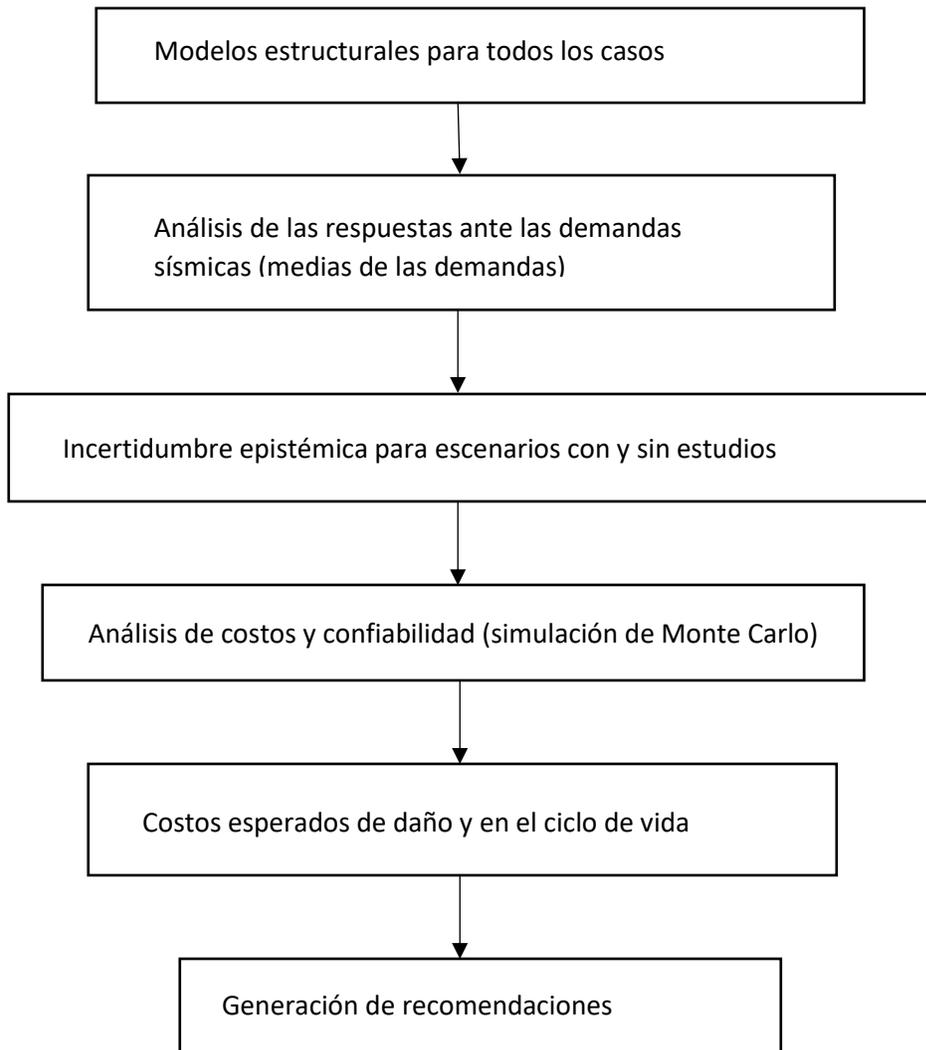


Fig. 1 Diagrama simplificado con el procedimiento propuesto

Si se definen las variables:

Nivel de daño (D), importancia de la construcción (I) y nivel de peligro sísmico (H), deben evaluarse 8 casos que corresponden a 2 estados por cada una de las 3 variables.

A partir de la revisión bibliográfica y, con las adaptaciones pertinentes, se desarrolló la siguiente metodología, ilustrada con el diagrama de bloques adjunto, y se determinaron las siguientes expresiones para evaluar el costo/beneficio para los casos a considerar de edificios, usos, estructuración, niveles de daño sísmico y nivel de peligro sísmico:

## Identificación y modelado de estructuras con daño sísmico.

Se emplean 3 edificios reales, con diferente uso, tipo estructural, niveles de daño y distintas niveles de exposición a peligro sísmico, fueron identificados, modelados y analizados.

Por ejemplo, para una escuela de 2 niveles en Morelos; se presenta una imagen de daños en la Fig. 2.



Fig. 2 Daños en columnas cortas en el sismo de 2017 en la escuela en Morelos.

Las vistas en planta y elevación se presentan a continuación.

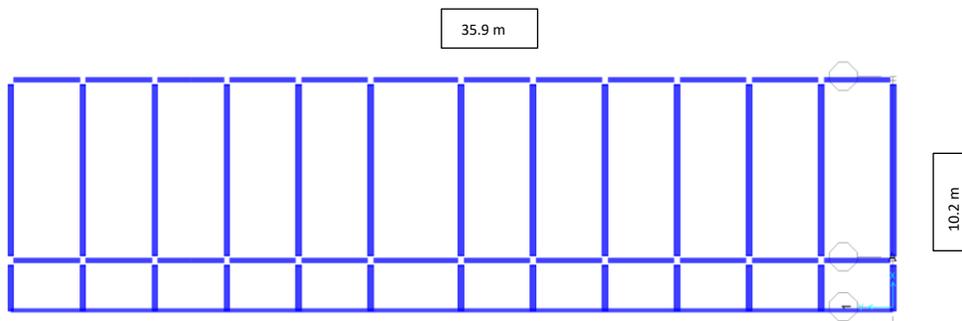


Fig. 3 Vista en planta de la escuela

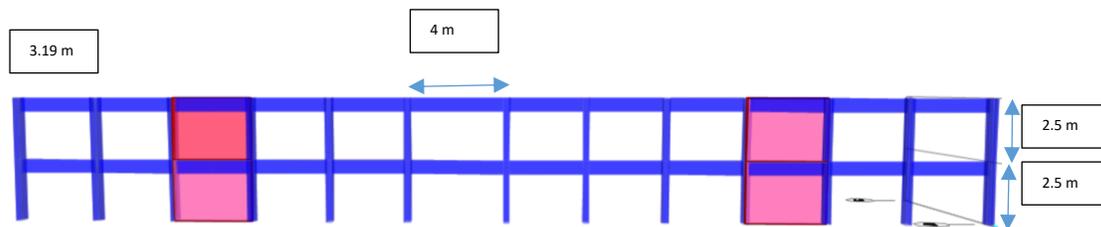


Fig. 4 Elevación de la escuela

El espectro de diseño empleado para la escuela en Morelos se observa en la Fig. 5.

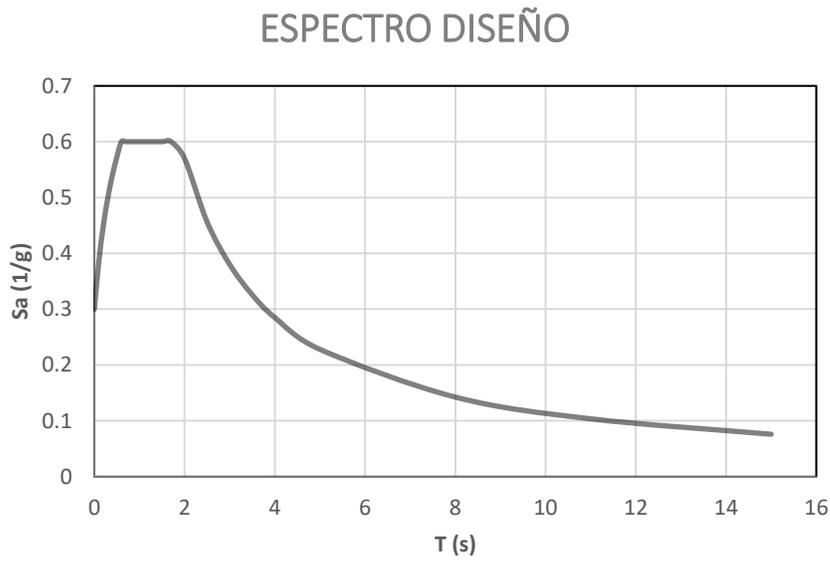


Fig. 5 Espectro de diseño sísmico para Morelos

Las Figuras 6 y 7 muestran las secciones de la trabe y columna, respectivamente.

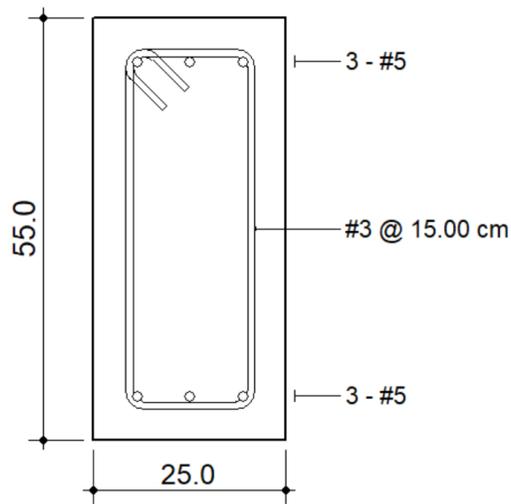


Fig. 6 Sección de la trabe principal de la escuela

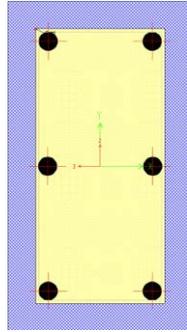


Fig. 7 Sección transversal de columna 25 x 45 8 # 8

Los periodos dominantes y las pseudoaceleraciones máximas de demanda son:

$$T1= 0.375$$

$$T2= 0.207$$

Espectro de diseño

$$SAx=0.53 \text{ g}$$

$$SAy= 0.45 \text{ g}$$

Los resultados de los análisis preliminares se muestran a continuación.

### **Análisis de fragilidad y probabilidades de falla**

El análisis de fragilidad se obtuvo variando las demandas sísmicas  $SAx$  y  $SAy$ , para cubrir los posibles temblores en el resto de la vida útil de la construcción.

La probabilidad de falla se calculó considerando las demandas sísmicas como valores medios, las resistencias como resistencias medias y los coeficientes de variación de la literatura: para demanda sísmica  $CVS = 0.33$  y para resistencia  $CVR = 0.1$

Las distribuciones se consideran Gumbel (para la demanda) y lognormal para la resistencia.

Los parámetros de la distribución Gumbel se calculan

$$u = \mu - 0.5772\alpha \quad (9)$$

$$\gamma \alpha = \pi/(\sigma \sqrt{6}) \quad (10)$$

Los parámetros  $\lambda$  y  $\zeta$  de la distribución lognormal se evalúan con:

$$\zeta_D^2 = \ln(1 + CV_D^2) \quad (11)$$

$$\lambda = \ln(D) - \frac{\zeta_D^2}{2} \quad (12)$$

Así, se calcularon las probabilidades de falla por simulación de Monte Carlo para cada aceleración de suelo y se obtuvieron las curvas de fragilidad. Como muestra, la siguiente fig. contiene la del presente caso, una escuela en el estado de Morelos.

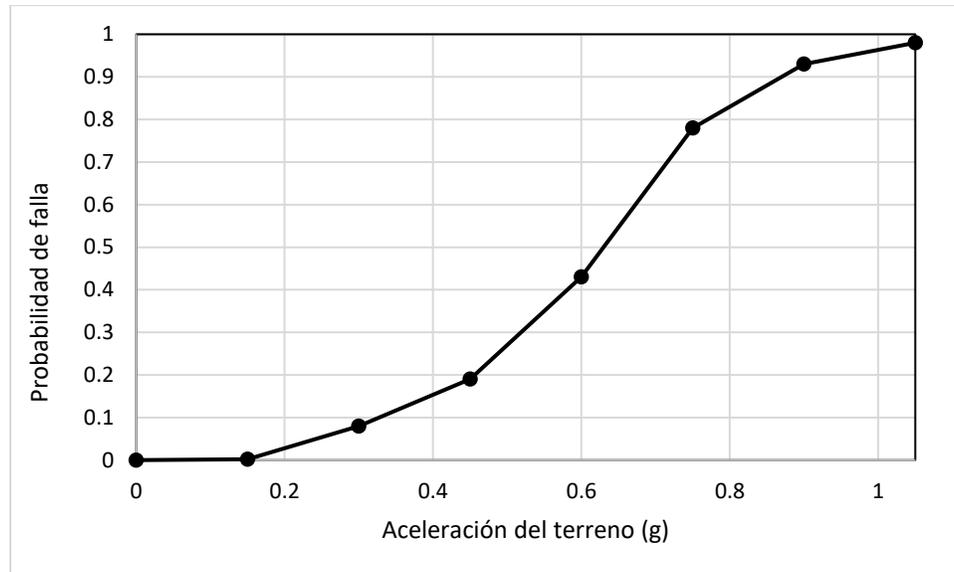


Fig. 8 Curva de fragilidad del edificio de escuela

La probabilidad anual de falla, en condiciones dañadas, es 0.024 (De León y García, 2021).

### Análisis de costos

El costo de las consecuencias de falla para la escuela es 15.1 millones de dólares y la probabilidad de falla, bajo condiciones de daño, es 0.024

Así, se pueden calcular los costos esperados en el ciclo de vida para los escenarios con y sin estudios/pruebas.

De acuerdo a resultados publicados (De León y García, 2021), un esquema de reparación de la escuela, que incluye estudios/pruebas, reduce la probabilidad anual de falla.

En ese estudio, la incertidumbre epistémica en el valor medio del índice global de daño  $D$  estimado como  $D = 0.3$ , fue  $CV_e = 0.2$ . Bajo estas condiciones, la probabilidad anual de falla se redujo a  $9 \times 10^{-4}$  y el costo esperado en el ciclo de vida fue 0.18 millones de dólares.

El costo de reparación (incluyendo el costo de los estudios/pruebas) fue de 0.015 millones de dólares.

Bajo el escenario 2, donde no se realizan estudios/pruebas, la incertidumbre epistémica en el valor medio del índice global de daño  $D$  hubiera sido  $CVe = 0.4$  con el consecuente resultado de probabilidad de falla de 0.0068

Y, como consecuencia, el costo esperado en el ciclo de vida se hubiese elevado a 1.26 millones de dólares (casi 8 veces el correspondiente a la opción de hacer los estudios/pruebas).

Por tanto, para este caso particular, es conveniente realizar los estudios/pruebas.

Si el costo de las consecuencias de falla hubiese sido menor o igual a 2 millones de dólares, entonces la recomendación habría sido que no hay necesidad de realizar los estudios/pruebas.

De la misma manera, se desarrollaron los cálculos para otras 2 construcciones ubicadas en localidades con distinto nivel de peligro sísmico: un edificio de oficinas en la Ciudad de México y un hospital en el estado de Guerrero (Reporte técnico al Conacyt, proyecto 320587)

## **Análisis de resultados**

Los resultados finales, por edificio considerado, son:

- Para la escuela en Morelos, si el número de estudiantes fuera de la mitad (100), el costo de las consecuencias de falla sería 1.3 millones de dólares.

Si la probabilidad de falla fuera 0.002 (asociada con  $D = 0.15$ ), y con  $CVe = 0.2$ , y con un costo de reparación de 0.1 millones de dólares (incluyendo 0.03 millones de dólares para estudios/pruebas), el costo esperado en el ciclo de vida sería 0.13 millones de dólares, incluyendo los estudios/pruebas.

Para la alternativa donde los estudios/pruebas NO se incluyen, la probabilidad de falla, con  $CVe = 0.4$ , sería 0.004 y el costo esperado en el ciclo de vida sería el mismo 0.13 millones de dólares, con lo cual el límite de nivel de daños donde, para la escuela de Morelos empieza ser conveniente realizar los estudios/pruebas es  $D=0.15$  (o una probabilidad de falla de hasta 1.3 millones de dólares, los estudios/pruebas NO son necesarios.

- Para un edificio de oficinas en la Ciudad de México, suponiendo un costo de consecuencias de falla de 2 millones de dólares, los resultados son:

Si la probabilidad de falla es 0.002 y  $D = 0.16$ , con  $CVe = 0.2$ , y el costo de reparación es 0.21 millones de dólares incluyendo 0.06 millones para estudios/pruebas, entonces el costo esperado en el ciclo de vida incluyendo los estudios/pruebas es de 0.26 millones.

Para la alternativa donde los estudios/pruebas NO están incluidas, la probabilidad de falla, con  $CVe = 0.4$ , es 0.0042 y el costo esperado en el ciclo de vida también es 0.26 millones.

Por tanto, para un edificio de oficinas en la Ciudad de México, con bajo nivel de consecuencias de falla como del orden de 2 millones de dólares, el umbral a partir del cual los estudios/pruebas son convenientes es desde una probabilidad de falla 0.002 ( $D$

desde 0.16). Si el costo de las consecuencias de falla es menor a 2 millones de dólares, los estudios/pruebas NO son necesarias.

- Para un edificio en Guerrero donde el costo de consecuencias de falla es de 3 millones de dólares, los resultados son:

Si la probabilidad de falla es de 0.001 (asociada con  $D = 0.12$ ), con  $C_{Ve} = 0.2$  y un costo de reparación de 0.85 millones de dólares (incluyendo 0.05 millones para estudios/pruebas), el costo esperado en el ciclo de vida incluyendo dichos estudios es de 0.88 millones.

Para la alternativa de NO incluir los estudios, el costo esperado en el ciclo de vida es de 0.88 millones, con una probabilidad de falla de 0.0022 y  $C_{Ve} = 0.4$ .

Por tanto, para un edificio en Guerrero, con un costo de consecuencias de falla de 3 millones de dólares, el umbral donde los estudios/pruebas empiezan a ser convenientes es cuando la probabilidad de falla es desde 0.001 ( $D$  desde 0.12). Y si el costo de consecuencias de falla es menor a 3 millones de dólares, los estudios/pruebas NO son necesarios.

## Discusión

Para edificios con un nivel de daño importante ( $0.5 > D > 0.12$ ) los estudios/pruebas son convenientes para reducir la incertidumbre epistémica en la media del índice global de daño y, por tanto, para reducir las probabilidades de falla, siempre que el costo de consecuencias sea alto (mayor que 30 millones de dólares).

Se enfatiza que el caso  $D > 0.5$  no se considera ya que la alternativa de demoler/reconstruir puede ser más conveniente que reparar.

El nivel de peligro juega un papel importante ya que, cuando se considera la vida remanente del edificio, éste se verá sometido a sismos potenciales cuya intensidad depende del peligro sísmico del lugar.

Se recomienda tener precaución antes de aplicar estos resultados a situaciones de edificios, nivel de daño y nivel de importancia diferente.

## Conclusiones

Se ha propuesto un procedimiento para generar recomendaciones sobre el uso de estudios/pruebas para la reparación de edificios dañados por sismo, el cual toma en cuenta el nivel de daño del edificio, el nivel de importancia del mismo y el nivel de peligro sísmico en el sitio donde se localiza el mismo.

Se recomienda realizar estudios/pruebas en estos casos:

Si el nivel de daño global del edificio  $D$  es  $> 0.12$  si la estructura es importante (el costo de consecuencias de falla supera los 75 millones de dólares en el estado de Guerrero, si supera los 45 millones en la Ciudad de México y si supera los 15 millones en el estado de

Morelos). En estos casos, los costos de los estudios/pruebas no deberán exceder los 0.5, 0.3 y 0.2 millones de dólares, respectivamente.

Para estructuras no muy importantes con costos de consecuencias de falla inferiores a las mostradas antes pero donde estas cifras son mayores a 3, 2 y 1.3 millones de dólares, para edificios localizados en el estado de Guerrero, la Ciudad de México City y el estado de Morelos, respectivamente. Para estos casos los costos de los estudios/pruebas no deben exceder los 0.07, 0.06 y 0.05 millones de dólares, respectivamente.

Se recomienda extender el estudio para cubrir otros tipos estructurales, niveles de importancia de construcciones (incluyendo vivienda de mampostería y adobe) y niveles de peligro sísmico.

## **Bibliografía**

De León-Escobedo D. and Garcia-Manjarrez J. L: (2021) Cost and reliability of retrofit alternatives for schools located on seismic zones. *Earthquakes and Structures*, Vol. 21, No. 5, pp. 505-512 <https://doi.org/10.12989/eas.2021.21.5.505>

Ellingwood B. (2007) Fragility assessment of building structural systems in Mid-America. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics* 36(13):1935 - 1952 DOI:10.1002/eqe.693

Esteva L., Campos D. and Díaz-López O. (2011) Life-cycle optimization in earthquake engineering, *Structure and Infrastructure Engineering*, 7:1-2, 33-49, DOI: 10.1080/15732471003588270

Gómez Zapata J.C., Pittore M., Cotton F., Lilienkamp H., Shinde S., Aguirre P. and Santa María H. (2022) Epistemic uncertainty of probabilistic building exposure compositions in scenario-based earthquake loss models. *Bull Earthquake Eng* 20, 2401–2438. <https://doi.org/10.1007/s10518-021-01312-9>

Joint Committee of Structural Safety (2008) [https://www.jcss-lc.org/publications/raie/04\\_risk\\_backgrounddoc\\_interpretation-of-uncertainties\\_and\\_probabilities\\_in\\_civil\\_engineering\\_decision\\_a.pdf](https://www.jcss-lc.org/publications/raie/04_risk_backgrounddoc_interpretation-of-uncertainties_and_probabilities_in_civil_engineering_decision_a.pdf), downloaded dec. 5th., 2021

Paté-Cornell, E. (2012) On “Black Swans” and “Perfect Storms”: Risk Analysis and Management When Statistics Are Not Enough. *Risk Analysis*, 32(11), pp. 1823-1833, <https://doi.org/10.1111/j.1539-6924.2011.01787.x>

Rosenblueth, E., M. Ordaz, F.J. Sánchez-Sesma, and S.K. Singh (1989). Design spectra for Mexico's Federal District, *Earthquake Spectra* 5, 258-272. <https://doi.org/10.1193/1.1585523>

Santa-Cruz S. and Gresia J. (2020) Reliability estimation of incremental retrofitted structures considering cumulative seismic damages. 17th World Conference on Earthquake Engineering, 17WCEE, Sendai, Japan.