

ANÁLISIS DE LA RESILIENCIA SÍSMICA DE EDIFICIOS

Juan Gutiérrez Trejo ⁽¹⁾ y Gustavo Ayala Milián ⁽¹⁾

RESUMEN

En este trabajo se presenta una metodología probabilista para estimar variables de decisión fundamentales de la teoría de la resiliencia sísmica de edificios: costos de reparación, tiempo de reparación, tiempo de recuperación y número de trabajadores necesarios para realizar los trabajos de rehabilitación. El esquema de evaluación propuesto está basado en el método recursivo PERT y es consistente con la metodología probabilista para evaluar el desempeño propuesta por el PEER y con el concepto de resiliencia desarrollado por el MCEER. Para ilustrar la metodología se presenta la evaluación de un edificio de concreto reforzado de siete niveles de altura diseñado de acuerdo con las Normas Técnicas Complementarias-Diseño por Sismo (2020) y en el que se consideran muros de mampostería no reforzada. Este sistema estructural es típico de los edificios para uso de oficinas. La metodología propuesta puede ser utilizada para incrementar la resiliencia sísmica de edificios, y para establecer estrategias de mitigación y recuperación no solo de edificios individuales, sino de conjuntos de edificios.

Palabras clave: Resiliencia estructural; tiempo de reparación y de recuperación; costos de reparación

RESILIENCE SEISMIC ANALYSIS OF BUILDINGS

ABSTRACT

In this paper, a probabilistic methodology to estimate fundamental decision variables of the theory of seismic resilience of buildings is presented: repair costs, repair time, recovery time and number of workers needed to perform the rehabilitation works. The proposed evaluation scheme is based on the recursive PERT method and is consistent with the probabilistic methodology for evaluating performance proposed by PEER and with the concept of resilience developed by MCEER. To illustrate the methodology, the evaluation of a seven-story reinforced concrete building with unreinforced masonry infill walls and designed in accordance with the Complementary Technical Norms – Seismic Design (2020) is presented. This structural system is typical of office buildings. The proposed methodology can be used to increase the seismic resilience of buildings, and to establish mitigation and recovery strategies not only for individual buildings, but also for groups of buildings.

Keywords: Structural resilience; repair and recovery time; repair costs

Artículo recibido el 28 de septiembre de 2021 y aprobado para su publicación el 06 de mayo de 2022. Se aceptarán comentarios y/o discusiones hasta cinco meses después de su publicación.

⁽¹⁾ Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, Circuito Interior, Ciudad Universitaria, Del. Coyoacán, Ciudad de México, C.P. 04510. jgutierrez@outlook.com, GAyalaM@ingen.unam.mx

INTRODUCCIÓN

La mayoría de los códigos de diseño sísmico utilizados en el mundo utilizan la filosofía de diseño basado en desempeño. Por ejemplo, en el documento VISION 2000 (SEAOC, 1995), se prescriben cuatro niveles de desempeño: (1) edificación completamente funcional ante sismos de ocurrencia frecuente (43 años de periodo de retorno), cuya intensidad se estima tiene un 50% de probabilidad de excederse en 30 años; (2) edificio en ocupación inmediata cuando ocurren sismos ocasionales (72 años de periodo de retorno) cuya intensidad sísmica tiene un 50% de probabilidad de excedencia en 50 años; (3) seguridad de vidas de los usuarios ante sismos de ocurrencia rara (475 años de periodo de retorno), con una probabilidad del 10% de excederse en una ventana de tiempo de 50 años, y (4) prevención al colapso ante sismos de ocurrencia muy rara (970 años de periodo de retorno), con una probabilidad de excedencia de 10% en 100 años. A este respecto, los reglamentos de diseño sísmico asocian los estados límite de desempeño mediante la prescripción de valores umbrales de variables físicas, por ejemplo, distorsiones de entrepiso, con el fin de que estas no sean excedidas y así garantizar un buen comportamiento estructural.

Uno de los aspectos clave para lograr que los edificios cumplan los niveles de desempeño prescritos es la ductilidad que se les proporciona a estos. En términos coloquiales la ductilidad representa la cantidad de daño a nivel global que se acepta las estructuras desarrollen con el fin de disipar la energía de deformación que les induce el movimiento del terreno causado por el evento sísmico. De acuerdo con los estados límite descritos anteriormente, cuando se presentan terremotos de ocurrencia frecuente u ocasional, lo que desea y lo más probable que ocurra es que los elementos estructurales permanezcan en el rango de comportamiento elástico lineal. Ante sismos raros o muy raros, lo más probable es que los elementos estructurales desarrollen comportamiento no lineal, y los elementos no estructurales (arquitectónicos) experimenten daños importantes debido a que estos componentes tienen poca capacidad de deformación. Los códigos de diseño basado en desempeño, como las NTC-DS (GCDMX, 2020), aceptan que ante el sismo de prevención al colapso las estructuras desarrollen niveles importantes de daño, sin que se presente el colapso estructural. Evidentemente, el daño que experimentan las construcciones se traduce directamente en cuantiosas pérdidas económicas, constituidas no solo por las que se originan debido a las reparaciones de las edificaciones, sino también las derivadas por la interrupción de negocios, así como el valor económico equivalente de las personas que resulten lesionadas, o incluso lleguen a perder la vida (Porter *et al.*, 2006).

Un ejemplo donde los edificios experimentaron el estado límite de prevención al colapso fue el sismo de febrero de 2011 de Christchurch, Nueva Zelanda. Este evento causó daños estructurales de importancia sobre una cantidad considerable de edificios localizados en el Distrito Central de Negocios (CBD, por sus siglas en inglés). Muchas de estas construcciones experimentaron deformaciones residuales importantes, y en muchas otras se determinó que su reparación era económicamente inviable, por lo que un porcentaje importante de los edificios afectado tuvieron que demolerse. Como consecuencia de estos hechos, el CBD estuvo acordonado aproximadamente 2 años, mientras que los trabajos de reconstrucción iniciaron tres años después de que ocurrió el evento sísmico, generando cuantiosas pérdidas financieras. Por tal motivo, muchas empresas tuvieron que ser reinstaladas en otro sitio, y muchas otras nunca regresaron a su lugar original de operación. El gremio de la ingeniería estructural de Nueva Zelanda llegó a la conclusión de que dichas edificaciones tuvieron un buen desempeño desde el punto de vista del código de diseño utilizado ya que, al no presentarse el colapso estructural, se cumplió con el nivel de desempeño de seguridad de vidas especificado en el reglamento con el que fueron diseñadas (Almufti y Willford, 2014). No obstante, desde el punto de vista de los usuarios, dueños y la sociedad en general, lo ocurrido no fue un acontecimiento de éxito ya que ellos no esperaban que sus edificaciones se dañaran por los efectos de un sismo debido a que estas habían sido diseñadas de acuerdo con un reglamento de diseño sismorresistente moderno.

Otro caso interesante se presentó en Chile durante el sismo de magnitud M_w 8.8 que ocurrió el 27 de febrero del año 2010 en la costa de la Región del Bío-Bío. Este evento causó una cantidad mínima de daño

en los componentes estructurales de los edificios afectados; sin embargo, este no fue el caso de los elementos no estructurales y los contenidos ya que estos fueron los componentes más afectados. A consecuencia de ello estas edificaciones quedaron fuera de servicio durante el tiempo que tomó la reparación y/o reemplazo de los elementos dañados (Miranda *et al.*, 2012).

Por otro lado, Toyoda (2008) evaluó las pérdidas financieras directas debidas a los costos de reparación de la infraestructura ocasionadas por el sismo de Kobe (Japón 1995) y determinó que éstas alcanzaron la cantidad de 63 billones de dólares, mientras que las asociadas a la interrupción de negocios, acumuladas durante un intervalo de 10 años, resultaron ser del orden del doble de las pérdidas directas.

Estos ejemplos, entre muchos otros, demuestran que es posible reducir la pérdida de vidas siguiendo los lineamientos que marcan los códigos de diseño sísmico actuales; no obstante, también demuestran, que, como intrínsecamente lo contemplan las normas de diseño sísmico, debe tenerse el conocimiento pleno de es muy probable que los componentes estructurales, los elementos arquitectónicos y los contenidos pueden experimentar daños importantes, y, como consecuencia de ello, no cumplirse la expectativa de los dueños y tomadores de decisiones, que es el de ser funcionales para una o varias causas en particular. Por lo tanto, es necesario desarrollar nuevas metodologías de diseño y evaluación sísmica de edificios. Para ello se debe ir más allá de los métodos de diseño y evaluación convencionales, en los que se analiza únicamente la capacidad resistente de los elementos estructurales, para pasar a metodologías innovadoras que involucren variables de decisión (DV's) propias de la resiliencia estructural, *e.g.*, pérdida y recuperación de la funcionalidad, tiempo de recuperación, costos de reparación esperados, número de víctimas, entre otros, que sean intuitivas y de fácil interpretación principalmente para los tomadores de decisiones, dueños, inversionistas y aseguradoras.

Aceptando que los eventos sísmicos ocurren en instantes, lugares y con magnitudes no predecibles, es conveniente evaluar las variables que definen a la resiliencia sísmica mediante un criterio probabilista. Por esta razón, en este artículo se propone una metodología probabilista para estimar funciones de vulnerabilidad del tiempo de reparación, tiempo de recuperación y costo de reparación de edificios tipo oficina, dejando a la pérdida de funcionalidad y pérdida de vidas humanas, para ser estudiadas en investigaciones futuras. La aproximación propuesta está basada en la Técnica de Revisión y Evaluación de proyectos (PERT). Asimismo, dentro de la formulación se toman en cuenta aspectos prácticos de la rehabilitación sísmica, *e.g.*, la asignación de tareas específicas a cuadrillas de trabajadores con el fin de optimizar tanto el tiempo de ejecución de los trabajos de reparación, así como sus respectivos costos. La metodología presentada es consistente con la definición conceptual de resiliencia estructural desarrollada por el Centro Multidisciplinario de Investigación de Ingeniería Sísmica (MCEER) y con la metodología de evaluación del Centro de Investigación de Ingeniería Sísmica del Pacífico (PEER).

ANTECEDENTES

Esquema de evaluación de la resiliencia estructural

Aunque el concepto resiliencia ha tomado gran relevancia en los últimos años, no fue sino en la década de 1960 cuando empezó a utilizarse en el área de la psicología para definir el nivel de capacidad que tiene una persona para adaptarse satisfactoriamente a situaciones adversas (Waller, 2001). En la década de los años 70 del siglo pasado, este concepto comenzó a experimentar modificaciones y a ser utilizado en otros campos del conocimiento, como en sociología, ingeniería ambiental y economía, por mencionar algunos. En ingeniería su interpretación se adaptó al estudio de sus propiedades elásticas de los materiales, concretamente para definir la capacidad de recuperar su forma original tras la aplicación de efectos externos. En la actualidad, en el sentido más general, el concepto de resiliencia se utiliza para describir la capacidad

de un sistema de absorber y reducir los cambios abruptos causados por un evento perturbador externo, y recuperar su nivel de funcionamiento original (o mejor) en el menor tiempo posible. En efecto, la palabra *resiliencia* significa literalmente *saltar hacia atrás*, y proviene del latín *resiliens* (Caverzan y Solomos, 2014).

En el campo de la ingeniería sísmica, Bruneau *et al.* (2003) fue el primer grupo de investigación que adaptó el concepto de resiliencia para reducir la vulnerabilidad de la infraestructura de las comunidades ante eventos sísmicos. Este grupo de investigación define a la resiliencia sísmica como la propiedad que determina la capacidad de una comunidad para minimizar los efectos negativos socioeconómicos causados por los sismos potencialmente destructivos y plantear estrategias de recuperación para mitigarlos en el menor tiempo posible. El objetivo principal de la resiliencia sísmica es minimizar la pérdida de vidas, el número de heridos, las pérdidas económicas y, en general, cualquier aspecto que afecte la calidad de vida de las comunidades causada por los efectos adversos de los terremotos. El esquema cualitativo que representa la pérdida y recuperación de la funcionalidad de una comunidad se ilustra en la fig. 1. En el eje de las ordenadas se indica el porcentaje de pérdida de funcionalidad, $LQ(t)$, mientras que en el de las abscisas se indica el tiempo que tarda la funcionalidad en recuperarse, $RQ(t)$.

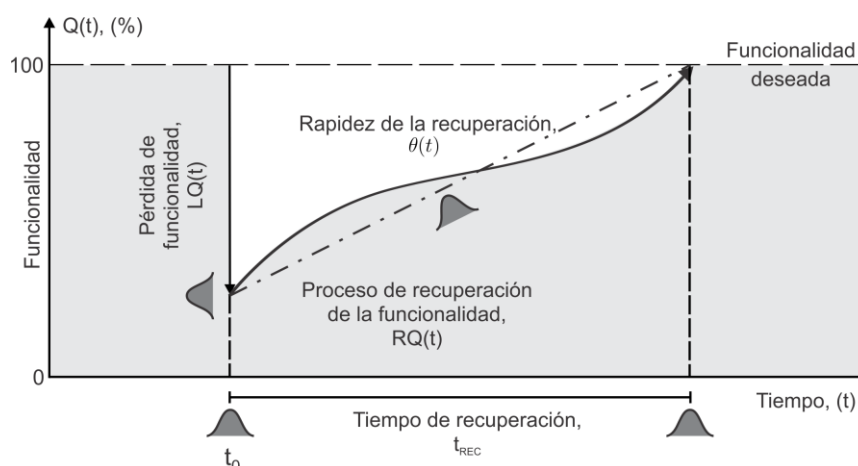


Figura 1. Esquema ilustrativo de la resiliencia estructural (Bruneau *et al.*, 2003)

El trabajo pionero desarrollado por Bruneau *et al.* (2003) ha sido un parteaguas en el campo de la ingeniería sísmica al dar una nueva interpretación a la filosofía del desempeño sísmico introduciendo conceptos relativos al funcionamiento de las sociedades modernas: aspectos técnicos *e.g.*, evaluación y diseño estructural, organizacionales, *e.g.*, permisos gubernamentales, aspectos sociales, *e.g.*, planeación y ejecución de actividades de mitigación, y económicos como los de obtención de recursos financieros, y combinarlos con conceptos como la robustez, la rapidez, la redundancia y el uso eficaz de los recursos. Asimismo, este esquema es de carácter cualitativo, por lo que no ofrece una metodología analítica que permita cuantificar los elementos que caracterización a la resiliencia sísmica de edificios.

Inspirados en las ideas propuestas por Bruneau *et al.* (2003), Cimellaro *et al.* (2006) desarrollaron el primer marco de evaluación analítico unificado para cuantificar la resiliencia sísmica de la infraestructura ya construida, o que está por construirse. Este grupo de investigación define la resiliencia sísmica mediante una función que indica la capacidad de mantener un nivel de funcionalidad de una instalación específica durante un período definido como tiempo de recuperación. Este último corresponde al período necesario para rehabilitar a la instalación dañada y proveerle los elementos necesarios para que su funcionamiento y confort sean igual o mejor que los ofrecidos antes de ser afectada por el evento perturbador. En estas

condiciones, Cimellaro *et al.* (2010) proponen como índice de resiliencia a el área bajo la curva de recuperación normalizada por el tiempo de recuperación, t_{REC} , como se indica en la siguiente ecuación:

$$R(t) = \int_0^{t_0+t_{REC}} \frac{Q(t)}{t_{REC}} dt \quad (1)$$

donde t_0 corresponde al instante en que se presenta el evento perturbador, t_{REC} indica el tiempo que toma la recuperación y $Q(t)$ representa la funcionalidad del sistema justo en el momento en que se presenta dicho evento, y queda definida mediante la siguiente expresión,

$$Q(t) = [1 - L(IM, t_{REC})] \cdot [H(t - (t_0 + t_{REC}))] \cdot f_{REC}(t, t_0, t_{REC}) \quad (2)$$

donde $L(IM, t_{REC})$ es la función de pérdidas originas por una medida de intensidad sísmica IM (e.g., aceleración espectral, aceleración máxima del terreno, etc.); $H(\cdot)$ es la función de Heaviside; $f_{REC}(\cdot)$ es una función que mide la probabilidad de alcanzar o exceder un estado límite no deseado, por ejemplo, el colapso estructural.

La función de pérdidas está expresada en términos de pérdidas económicas directas e indirectas. Las pérdidas directas son causadas por los costos de reparación/reemplazo de los elementos dañados y los contenidos y por el valor estadístico equivalente asociado a la cantidad de personas fallecidas y/o que resultaron lesionadas dentro de un edificio afectado por sismo. Las pérdidas indirectas corresponden a las pérdidas financieras derivadas de la interrupción de negocios y dependen en gran medida del tiempo de recuperación de funcionalidad. Las pérdidas totales se obtienen sumando el porcentaje de cada tipo de pérdida multiplicada por la probabilidad de exceder uno o más estados límite dada una intensidad sísmica.

Esquema de evaluación probabilista del desempeño sísmico

La herramienta más robusta para evaluar el desempeño estructural en términos probabilistas es el esquema desarrollado por el Centro de Investigación de Ingeniería Sísmica del Pacífico (Cornell y Krawinkler, 2000; Moehle y Deierlein, 2004; Günay y Mosalam, 2013; entre otros), mejor conocido como PEER, por sus siglas en inglés. Este esquema está integrado por cuatro análisis probabilistas (ver fig. 2): análisis de peligro sísmico, análisis estructural, análisis de daño y análisis de las consecuencias del daño en términos de DVs .

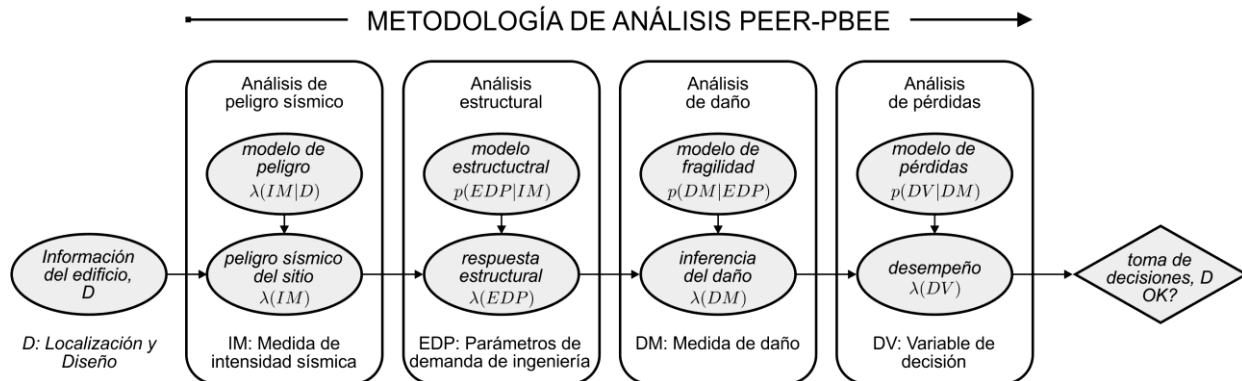


Figura 2. Esquema general de la metodología probabilista de evaluación del PEER (Cornell y Krawinkler, 2000; Moehle y Deierlein, 2004; Günay y Mosalam, 2013, entre otros)

Las incertidumbres correspondientes a cada etapa del análisis se combinan mediante el teorema de la probabilidad total, obteniéndose la tasa media anual de excedencia de la DV en estudio:

$$\lambda(DV > dv) = \int_{im} \int_{dm} \int_{edp} G(dv|dm) dG(dm|edp) dG(edp|im) |d\lambda(im)| \quad (3)$$

Esta metodología tiene como objetivo principal estimar las consecuencias socioeconómicas que producen los daños que experimentan las edificaciones ocasionadas por sismo. Cuando comenzó a desarrollarse esta aproximación, la DV que se utilizaba era el costo asociado a las reparaciones de los componentes estructurales (Cornell y Krawinkler, 2000; Yang *et al.*, 2009; entre otros). Conforme se fue enriqueciendo este esquema, diversos grupos de investigación identificaron nuevas variables de decisión, las cuales permitieron interpretar el desempeño sísmico de las edificaciones no solo desde el punto de vista estructural, sino también desde una perspectiva socioeconómica, *e.g.*, tiempo de reparación, número probable de víctimas mortales y emisiones de bióxido de carbono a la atmósfera debidas a la producción de los materiales utilizados para la reparación del sistema dañado (Porter, 2000; Comerio, 2006; Mitrani-Reiser, 2007; FEMA, 2012a).

El concepto de resiliencia sísmica tiene muchas vertientes y campos de aplicación. Las contribuciones más relevantes en el campo de la ingeniería estructural se centran específicamente en aspectos como la evaluación de la pérdida de funcionalidad, o la estimación del tiempo de recuperación. Por ejemplo, recientemente Burton *et al.* (2016) propusieron un esquema probabilista que incorpora estados límite de funcionalidad, los cuales están formulados de acuerdo con los resultados de la evaluación post-sísmica de edificios propuesta por el ATC-20 (1989). El aspecto innovador de esta metodología es que los estados límite de funcionalidad, además de prescribir la configuración de daño que caracteriza a cada uno de ellos, también están asociados con una serie de eventos que definen las etapas para recuperar la funcionalidad. Estos eventos toman en cuenta factores externos, como, por ejemplo, el tiempo que tardan los tomadores de decisiones en obtener financiamiento para pagar las reparaciones. Por otro lado, estos autores proponen una función de recuperación de tres escalones: *ocupable y funcional*, *ocupable y no funcional* y *no ocupable*. El resultado final de esta aproximación es la obtención de curvas recuperación de funcionalidad condicionadas a uno o varios niveles de peligro sísmico.

Mieler *et al.* (2016) desarrollaron un marco conceptual para estimar la probabilidad de pérdida de funcionalidad en edificios dado uno o varios niveles de peligro sísmico. Este esquema utiliza el análisis de árbol de fallas para estimar dichas probabilidades. Esta herramienta se caracteriza por tomar en cuenta el desempeño de *cada componente* que puede afectar la funcionalidad del edificio en caso de experimentar algún tipo de daño. En términos generales, la metodología está diseñada para evaluar objetivos de desempeño tomando en cuenta los elementos estructurales y no estructurales, y relacionarlos con niveles globales de resiliencia. Para llevar a la práctica esta metodología se requiere elaborar un algoritmo robusto del funcionamiento de los componentes estructurales y no estructurales, y prescribir su interdependencia, y para ello es necesario contar con un inventario detallado de los elementos que son indispensables para el funcionamiento de la instalación. La precisión de esta metodología depende del nivel de detalle con que se elabore el árbol de falla. No obstante, se ha observado que este tipo de aproximación es muy sensible y es posible que el modelo sub o sobre estime las probabilidades de falla (Porter y Ramer, 2012).

Ortiz y Reinoso (2020) propusieron un modelo para estimar el tiempo de interrupción de negocios, el cual es un factor que contribuye de forma importante a las pérdidas financieras indirectas. Estos autores identificaron que las fuentes que contribuyen a la pérdida de funcionalidad de las edificaciones son: (1) protocolos de seguridad (inspección post-sísmica), (2) suspensión temporal de servicios públicos (energía eléctrica, suministro de agua potable y gas, y de servicios de telecomunicación), (3) efectos de vecindario

(esto es, los que afectan a las edificaciones que no experimentaron daño a causa de otras que si lo hicieron, por ejemplo, demolición) y (4) el daño directo que experimentan las edificaciones. Un aspecto importante de este modelo es que fue calibrado con datos obtenidos de los daños que experimentaron varias construcciones en la CDMX, producto del sismo del 19 de septiembre de 2017 de Axochiapán, Morelos. Para cada uno de los cuatro procesos los autores presentan un diagrama de flujo detallado, en los que se toman en cuenta factores que intervinieron al retraso de la recuperación de la funcionalidad, por ejemplo, labores de rescate o la posibilidad de reubicar o un negocio a otro punto de la ciudad. Esto puede ser de gran ayuda para crear planes de mitigación post-sismo en eventos futuros o para realizar simulaciones numéricas de conjuntos de edificaciones y predecir posibles escenarios con el fin de mitigar consecuencias negativas.

Mitrani-Reiser *et al.* (2015) desarrollaron una metodología denominada *Inspector Virtual* y sirve para estimar la probabilidad de que un edificio reciba una de las tres etiquetas de inspección post-sismo (verde—edificio seguro, amarilla—edificio seguro, pero de uso restringido o roja—edificio inseguro) de acuerdo con el criterio ATC-20 (1989). Esta metodología puede ser utilizada de dos formas. La primera sirve para evaluar el nivel de seguridad estructural ante una probable demanda sísmica y determinar si se requiere realizar un reforzamiento estructural con el fin de incrementar su nivel de resiliencia. La segunda, y quizá más innovadora, es su implementación dentro de un esquema de evaluación automático en tiempo real y de toma de decisiones. Este sistema es alimentado por una red de sensores instalados en puntos clave de las edificaciones los cuales se activan cuando ocurre un evento que supera cierto umbral de demanda sísmica. Con esta información se realiza una evaluación probabilista del daño que experimentan los componentes estructurales y no estructurales, e incluso se estiman de forma inmediata los costos probables de los daños y tiempos de reparación.

El estándar de evaluación post-sísmica FEMA P-58-1 (FEMA, 2012a) adoptó el esquema de evaluación desarrollado por el PEER. Este esquema presenta varias inconsistencias respecto a la evaluación del tiempo de recuperación. La primera se debe a que no se toma en cuenta el tiempo de retraso del inicio de las reparaciones. Dicha etapa puede contribuir de forma importante al tiempo de recuperación de funcionalidad total, teniendo un impacto notable en las pérdidas financieras debidas a la interrupción de negocios. Respecto al tiempo de reparación, esta metodología permite aproximarlos asumiendo que los grupos de desempeño, *PG*, que integran al edificio pueden repararse en serie o en paralelo. La principal inconsistencia con estas dos aproximaciones es que el tiempo de reparación es calculado mediante funciones de fragilidad, las cuales fueron calibradas asumiendo que los trabajos de reparación son realizados por un único trabajador (Yoo, 2016). Entonces, cuando el tiempo de reparación se estima mediante un esquema de reparación en paralelo se tiene que disponer de un trabajador por elemento dañado por cada *PG*. Esta condición es difícil de cumplir cuando la cantidad de edificios dañados por un terremoto es relativamente elevada, y más aún si estos se encuentran dispersos dentro de una ciudad o comunidad. Por lo tanto, es poco probable que la comunidad afectada cuente con un número suficiente de trabajadores especializados para realizar los trabajos de rehabilitación bajo el esquema de reparación en paralelo. A este respecto, suponiendo que se cuente con la cantidad de trabajadores necesarios para reparar un porcentaje elevado de elementos dañados localizados en un mismo piso, es posible que esto cause problemas de aglomeración. Este esquema en lugar de propiciar que la rehabilitación se realice con mayor rapidez puede causar retrasos importantes. Por otro lado, respecto al esquema de reparación en serie, es posible concluir que se requiere únicamente de un trabajador para reparar todos los elementos dañados de cada *PG*. Naturalmente, este segundo esquema también es inconsistente porque es poco probable que un solo trabajador repare por su propia cuenta, por ejemplo, un conjunto de columnas dañadas.

En este artículo se propone una metodología para estimar los costos y tiempos de reparación, así como el tiempo de recuperación de funcionalidad y cantidad de trabajadores necesarios para efectuar los trabajos de reparación de un edificio dañado por los efectos de sismos potencialmente destructivos. La aproximación propuesta está basada en el método PERT, el cual es un proceso recursivo, *i.e.*, el problema inicial, se divide

en problemas más pequeños y sencillos de resolver. Dentro de este esquema de evaluación se introducen condiciones claves que se presentan en el proceso real de la reparación de edificios dañados, por ejemplo, una cantidad específica de cuadrillas y trabajadores para reparar un determinado número de elementos que experimentaron un estado de daño específico.

EVALUACIÓN DEL COSTO DE REPARACIÓN Y TIEMPO DE RECUPERACIÓN

El tiempo de recuperación de una instalación que ha sido dañada por un sismo puede discretizarse en dos intervalos de tiempo denominados racionales e irracionales (Comerio, 2006). El primero de ellos está asociado al tiempo que se consume en las reparaciones estructurales y no estructurales, mientras que en el segundo se encuentran involucrados eventos como la inspección pos-sísmica, revisión y/o rediseño estructural, planeación de las reparaciones, obtención del finamiento para llevarlas a cabo y permisos gubernamentales para poder intervenir al edificio. El número de factores irracionales a tomar en cuenta y el orden en que se presentan en el tiempo depende de la cantidad y severidad del daño experimentado por los diversos componentes mencionados anteriormente. Por ejemplo, si un edificio desarrolla daño ligero en pocos elementos de un grupo de desempeño lo más probable es que únicamente se tenga que realizar una inspección rápida del edificio (ATC, 1989), y que las reparaciones necesarias sean menores. En cambio, si el edificio en cuestión experimentara daño severo (y es factible su reparación desde el punto de vista técnico y económico), lo más probable es que sea necesario realizar una inspección detallada para determinar el tipo de reparaciones y, por otro lado, también se tenga que realizar un rediseño estructural. Asimismo, el dueño de la instalación tendría que gestionar financiamiento económico. También existe la posibilidad de que sea necesario abrir un proceso de licitación para determinar quién o quiénes realizarán los trabajos de reconstrucción. Para comenzar las reparaciones y optimizar el tiempo en que estas se ejecuten tendría que crearse un plan de trabajo considerando los recursos económicos y humanos disponibles. Este último factor no puede determinarse arbitrariamente porque la cantidad de personal capacitado para realizar este tipo de labores suele ser reducido, y debido a la cantidad de edificios dañados dentro de una comunidad es posible que la demanda de trabajadores de la construcción aumente, retrasando la recuperación no solo de un edificio, sino de un grupo de edificios.

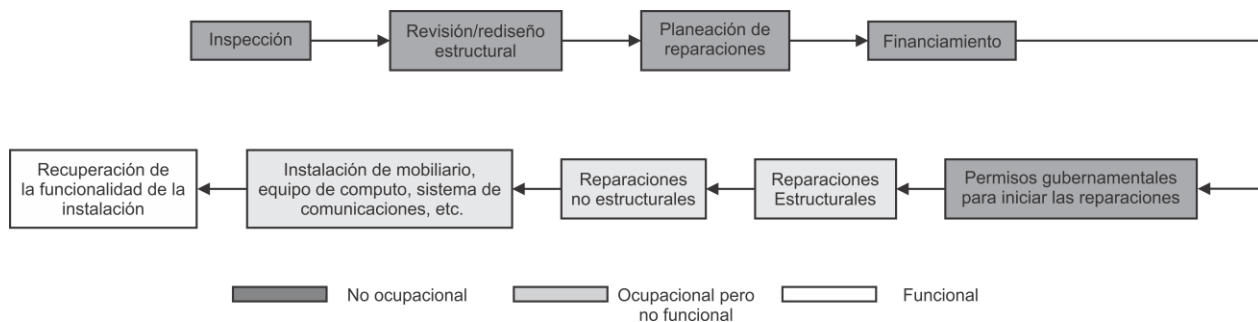


Figura 3. Secuencia genérica de los factores que influyen en el tiempo de recuperación de la funcionalidad de un edificio dañado.

Aunque los factores racionales e irracionales involucran grandes incertidumbres, ha sido relativamente más sencillo proponer criterios para evaluar numéricamente los primeros. Esto debido a que la planeación de los trabajos de reparación está controlada por ingenieros, mientras que los factores que interrumpen el inicio de las reparaciones no. En la fig. 3 se ilustra el diagrama de flujo genérico propuesto en este trabajo de investigación para evaluar la recuperación. Este esquema contiene la secuencia hipotética en que se presentan los factores que intervienen en la recuperación de un edificio dañado. Determinar con certeza el número de estos factores y el orden cronológico en que se presentan resulta una tarea compleja

ya que en este proceso se encuentran involucradas variables con un alto grado de incertidumbre y factores que no pueden tomarse en cuenta a priori por la misma naturaleza del problema (Gutiérrez *et al.*, 2019).

Definición de los grupos de desempeño

Para estimar el tiempo de recuperación se requiere definir previamente un inventario de los elementos estructurales, no estructurales y contenidos que pueden ser susceptibles a experimentar daño ante una demanda sísmica (en este trabajo se consideran únicamente los dos primeros). Para definir los *PGs* se recomienda recurrir a planos arquitectónicos y/o planos constructivos. Asimismo, la localización de dichos componentes dentro del edificio es un aspecto importante para tomar en cuenta ya que el daño que estos desarrollan puede afectar de forma directa el desempeño de otros componentes vitales para el funcionamiento de la edificación. Un ejemplo de ello puede ser la caída de plafones en entradas y/o salidas de emergencia o la falla de los elevadores.

Estados de daño discreto

Para estimar el tiempo de reparación de los distintos grupos de desempeño se debe inferir el daño que estos desarrollan dada una demanda sísmica. Existen dos criterios prácticos para inferirlo. El primero de ellos es mediante el uso de funciones de la distribución de probabilidad que representan el daño en términos discretos, *DSs*: daño ligero, *DS1*, daño moderado, *DS2*, o daño severo, *DS3* o peor. El daño se infiere a partir de variables físicas tales como distorsiones de entrepiso, aceleraciones y velocidades de piso, y rotaciones de la sección transversal de los elementos, y se les ha denominado parámetros ingenieriles de demanda, *EDP* (Engineering Demand Parameters, por sus siglas en inglés). El segundo criterio es similar al primero, solo que éste es de naturaleza determinista. Bajo este criterio el daño se infiere a partir de variables físicas locales, *e.g.*, rotaciones de la sección trasversal de un elemento específico, y a estas se les compara con valores umbrales de rotación plástica correspondientes a distintos niveles de desempeño (ASCE, 2013).

La metodología propuesta en este artículo utiliza funciones de fragilidad para inferir el daño. A este respecto, el Consejo de Tecnología Aplicada, la Agencia Federal de Gestión de Emergencias de los Estados Unidos de Norteamérica y el Centro de Investigación de Ingeniería Sísmica del Pacífico (ATC, FEMA y PEER por sus siglas en inglés, respectivamente) han desarrollado diversos programas experimentales y analíticos de los que se han obtenido aproximadamente 700 funciones de fragilidad representativas de una amplia variedad de grupos de desempeño, así como su respectiva distribución de probabilidad de costo y tiempo de reparación. Estas funciones de fragilidad se encuentran publicadas en el documento FEMA P-58-3 (FEMA, 2012b). Estas distribuciones de probabilidad, además, toman en cuenta el tiempo correspondiente a la limpieza de escombros, al de las reparaciones y al de acarreo de materiales. Cabe destacar que estas funciones fueron calibradas considerando que las actividades de reparación son realizadas por un único trabajador.

Inferencia del daño

Para estimar el estado de daño específico de cada elemento en función de su respectivo *EDP* se debe considerar la secuencia en la que se desarrollan los estados de daño, *i.e.*, si se presentan en forma secuencial, en forma simultánea o si son mutuamente excluyentes entre ellos mismos. En el *DS* secuencial el elemento en estudio debe experimentar primero el *DS1*, después el *DS2* y así sucesivamente. En el *DS* simultáneo el elemento puede experimentar más de un estado de daño al mismo tiempo, sin importar el orden. Por otro lado, en el *DS* mutuamente excluyente el elemento puede estar en un y solo un estado de daño, sin importar el orden (Porter, 2000; Aslani y Miranda, 2005). Para estimar la probabilidad de que se presente cada *DS* se

utilizarán las ecs. 4 a 6. Cabe mencionar que se asume como hipótesis que existe independencia estadística entre el estado de daño de cada uno de los componentes.

Estado de daño secuencial

$$Pr(DS|EDP) = \begin{cases} 1 - Pr(DS \leq ds_i|EDP = edp) & \text{si } i = 0 \\ Pr(DS \leq ds_{i+1}|EDP = edp) - Pr(DS \leq ds_i|EDP = edp) & \text{si } i \leq i < n_{ds} \\ Pr(DS \leq ds_i|EDP = edp) & \text{si } i = n_{ds} \end{cases} \quad (4)$$

Estado de daño simultáneo

$$Pr(DS|EDP) = \begin{cases} 1 - Pr(DS \leq ds_{i+1}|EDP = edp) & \text{si } i = 0 \\ Pr(DS \leq ds_{i+1}|EDP = edp) \cdot Pr(DS = ds_i|DS \geq edp) & \text{si } i \leq i < n_{ds} \end{cases} \quad (5)$$

Estado de daño mutuamente excluyente

$$Pr(DS|EDP) = \begin{cases} 1 - Pr(DS \leq ds_i|EDP = edp) & \text{si } i = 0 \\ Pr(DS \leq ds_i|EDP = edp) \cdot Pr(DS = ds_{i+1}|DS \geq edp) & \text{si } ds_i \in \{1, 2, \dots, n_{ds}\} \end{cases} \quad (6)$$

Finalmente, mediante el teorema de la probabilidad total se obtiene la probabilidad del estado de daño, \overline{DS}_{kl} , para el componente k -ésimo correspondiente al grupo de desempeño l -ésimo:

$$Pr(\overline{DS}_{kl} = ds_i|NC, IM) = \int_{edp_i} Pr(DS = ds_i|EDP = edp_i) pr(edp_i|NC, IM) dedp_i \quad (7)$$

donde $Pr(DS = ds_i|EDP = edp_i)$ es la probabilidad del estado de daño obtenida con las ec. 4, 5 o 6, según sea la secuencia del daño que desarrolla el grupo de desempeño l -ésimo; $pr(edp_i|NC, IM)$ es la función de densidad de probabilidad del parámetro ingenieril de demanda, dado que la estructura no colapsa (NC) en una intensidad sísmica específica, IM . El estado de daño del componente k -ésimo perteneciente al grupo de desempeño l -ésimo para n_{ds} estados de daño se obtiene mediante la siguiente expresión:

$$[\overline{DS}_{kl} = ds_i|NC, EDP, IM] = \sum_{i=0}^{n_{ds}} DS_i \cdot Pr(\overline{DS}_{kl} = ds_i|NC, IM) \quad (8)$$

Para estimar el tiempo de reparación por componente, definido dentro de cada grupo de desempeño, es necesario establecer una relación numérica entre el estado de daño discreto que puede experimentar y sus respectivas actividades de reparación. Para ello, supóngase que existe una función de distribución de probabilidad $F_{TREP}(TREP \leq t_{rep}|NC, \overline{DS}, EDP)$ mediante la cual es posible estimar la probabilidad de que el tiempo de reparación $[t_{REP} \leq t_{rep}]$ dado un EDP y un DS corresponde al valor $[\overline{DS}_{kl} = ds_i|NC, EDP, IM]$. Mediante el método de transformación inversa es posible determinar el tiempo de reparación del componente k -ésimo, t_{REP} , como una variable aleatoria:

$$t_{REP} = F_{TREP}^{-1}(U|\theta) \quad (9)$$

donde U es una variable aleatoria distribuida uniformemente que toma valores entre 0 y 1, y θ es un vector que contiene los parámetros de la distribución de probabilidad. El tiempo de reparación asociado al número de unidades u_k correspondientes al elemento k -ésimo, condicionado al daño que lo origina, se estima de la siguiente forma:

$$\hat{t}_{REP} = t_{REP} \cdot Pr(\overline{DS}_{kl} = ds_i | NC, IM) \cdot u_k \quad (10)$$

Estimación del tiempo de reparación bajo un esquema de reparación mediante el método PERT

En una situación real los trabajos de construcción y/o reparación son realizados por cuadrillas de trabajo organizadas sistemáticamente con el fin de optimizar el tiempo de ejecución de las actividades involucradas. Optimizar este tipo de tareas depende de los recursos humanos y económicos disponibles y, como es de esperarse, se trata de un problema que involucra grandes incertidumbres. Las actividades asociadas a la reparación de edificios dañados por sismo se vuelven más complejas por la misma naturaleza del problema. Asimismo, debido a que este tipo de situaciones no se presenta cotidianamente, la cantidad de profesionales especializados en la rehabilitación sísmica es relativamente pequeña, tanto en el área de la evaluación y diseño estructural como de la ejecución de las actividades de reparación. Más aún, es posible que varios edificios dañados tengan que ser reparados por una misma empresa, lo que tiene como consecuencia que el tiempo de recuperación se prolongue por meses o incluso por años.

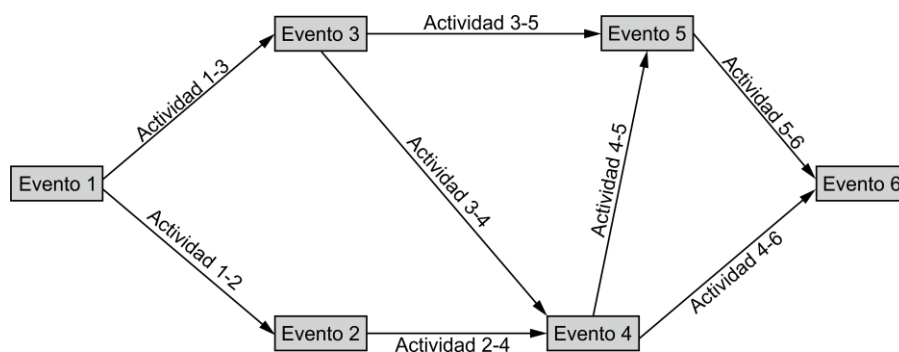


Figura 4. Esquema ilustrativo de un diagrama PERT (Richmond, 1968)

Con el fin de calcular el tiempo de reparación de un edificio dañado por sismos futuros se utilizará la Técnica de Revisión y Evaluación de Proyectos (PERT). El método PERT es comúnmente representado mediante un diagrama de flujo que describe gráficamente la secuencia de actividades del proyecto. En primera instancia, el proyecto debe ser dividido en tareas específicas, denominadas eventos, cuya secuencia lógica queda terminada por actividades preestablecidas. Cabe destacar que un proyecto puede estar compuesto de pocos o hasta cientos de eventos y actividades. En la fig. 4 se ilustra de forma esquemática un diagrama de flujo basado en el método PERT. Cada nodo del diagrama (representado con un rectángulo) representa un evento. Este a su vez, representa un intervalo de tiempo y generalmente es descrito como el inicio o finalización de alguna actividad. Las líneas que unen a los eventos representan actividades, *i.e.*, las tareas que deben ser realizadas con el fin de que los eventos sucesores se ejecuten. Entonces, una actividad representa un periodo de tiempo dentro del diagrama de flujo. En este proceso se encuentran implícitamente involucrados los recursos humanos y económicos destinados a cada actividad. Asimismo, cada evento es numerado de tal forma que las flechas siempre indican el evento precedente y el o los sucesores. Esta relación conlleva a que el orden de ejecución de las actividades sea inviolable; es decir, todas las actividades precedentes comunes a un evento deben de ser completadas antes de que el evento en cuestión tome lugar, y ninguna actividad puede iniciar hasta que los eventos predecesores se hayan ejecutado.

Condiciones para generar el diagrama PERT

Anteriormente se describió la forma en que se estima el tiempo de reparación de cada elemento dañado dentro de cada grupo de desempeño. Para optimizar el t_{REP} de cada PG se recurrirá al método PERT, descrito en la sección anterior. Para construir las actividades y eventos se utilizan las siguientes reglas:

1. Proponer un número realista de cuadrillas, y una cantidad de trabajadores n_w dentro de cada una de ellas, para realizar los trabajos de reparación del estado de daño discreto que experimentó cada grupo de desempeño.

2. Asignar a cada cuadrilla la misma proporción de elementos (de forma aproximada) que desarrollaron un mismo estado de daño, n_{DS_k} .

3. Para definir las actividades considérese el siguiente evento: la cuadrilla c_k reparará la cantidad de elementos del conjunto $\mathbf{e} = \{e_1, e_2, \dots, e_n\}$, de los cuales un subconjunto se localiza en la planta r y el resto de los elementos, m , en la planta q , donde $r < q$. Entonces, las actividades que debe realizar la cuadrilla c_k serán \mathbf{A}_i^r y \mathbf{A}_{i+1}^q (el subíndice indica el número de actividad y el superíndice el número de la planta del edificio). Estas actividades deben ser realizadas de forma secuencial por su cuadrilla correspondiente ya que la primera actividad contiene los primeros x elementos a reparar y la segunda los siguientes y elementos, asociados a las plantas q y r , respectivamente. Teniendo esto en mente, las actividades que debe realizar la cuadrilla c_k pueden definirse mediante la siguiente expresión:

$$\mathbf{A}_i^j(PG_l, \overline{DS}_{kl}, \mathbf{e}_i, n_w | NC, IM) \rightarrow c_k \quad (11)$$

4. Para todos los grupos de desempeño las reparaciones se iniciarán con las actividades cuyos elementos pertenezcan al estado de daño de mayor severidad. Una vez finalizadas esas actividades se prosigue a realizar las actividades cuyos elementos correspondan a un estado de daño de menor severidad, y así sucesivamente.

5. Es posible programar actividades en paralelo, realizadas por dos o más cuadrillas distintas, siempre y cuando dichas actividades estén definidas por reparaciones de elementos en el mismo estado de daño y correspondan al mismo grupo de desempeño.

6. Asimismo, se considera que no hay pérdida de tiempo entre el inicio de la reparación de un elemento y la finalización de la reparación del elemento anterior. En general, el tiempo de ejecución de la actividad \mathbf{A}_i^j dado que la estructura no colapsa ante una intensidad sísmica y a que los elementos en un estado de daño particular, pertenecientes a un grupo de desempeño específico son reparados por un conjunto de trabajadores pertenecientes a la cuadrilla determinada, se obtiene mediante la siguiente expresión:

$$\tilde{t}_{REP, c_k} = \frac{1}{nw_{c_k}} \sum_{\forall \mathbf{A}_i^j \in c_k} \hat{t}_{REP}(\mathbf{A}_i^j | NC, IM, c_k) \quad (12)$$

donde el tiempo de reparación \tilde{t}_{REP, c_k} se calcula como la sumatoria del tiempo de reparación de cada elemento que experimentó el mismo DS , asociado al mismo PG , y normalizado por el número de trabajadores pertenecientes a la cuadrilla c_k . El tiempo de inicio de algunas de las actividades depende de la finalización de una o más actividades predecesoras; en este caso el tiempo de inicio de dicha actividad corresponde al tiempo de reparación máximo de las actividades predecesoras:

$$TI = \max(T_{A_1^j, pred}, T_{A_2^j, pred}, \dots, T_{A_n^j, pred}) \quad (13)$$

7. El tiempo de finalización, $TF_{A_i^j}$, de la actividad A_i^j se calcula como la suma del tiempo inicial, TI , más el tiempo de reparación, \tilde{t}_{REP, c_k} . El tiempo de reparación máximo de todo el proyecto se obtiene mediante la siguiente expresión:

$$t_{REP_{max}} = \max(TF_{A_1^j}, TF_{A_2^j}, \dots, TF_{A_n^j} | NC, IM) \quad (14)$$

8. El costo de reparación de una actividad se calcula con la siguiente ecuación:

$$\tilde{C}_{REP, c_k} = \sum_{\forall A_i^j \in c_k} \tilde{C}_{REP}(A_i^j | NC, IM, c_k) \cdot [1 + n_w(c_k) \cdot \alpha] \quad (15)$$

donde α es un factor que toma en cuenta un porcentaje del costo de mano de obra asignado a la cuadrilla c_k . El costo total de reparación del edificio es calculado como la sumatoria de los costos de reparación de cada PG dañado,

$$C_{REP} = \beta_1 \cdot \beta_2 \cdot \varphi \cdot \sum_{\forall A_i^j} \tilde{C}_{REP, c_k}(A_i^j | NC, IM) \quad (16)$$

donde $\varphi = (1 + \gamma)/(1 + \delta)$ es un factor que toma en cuenta la depreciación γ y la tasa anual de descuento δ , aplicada a un intervalo de tiempo de t años, *e.g.*, ciclo de vida; β_1 toma en cuenta los precios locales y el aumento del precio de los materiales y β_2 el aumento del costo de la mano de obra tras un terremoto potencialmente destructivo.

Mediante el procedimiento descrito anteriormente también es posible estimar los recursos humanos necesarios para llevar a cabo las actividades de reparación. En este sentido, el espacio disponible para efectuar los trabajos es limitado, por lo que el número de trabajadores que se pueden localizar en una misma área provoca que las reparaciones sean más lentas, y por lo tanto el tiempo de recuperación se prolongue. El método recursivo propuesto limita el número de trabajadores de forma natural porque la cantidad de cuadrillas y trabajadores se prescribe con base en la experiencia adquirida por ingenieros que han reparado edificios dañados por terremotos (Yoo, 2016). Además, el número de trabajadores utilizado en la metodología propuesta en este trabajo está dentro del límite prescrito por el REDiTM (Almufti y Willford, 2013) durante todo el proceso de recuperación. Por el contrario, el esquema de reparación en paralelo del FEMA P-58-1 (FEMA, 2012a) no prescribe un límite para restringir el número máximo de trabajadores que pueden estar en el mismo piso y en el mismo periodo de tiempo. La consecuencia de esto es que el número estimado de trabajadores puede ser muy alto, lo que produciría una congestión de trabajadores en una o varias zonas del edificio.

Factores que impiden el inicio de las reparaciones

Comerio (2006) identificó los factores irracionales más relevantes que deben considerarse después de un evento sísmico: (1) inspección post-sísmica, (2) revisión estructural y posible rediseño y reforzamiento estructural, (3) gestión de financiamiento para costear las reparaciones, (4) proceso de licitación y (5) gestión de permisos gubernamentales para realizar las reparaciones. La firma de ingeniería Arup a través del documento REDiTM Rating System (Almufti y Wilford, 2013) desarrolló, debido a la complejidad del

problema, varios modelos probabilistas sencillos para tomar en cuenta su contribución al tiempo de recuperación en función de las características físicas del edificio, *e.g.*, número de pisos e importancia de la construcción. Es importante destacar que dichos factores fueron calibrados utilizando datos correspondientes a terremotos ocurridos en Estados Unidos de América, por lo que tanto los parámetros que caracterizan a sus respectivas distribuciones de probabilidad, así como la cantidad y tipo de eventos, pueden ser distintos de una ciudad a otra. Sin embargo, debido a que en México se carece de este tipo de información (o si la hay, no se encuentra disponible de forma pública), en este artículo se utilizan los factores propuestos por el REDiTM (Almufti y Wilford, 2013). La estimación numérica de estos factores se realiza mediante un muestreo aleatorio utilizando el método de transformación inversa, el cual ya ha sido descrito anteriormente.

Tabla 1. Distribución de probabilidad de los factores que impiden el inicio de las reparaciones del REDiTM, (Almufti y Wilford, 2014)

Factor de impedimento	Clase de reparación	μ	σ
Inspección pos-sismo	-	1 día	0.54
	-	1 día	0.54
Revisión y/ reforzamiento estructural	C1	2 semanas	0.32
	C3	4 semanas	0.54
Financiamiento	C1	1 semana	0.54
	C3	6 semanas	1.11
Planeación de actividades de reparación	C1	3 semanas	0.66
	C3	7 semanas	0.35
Permisos gubernamentales para iniciar la reconstrucción	C1	1 semana	0.86
	C3	8 semanas	0.32

Nota: Todos los factores que impiden el inicio de las reparaciones siguen una distribución lognormal.

En la tabla 1 se presentan los parámetros que definen la distribución de probabilidad de los factores que impiden el inicio de las reparaciones. Como se puede observar estos factores tienen un alto grado de incertidumbre, el cual es reflejado en las dispersiones de cada variable. El parámetro C_i indica la clase de reparación y permite definir el tipo de reparación en función de la severidad del daño que experimentó el edificio. Este parámetro se determina a partir del daño promedio de los grupos de desempeño correspondientes a los componentes estructurales y no estructurales. El parámetro C_i está asociado a tres estados globales de daño discreto:

- Clase de reparación C1: Los elementos estructurales y no estructurales experimentan daño ligero mínimo en los acabados, por lo que únicamente se requieren reparaciones cosméticas. Esto no impide la reocupación del edificio después del evento sísmico, por lo que puede asumirse que no se interrumpe el funcionamiento de la instalación durante las reparaciones.
- Clase de reparación C2: Los componentes no estructurales desarrollan daño severo; sin embargo, no se pone en riesgo la seguridad de vidas. La instalación puede ser reocupada hasta después de realizarse las reparaciones correspondientes.
- Clase de reparación C3: Se presenta daño severo en una cantidad importante de elementos estructurales y no estructurales, lo cual pone en riesgo la seguridad de la vida de los ocupantes. El daño debe ser reparado para que el edificio sea nuevamente ocupable y funcional.

Por último, el tiempo de recuperación del edificio dañado por una realización sísmica aleatoria condicionada a un nivel de peligro sísmico y una clase de reparación se aproxima mediante la suma del tiempo de retraso y el tiempo de reparación,

$$t_{REC} = (t_{RET} + t_{REP}|NC, IM, C) \quad (17)$$

EJEMPLO

En esta sección se presenta la evaluación del costo y tiempo de reparación probables de un edificio de concreto reforzado en el que se incluyen los muros de mampostería no reforzada. El edificio está conformado por siete pisos y tres crujeías en cada dirección ortogonal. La altura de cada entrepiso es de 4 m , la distancia horizontal entre columnas es de 6.5 m . Para fines ilustrativos se ha considerado que el edificio está destinado para uso de oficinas y está conformado por siete grupos de desempeño: (1) columnas, (2) conexiones columna-trabe, (3) muros de mampostería no reforzada en los marcos de la periferia a lo largo de toda su altura, (4) muros divisorios de tablaroca, colocados del segundo al último nivel, (5) ventanas exteriores, colocadas en toda la fachada del edificio, (6) sistema de plafones y (7) sistema contra incendio (aspersores). En la fig. 5 se ilustra la localización espacial de cada uno de los componentes de los grupos de desempeño. En la tabla A1 del apéndice A se presenta la descripción genérica del daño discreto que cada *PG* puede desarrollar, así como las actividades que se deben efectuar para su reparación. En las tablas A2 y A3 se indican los parámetros de las distribuciones de probabilidad de los estados de daño de cada *PG* y tiempo de reparación unitarios, respectivamente. En la tabla 1 se indica la distribución de probabilidad de los factores irracionales.

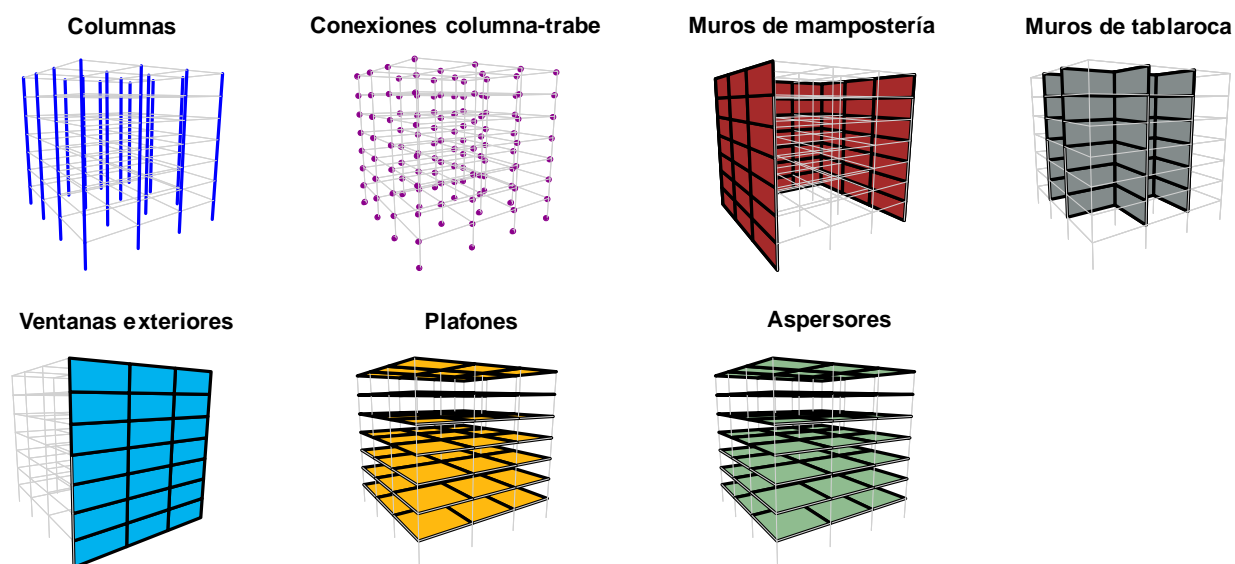


Figura 5. Grupos de desempeño que integran al edificio.

El diseño sísmico del edificio se realizó de acuerdo con lo estipulado en las Normas Técnicas Complementarias-Diseño por Sismo (GCM DX, 2020). Se utilizó una distorsión límite de 0.002 para limitar los daños en elementos estructurales y no estructurales ante la demanda sísmica asociada a los 20 años de periodo de retorno (sismo de servicio), mientras que para la demanda sísmica asociada a la prevención al colapso (250 años de periodo de retorno) se utilizó una distorsión de entrepiso de 0.015. Se consideró una carga muerta sobre cada losa de $w_d = 5,400\text{ Pa}$. Asimismo, se tomó una carga viva máxima $w_m = 2,450\text{ Pa}$ y una carga viva instantánea $w_{rl} = 1,765\text{ Pa}$. Para tomar en cuenta la rigidez efectiva de las columnas y trabes (ante la demanda sísmica de prevención al colapso) se multiplicó su rigidez elástica por los factores de 0.5 y 0.7, respectivamente (GCDMX, 2017a). Las cargas básicas y combinaciones de diseño se obtuvieron del documento NTC-CADEE (GCDMX, 2017b). La resistencia del concreto se consideró igual a $f'_c = 25\text{ MPa}$, con un módulo de elasticidad $E_c = 23,500\text{ Mpa}$. La resistencia a tensión del acero de refuerzo longitudinal se tomó igual a $f_y = 410\text{ MPa}$, mientras que la del acero de refuerzo transversal utilizada fue de $f_{ys} = 350\text{ MPa}$. El módulo de elasticidad que caracteriza tanto al acero de refuerzo

longitudinal como transversal fue de $E_s = 206,000 \text{ MPa}$. Se consideró que la resistencia a compresión de la mampostería es $f_m = 9 \text{ MPa}$, con un módulo de elasticidad $E_m = 4,850 \text{ MPa}$. Se asumió que el edificio se encuentra desplantado en la estación SCT de la CDMX. De acuerdo con la estructuración del edificio, su altura y el material de los elementos estructurales, se determinó que éste posee un factor de comportamiento sísmico de $Q = 2$. En el diseño del edificio se consideró, además, la condición de que los marcos de concreto reforzado deben de absorber al menos el 70% del cortante de entrepiso sin tomar en cuenta la resistencia de los muros para poder utilizar el factor de comportamiento sísmico de los marcos de concreto reforzado, en lugar del correspondiente para estructuras de mampostería. A este respecto, el tipo de muro utilizado en este ejemplo no es permitido por las NTC-DS (GCDMX, 2020), no obstante, para fines ilustrativos de la metodología propuesta se decidió considerarlos. Finalmente, el diseño resultante del edificio es el siguiente. Todas las columnas tienen dimensiones de $100 \times 100 \text{ cm}$, un refuerzo longitudinal de 24 varillas del Núm. 10 ($\phi = 32 \text{ mm}$) y estribos del Núm. 6 ($\phi = 20 \text{ mm}$) a cada 10 cm en toda la longitud del elemento. Las trabes tienen dimensiones $90 \times 70 \text{ cm}$, un refuerzo longitudinal de 18 varillas del Núm. 10 ($\phi = 32 \text{ mm}$) y estribos del Núm. 6 ($\phi = 20 \text{ mm}$) a cada 10 cm en toda la longitud del elemento. El espesor de cada una de las losas es de 20 cm . Con el diseño estructural propuesto el periodo fundamental del edificio es de 0.61 s .

La evaluación de los costos y tiempos de reparación, así como del tiempo de recuperación del edificio se realizó considerando siete niveles de peligro sísmico, con periodos de retorno de 20, 125, 250, 500, 1000, 1500 y 2500 años, respectivamente. Para representar la demanda sísmica se simuló conjuntos de 20 pares de acelerogramas para cada periodo de retorno mediante el modelo de Kohrs-Sansorny *et al.* (2005). La función empírica de Green utilizada fue el registro del sismo del 25 de abril de 1989 de magnitud M_w 6.9. Se usó el valor de 2.50×10^{26} para el momento sísmico, M_o , y el valor de 150 bares para la caída de esfuerzos, $\Delta\sigma$, de acuerdo con lo reportado en Ordaz *et al.* (1995). La medida de intensidad sísmica utilizada fue la aceleración espectral, $Sa(T_1)$. Las aceleraciones espectrales objetivo para cada nivel de peligro sísmico fueron de 0.15, 0.22, 0.29, 0.36, 0.47, 0.54 y 0.63g, donde g es la aceleración de la gravedad. Los periodos de retorno de 20 y 250 años fueron seleccionados de acuerdo con las Normas Técnicas Complementarias-Diseño por Sismo (GCDMX, 2020); ello con el fin de que los resultados de las DVs estudiadas ofrezcan información relacionada con los estados límite de limitación de daños y prevención al colapso.

El análisis dinámico no lineal se realizó en el programa de código abierto OpenSees (Mazzoni *et al.*, 2007). Las trabes y columnas se modelaron usando elementos barra con cinco puntos de integración. Su comportamiento inelástico se simuló utilizando fibras. El comportamiento del concreto se representó con el modelo constitutivo desarrollado por Chang y Mander (1994), y el del acero de refuerzo longitudinal con el propuesto por Giuffrè y Pinto (1970). Con el fin de tomar en cuenta la contribución de la rigidez lateral de los muros de mampostería se utilizó la metodología elaborada por Kadysiewski y Mosalam (2009). Los parámetros del modelo constitutivo de la mampostería se calcularon de acuerdo con lo recomendado en el FEMA (2000).

Respecto al esquema de reparación basado en el método PERT, se utiliza el siguiente número de cuadrillas y cantidad de trabajadores, según la cantidad de elementos dañados y el nivel de severidad de daño para cada grupo de desempeño considerado. Para el estado de daño DS1: si $1 < n_{DS1} \leq 10$ elementos, entonces se emplea una cuadrilla; si $n_{DS1} > 10$ elementos, entonces se consideran dos cuadrillas. Para el estado de daño DS2 o mayor: si $1 < n_{DS2} \leq 10$ componentes, entonces se recurre a dos cuadrillas; si $n_{DS2} > 10$ elementos, entonces se usan 3 cuadrillas. En estas condiciones n_{DSi} indica la cantidad de elementos en un estado de daño específico. Asimismo, se considerarán dos trabajadores para reparar elementos en estado de daño DS1 y tres para estado de daño mayor o igual a DS2.

Análisis de los resultados

En la fig. 6 se ilustra el daño promedio que experimentan los elementos de cada *PG* que conforman al edificio de estudio. Para simplificar el análisis de los resultados en esta figura se indica únicamente el nivel de daño que producen los niveles de peligro sísmico asociados a los 20, 250 y 2500 años de periodo de retorno ($Sa(T_1)=0.15, 0.29$ y $0.63g$, respectivamente). En las tablas 2 a 4 se presenta un resumen de la media y su coeficiente de variación del (a) costo de reparación, (b) tiempo de reparación, (c) tiempo de recuperación y (d) número de trabajadores, calculados con el esquema recursivo propuesto y con el criterio del FEMA P-58-1 (FEMA, 2012a), para cada uno de los niveles de peligro sísmico considerados en este ejemplo. En la fig. 7 se presentan las funciones de vulnerabilidad, $f(IM, \mu_{DV})$, de cada una de las *DVs*. En estas figuras se puede observar que la media de las *DVs* obtenidas con el método propuesto siempre se encuentra entre la media de las *DVs* calculadas con los esquemas de reparación en serie y paralelo del FEMA P-58-1.

En términos generales, el esquema de reparación en paralelo resultó ser el más costoso. Esto se debe a que requiere una cantidad importante de trabajadores para realizar las actividades de rehabilitación. Dicha aproximación es inconsistente porque lo más probable es que la sociedad no disponga de una cantidad importante de personal especializado. También es muy probable que se presenten problemas de congestiónamiento si se excede un cierto umbral de trabajadores por unidad de área. El esquema de reparación en serie es el que más tiempo consume y también el que menos trabajadores necesita. Respecto al orden en que se presentan los factores irracionales, debido a la complejidad del problema se utilizó la secuencia genérica ilustrada en el diagrama de flujo de la fig. 3. El tiempo asociado a los factores irracionales se obtuvo mediante el método de la transformación inversa de las distribuciones de probabilidad de la tabla 1, debidamente seleccionados de acuerdo con la severidad y cantidad de daño, y su respectiva clase de reparación.

En la intensidad sísmica correspondiente a los 20 años de periodo de retorno ($Sa(T_1) = 0.15g$), asociada al estado límite de limitación de daños estructurales y no estructurales, se observa que el grupo de desempeño más vulnerable es, como era de esperarse, el de los muros de mampostería no reforzada. Debido a que este tipo de elementos carecen de refuerzo, se espera que estos experimenten daños; no obstante, la severidad del daño en este nivel de peligro sísmico no pone en riesgo la estabilidad de la estructura. En efecto, el daño ligero de este *PG* está caracterizado por el desarrollado de grietas residuales. La probabilidad de que se presente este nivel de daño se encuentra entre 0.25 y 0.5. Las reparaciones en este caso corresponden a rellenar las grietas con grout epóxico y a pintar los muros. De acuerdo con el esquema de reparación propuesto en este estudio, la media del costo de reparación resulta en 0.05 MUSD, mientras que el tiempo de reparación estimado es de 8 días, y el tiempo de recuperación de 9 días. Para realizar las actividades de rehabilitación se requiere en promedio 9 trabajadores. Desde el punto de vista de las NTC-DS (GCDMX, 2020), este desempeño es inadecuado; no obstante, para fines ilustrativos de la metodología propuesta es interesante investigar qué es lo que ocurre si se utilizan muros de mampostería no reforzada, ya que como se sabe, muchas edificaciones de este tipo construidas en el pasado tienen estas características.

En la intensidad sísmica asociada a los 250 años de periodo de retorno ($Sa(T_1) = 0.29g$), correspondiente a la demanda de prevención al colapso, se espera que la mayoría de los muros de mampostería no reforzada desarrollen daños ligeros. La probabilidad de que se presente este nivel de daño se encuentra entre 0.25 y 0.5. Este nivel de daño está caracterizado por el desarrollo de grietas diagonales residuales. Para reparar este nivel de daño se requiere eliminar el material dañado, rellenar los huecos con grout epóxico, y finalmente pintar los muros dañados.

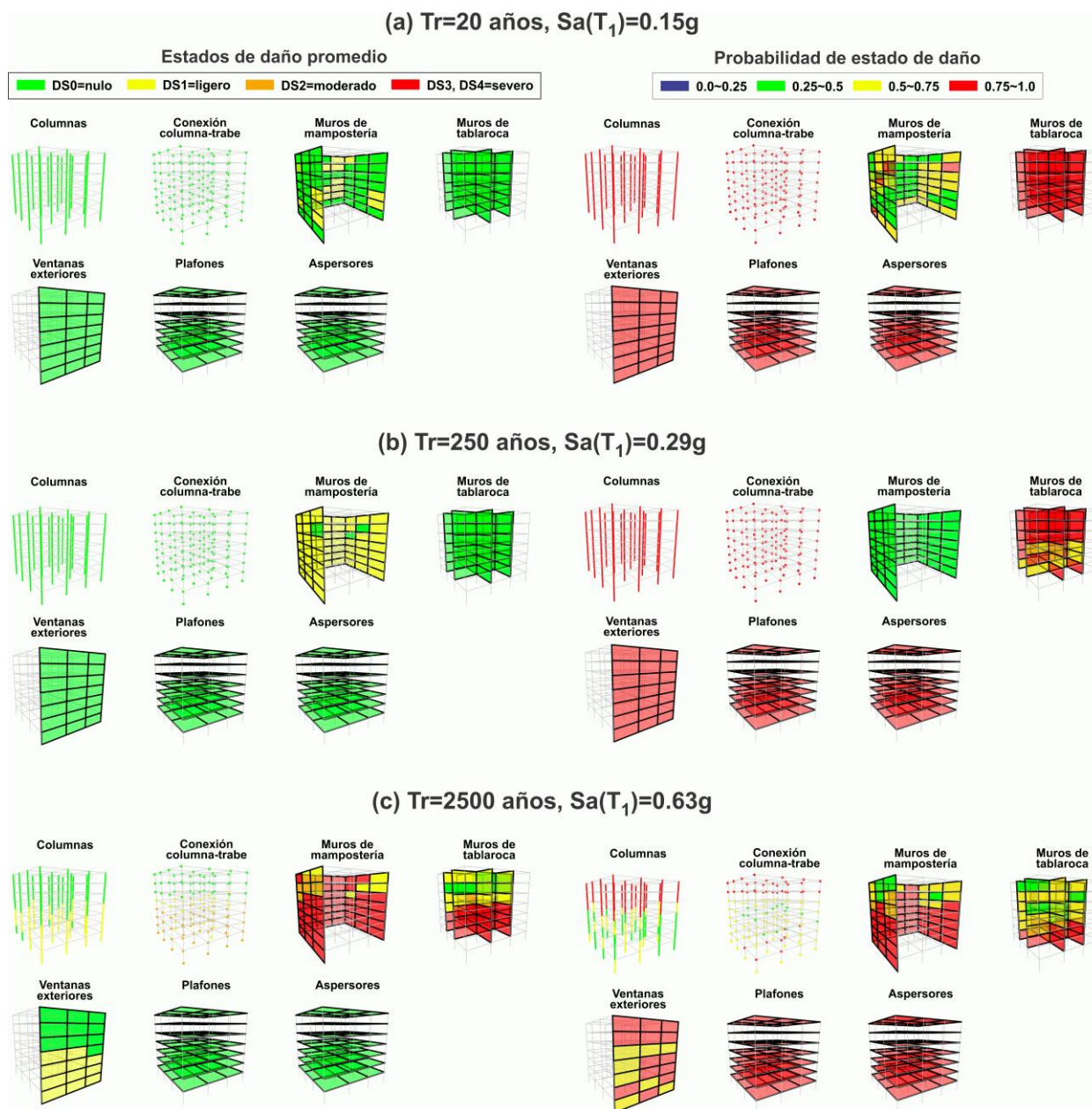


Figura 6. Estados de daño y sus respectivas probabilidades asociadas a la intensidad sísmica de (a) 20, (b) 250 y (c) 2500 años de periodo de retorno.

De acuerdo con el método recursivo propuesto, el valor medio de la cantidad de trabajadores necesarios para reparar el edificio es de 14, mientras que el tiempo medio de reparación es de 27 días. El valor medio del costo de reparación resultante fue de 0.25 MUSD. El tiempo asociado a los factores que impiden el inicio de las reparaciones es de aproximadamente 18 días, por lo que el tiempo de recuperación promedio es de 45 días (debido a la severidad del daño experimentado se consideró que los factores irracionales que impiden el inicio de las reparaciones son: inspección post-sísmica y gestión de recursos financieros para pagar las reparaciones). Para este estado límite se puede concluir que se cumplió el objetivo de diseño ya que los elementos estructurales no experimentaron daños de ninguna clase, y por lo tanto no pusieron en riesgo la seguridad de la vida de los ocupantes. No obstante, aunque el desarrollo de daño ligero

que experimentaron los muros de mampostería no pone en peligro la estabilidad del sistema estructural, si pone en riesgo la continuidad de la funcionalidad del edificio durante aproximadamente 45 días. Más aún, aunque el daño es no severo, debido a la cantidad de muros dañados, lo más probable es que el edificio sea declarado como no usable durante el tiempo en que se realizan los trabajos de reparación. Esto a su vez produciría pérdidas financieras debidas a la interrupción de los negocios.

En la intensidad sísmica asociada al periodo de retorno de 2500 años ($Sa(T_1) = 0.63g$) se espera que las columnas de los primeros cuatro pisos desarrollen daño ligero, con una probabilidad entre 0.25 y 0.75. El daño ligero en columnas está caracterizado por el desarrollo de grietas residuales de ancho menor a los 1.5 mm, sin que se presente desconchamiento del concreto de recubrimiento ni tampoco pandeo o fractura del acero de refuerzo longitudinal. Para reparar estos elementos se requiere remover el mobiliario, plafones e instalaciones mecánicas y eléctricas localizados dentro de un perímetro de 2.5 m por 2.5 m. Es posible que estos componentes no estructurales tengan que ser reemplazados. La reparación de este nivel de daño consiste en remover el concreto dañado y reponerlo con grout epóxico.

También se espera que las conexiones columna-trabe de los primeros cinco pisos desarrollen daño moderado en cantidades importantes y daño ligero en cantidades menores. La probabilidad de que se presente esta configuración de daño se encuentra entre 0.5 y 0.75. El daño ligero corresponde al desarrollo de grietas residuales de ancho menor a 1.5 mm, sin que se presente desprendimiento significativo del concreto de recubrimiento. Tampoco se presenta fractura ni pandeo del acero de refuerzo transversal. Para reparar este nivel de daño se requiere remover el mobiliario, plafones e instalaciones mecánicas y eléctricas localizados dentro de un perímetro de 2.5 m por 2.5 m. La reparación de este nivel de daño consiste en la aplicación de grout epóxico en las zonas dañadas. El estado de daño moderado está caracterizado por la presencia de grietas residuales de ancho mayor a los 1.5 mm. También se espera desprendimiento del concreto de recubrimiento, y por lo tanto exposición del acero de refuerzo transversal, pero no el longitudinal. Tampoco se presenta fractura o pandeo del acero de refuerzo. Para reparar las conexiones que desarrollaron este nivel de daño se requiere remover el mobiliario, equipo eléctrico y mecánico localizados dentro de un perímetro de 4.5 m por 4.5 m. Debido a la importancia que representa este componente estructural es necesario apuntalar el área de reparación. La rehabilitación de estos componentes consiste en colocar empalmes de acero de refuerzo, y posteriormente colocar el concreto de recubrimiento. El apuntalamiento debe de estar colocado durante al menos una semana después de haber finalizado el proceso de reforzamiento.

Los muros de mampostería no reforzada también experimentaron daños, en su mayoría severos. La probabilidad de que se presente daño severo se encuentra entre 0.75 y 1.0, en los primeros cinco pisos, y entre 0.25 y 0.75 en los últimos dos pisos. El daño ligero en estos elementos corresponde al desarrollo de grietas diagonales, y su reparación consiste en rellenarlas con grout epóxico. Respecto al daño severo, este se caracteriza por la presencia de grietas de ancho perceptible, aplastamiento y/o desprendimiento de la mampostería en las esquinas inferiores y superiores del muro. Los elementos que desarrollaron este tipo de daño tienen que ser reemplazados por muros nuevos.

Para este nivel de peligro sísmico también se espera que los muros de tablaroca desarrollen daños severos y ligeros. La probabilidad de que se presenten daños severos en los elementos localizados en los pisos segundo y tercero se encuentra entre 0.75 y 1.0, mientras que la probabilidad de que los componentes que se encuentran del cuarto al séptimo piso desarrollen daño ligero se encuentra entre 0.5 y 0.75. El daño severo en estos componentes está caracterizado por el pandeo de los pernos de anclaje y la presencia de deformaciones importantes en el panel. Este nivel de daño requiere el reemplazo de al menos el 50% del tablero y reemplazo de los pernos dañados. El daño ligero en estos muros divisorios de tablaroca está caracterizado por la presencia de grietas pequeñas y/o aplastamiento ligero en las esquinas del panel. La rehabilitación de estos elementos consiste en reparar las juntas dañadas y pintar nuevamente los tableros.

Finalmente, las ventanas de la fachada, localizadas en los primeros cuatro pisos experimentaron daño ligero. La probabilidad de que se presente este nivel de daño se encuentra entre 0.5 y 0.75. La severidad de este nivel de daño está caracterizada por el agrietamiento de los vidrios de las ventanas. La reparación de estos componentes se lleva a cabo mediante su reemplazo. Este tipo de daño puede poner en peligro la seguridad de vida de los transeúntes, no obstante, con el modelo propuesto esta afirmación solo puede realizarse desde un punto de vista subjetivo. Para realizar una evaluación objetiva sobre las lesiones que pueden experimentar los transeúntes es necesario construir un modelo probabilista para este evento en particular.

El tiempo medio necesario para reparar los daños descritos anteriormente, de acuerdo con la metodología propuesta, es de 395 días. El costo de reparación medio fue de 3.62 MUSD. El tiempo de recuperación resultó ser de 586 días. Para este nivel de daño se asumió que todos los factores irracionales participan en el retraso del inicio de las reparaciones, *i.e.*, inspección post-sísmica, revisión de la capacidad de carga residual de la estructura, planeación de las reparaciones, obtención de financiamiento y permisos gubernamentales para llevar a cabo las reparaciones del edificio. Esto significa que el 33% del tiempo de recuperación (191 días) fue consumido por los factores irracionales, mismos que no pueden ser controlados por los ingenieros. La etapa que sí puede ser controlada y optimizada por los proyectistas es la asociada con la rehabilitación estructural y no estructural.

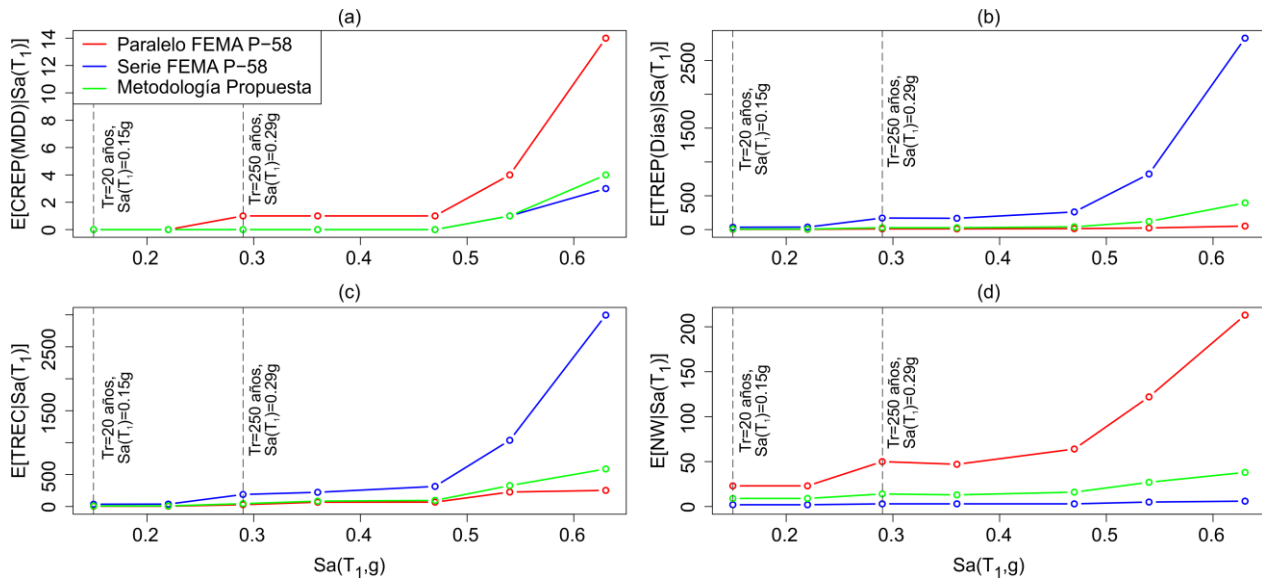


Figura 7. Funciones de vulnerabilidad del (a) costo de reparación (MUSD), (b) tiempo de reparación (días), (c) tiempo de recuperación (días), y (d) número de trabajadores.

A partir de las funciones de vulnerabilidad de las *DVs* ilustradas en la fig. 7 se observa que el edificio tiene un desempeño similar ante las intensidades sísmicas asociadas a los periodos de retorno de 250, 500 y 1,000 años ($Sa(T_1) = 0.29, 0.36$ y $0.47g$). Esto significa que, en términos generales, las reparaciones asociadas a estos niveles de peligro sísmico son muy parecidas. Por otro lado, debido a que el edificio no experimentó daños estructurales de ningún tipo, se puede concluir que el edificio tiene la capacidad de ser resiliente ante estos niveles de peligro sísmico, esto es, tiene la capacidad de recuperarse, aunque también debe aceptarse que esto tendrá un costo directo (reparaciones) e indirecto (pérdidas por interrupción de negocios).

Para las intensidades de 1500 y 2500 años de periodo de retorno ($Sa(T_1) = 0.54$, y $0.63g$), el valor esperado de las *DVs* se incrementa notablemente. En efecto, a partir de los resultados del análisis asociado

a los 2500 años de periodo de retorno, se puede concluir que a pesar de que la estructura es reparable ya que, si bien los elementos estructurales desarrollaron daños moderados y ligeros, el costo total de las reparaciones, y el tiempo de recuperación resultaron ser cantidades no despreciables. Estos datos pueden ser utilizados por el tomador de decisiones y determinar si se repara el edificio, o es mejor demolerlo e invertir en la construcción de uno nuevo. En este último caso se puede decir que el edificio no tiene la capacidad de ser resiliente, mientras que en la primera opción el edificio tiene la capacidad de ser resiliente, pero con un alto costo económico y social.

Tabla 2. Valor esperado, intervalo de confianza y coeficiente de variación de las variables de decisión obtenidas mediante la secuencia de reparación en paralelo.

Tr (años)	$Sa(T_1)$ (g)	μ_{nw} (u)	C.V. (%)	μ_{TREP} (días)	C.V. (%)	μ_{CREP} (MUSD)	C.V. (%)	μ_{TREC} (días)	C.V. (%)
20	0.15	23	7	4	22	0.09	4	5	17
125	0.22	24	7	4	22	0.08	4	5	16
250	0.29	49	4	11	7	0.58	2	28	4
500	0.36	49	8	10	15	0.60	5	67	6
1000	0.47	65	5	14	9	1.13	3	70	5
1500	0.54	123	7	24	12	3.14	4	226	6
2500	0.63	213	6	54	16	14.00	5	255	6

Tabla 3. Valor esperado, intervalo de confianza y coeficiente de variación de las variables de decisión obtenidas mediante la secuencia de reparación en serie.

Tr (años)	$Sa(T_1)$ (g)	μ_{nw} (u)	C.V. (%)	μ_{TREP} (días)	C.V. (%)	μ_{CREP} (MUSD)	C.V. (%)	μ_{TREC} (días)	C.V. (%)
20	0.15	2	17	38	10	0.05	3	39	10
125	0.22	2	21	36	9	0.05	3	37	9
250	0.29	3	6	169	4	0.21	2	187	4
500	0.36	3	12	168	10	0.21	4	224	7
1000	0.47	3	13	268	6	0.34	3	323	5
1500	0.54	5	16	838	9	1.11	4	1054	7
2500	0.63	6	5	2827	11	3.20	5	2984	9

Tabla 4. Valor esperado, intervalo de confianza y coeficiente de variación de las variables de decisión obtenidas mediante la metodología propuesta.

Tr (años)	$Sa(T_1)$ (g)	μ_{nw} (u)	C.V. (%)	μ_{TREP} (días)	C.V. (%)	μ_{CREP} (MUSD)	C.V. (%)	μ_{TREC} (días)	C.V. (%)
20	0.15	9	7	8	15	0.05	5	9	13
125	0.22	9	5	8	17	0.04	5	9	13
250	0.29	14	4	27	7	0.25	2	45	4
500	0.36	14	5	28	14	0.26	5	85	5
1000	0.47	16	6	41	9	0.42	3	96	4
1500	0.54	27	9	120	13	1.29	4	330	7
2500	0.63	38	5	395	14	3.62	5	586	7

CONCLUSIONES

En este trabajo se presentó una metodología probabilista basada en el método PERT para estimar la función de vulnerabilidad del costo de reparación, tiempo de reparación, tiempo de recuperación y cantidad de recursos humanos para llevar a cabo los trabajos de rehabilitación en edificios dañados por terremotos. En general, la metodología propuesta es consistente con la definición de resiliencia estructural propuesta por el MCEER y con el esquema de evaluación del desempeño estructural desarrollado por el PEER.

La metodología propuesta puede ser de utilidad tanto para los ingenieros como para los tomadores de decisiones (dueños, aseguradoras, inversores, etc.). Los ingenieros la pueden emplear para realizar la evaluación de la resiliencia sísmica de edificios ya construidos, o que están por construirse. Además, esta información puede ser de ayuda para incrementar la resiliencia de edificios, lo cual se puede lograr reduciendo la pendiente de las funciones de vulnerabilidad. Los tomadores de decisión se pueden beneficiar de ella para definir qué es lo más conveniente después de que un sismo daña a un edificio, por ejemplo, si es económicamente viable repararlo, o es mejor demolerlo.

Por otro lado, la variable de decisión que se utiliza en la práctica del riesgo estructural es la de los costos de reparación; sin embargo, diversos autores (Almufti y Willford, 2013) han indicado que el tiempo de recuperación de una instalación dañada es más fácil de interpretar por los tomadores de decisiones ya que a partir de ésta pueden estimarse a *grosso modo* las pérdidas económicas financieras indirectas, es decir, las que corresponden al tiempo que el edificio deja de ser funcional. Al tratar de reducir la magnitud de esta variable de decisión es muy probable que también se esté reduciendo de forma indirecta el riesgo asociado a la pérdida de vidas humanas y a las pérdidas económicas directas e indirectas.

A pesar de que los resultados de la evaluación del edificio de estudio parecen ser aceptables, es conveniente que en México se realicen investigaciones relativas al desarrollo de funciones de distribución de probabilidad del daño, costos y tiempos de reparación con datos mexicanos, ya que las funciones utilizadas en este trabajo fueron desarrolladas por instituciones como el PEER y FEMA con datos americanos. Como se sabe, el contenido de frecuencia, duración e intensidad de los sismos que caracterizan la sismicidad en México son distintos a los que caracterizan la sismicidad de los Estados Unidos de América. Esa diferencia puede tener un impacto importante en los resultados del análisis de resiliencia estructural. Respecto a la cantidad de trabajadores y cuadrillas utilizadas en el algoritmo recursivo, también es conveniente que estas se prescriban con base en la experiencia de los ingenieros mexicanos que se dedican a la práctica de la rehabilitación sísmica de edificios. También es aconsejable que se estudie con más profundidad la secuencia en que se presentan los factores que impiden el inicio de las reparaciones. A este respecto, es importante que en México se realicen investigaciones sobre este tema.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Dirección General de Asuntos del Personal Académico de la UNAM y al Instituto para la Seguridad de las Construcciones del Gobierno de la Ciudad de México el patrocinio de los proyectos PAPIIT/IN104821 y ISCDF/CEC-04/2021-21 respectivamente, en los que se basa parcialmente este artículo. El primer autor agradece también al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología la beca de otorgada para realizar sus estudios de doctorado

ANEXO A

En la tabla A1 se presenta una descripción general de los estados de daño discretos de los componentes estructurales y no estructurales utilizados en este trabajo. En esta tabla se indican además las actividades genéricas para su reparación. En las tablas A2 y A3 se presentan los parámetros de la distribución de probabilidad de cada estado de daño discreto y tiempo de reparación unitario de cada grupo de desempeño, respectivamente.

Tabla A1. Descripción de los estados de daño y actividades de reparación genéricos de los grupos de desempeño utilizados (FEMA, 2012b).

Grupo de desempeño (PG)	Estado de daño (DS)	Descripción genérica del daño	Descripción genérica de las reparaciones
Columna	DS1 (sec.)	Se presenta agrietamiento residual con ancho < 0.15 cm. Sin desprendimiento significativo del concreto. Sin fractura o pandeo del acero de refuerzo.	Remover mobiliario, plafones e instalaciones mecánicas, eléctricas y tuberías a 2.5 metros de cada lado del área dañada. Limpiar al concreto desprendido para ser reparado mediante inyección epóxica. De ser necesario, reemplazar mobiliario, plafones, equipo eléctrico, e instalación de tuberías.
		Se presenta agrietamiento residual con ancho > 0.15 cm. El desprendimiento	Remover mobiliario, plafones e instalaciones mecánicas, eléctricas y tuberías a 4.5 metros de cada lado de área dañada. Apuntalar miembros dañados. Remover el concreto dañado al menos 2.5 centímetros del acero de refuerzo expuesto. Colocar el concreto de reemplazo. Retirar los puntales de soporte después de una semana. De ser necesario, reemplazar mobiliario, plafones, equipo eléctrico, mecánico y de tuberías.
	DS2 (sec.)	del concreto de recubrimiento expone a la vista el acero de refuerzo transversal. No se presenta fractura o pandeo del acero de refuerzo.	Remover mobiliario, plafones, equipo eléctrico, mecánico y de tuberías as a 4.5 metros de cada lado del área dañada. Apuntalar miembros dañados. Colocar y empalmar nuevo acero de refuerzo sobre el existente (de ser necesario). Colocar el concreto de reemplazo. Retirar los puntales de soporte después de una semana. Reparar y/o reemplazar acabados. De ser necesario, reemplazar mobiliario, plafones, equipo el eléctrico, mecánico y de tuberías.
		Se presenta agrietamiento residual con ancho > 0.15 cm. El desprendimiento	Remover mobiliario, plafones, equipo eléctrico, mecánico y de tuberías a 4.5 metros de cada lado del área dañada. Apuntalar miembros dañados. Colocar y empalmar nuevo acero de refuerzo sobre el existente (de ser necesario). Colocar el concreto de reemplazo. Retirar los puntales de soporte después de una semana. Reparar y/o reemplazar acabados. De ser necesario, reemplazar mobiliario, plafones, equipo el eléctrico, mecánico y de tuberías.
	DS3 (sec.)	del recubrimiento de concreto expone una longitud significativa del acero de refuerzo longitudinal. Puede presentarse aplastamiento en el núcleo de concreto. Puede presentarse fractura o pandeo del refuerzo de acero, siendo requerido su reemplazo.	Remover mobiliario, plafones, equipo eléctrico, mecánico y de tuberías a 4.5 metros de cada lado del área dañada. Apuntalar miembros dañados. Remover el concreto dañado al menos 2.5 centímetros más allá del acero de refuerzo expuesto. Colocar el concreto de reemplazo. Retirar los puntales de soporte después de una semana. Reparar y reemplazar acabados. De ser necesario, reemplazar mobiliario, plafones, equipo el eléctrico, mecánico y de tuberías.
	DS4 (mutuamente excluyen te DS3, DS4)	Se presenta agrietamiento residual con ancho > 0.15 cm. El desprendimiento del recubrimiento de concreto expone a la vista el acero de refuerzo transversal, pero no el longitudinal. No se presenta fractura o pandeo del refuerzo.	Remover mobiliario, plafones, equipo el eléctrico, mecánico y de tuberías. Remover el concreto dañado al menos 2.5 centímetros más allá del acero de refuerzo expuesto. Colocar el concreto de reemplazo. Retirar los puntales de soporte después de una semana. Reparar y reemplazar acabados. De ser necesario, reemplazar mobiliario, plafones, equipo el eléctrico, mecánico y de tuberías.
Conexiones columna-trabe			Remover mobiliario, plafones e instalaciones mecánicas, eléctricas y tuberías a 2.5 metros de cada lado de área dañada. Limpiar el área adyacente al elemento de concreto dañado. Preparar la zona de concreto dañado para ser rellenada con inyección epóxica y grout. De ser necesario, reemplazar mobiliario, plafones, equipo el eléctrico, mecánico y de tuberías.
	DS1 (sec.)	Se presenta agrietamiento residual con ancho > 0.15 cm. No se presenta desprendimiento significativo del recubrimiento de concreto. No se presenta fractura o pandeo del acero de refuerzo.	Remover mobiliario, plafones, equipo el eléctrico, mecánico y de tuberías a 4.5 metros de cada lado del área dañada. Apuntalar miembros dañados. Colocar y empalmar nuevo acero de refuerzo sobre el existente (de ser necesario). Colocar el concreto de reemplazo. Retirar los puntales de soporte después de una semana. Reparar y reemplazar acabados. De ser necesario, reemplazar mobiliario, plafones, equipo el eléctrico, mecánico y de tuberías.
		Se presenta agrietamiento residual con ancho > 0.15 cm. El desprendimiento del	Remover mobiliario, plafones, equipo el eléctrico, mecánico y de tuberías a 4.5 metros de cada lado del área dañada. Apuntalar miembros dañados. Colocar y empalmar nuevo acero de refuerzo sobre el existente (de ser necesario). Colocar el concreto de reemplazo. Retirar los puntales de soporte después de una semana. Reparar y reemplazar acabados. De ser necesario, reemplazar mobiliario, plafones, equipo el eléctrico, mecánico y de tuberías.
	DS2 (sec.)	recubrimiento de concreto expone el acero de refuerzo transversal de la trabe y conexión, pero no del refuerzo longitudinal. No se presenta fractura o pandeo del acero de refuerzo.	Remover mobiliario, plafones, equipo el eléctrico, mecánico y de tuberías a 4.5 metros de cada lado del área dañada. Apuntalar miembros dañados. Remover el concreto dañado al menos 2.5 centímetros más allá del acero de refuerzo expuesto. Colocar el concreto de reemplazo. Retirar los puntales de soporte después de una semana. Reparar y reemplazar acabados. De ser necesario, reemplazar mobiliario, plafones, equipo el eléctrico, mecánico y de tuberías.
		Se presenta agrietamiento residual con ancho > 0.15 cm. El desprendimiento del	Remover mobiliario, plafones, equipo el eléctrico, mecánico y de tuberías a 4.5 metros de cada lado del área dañada. Apuntalar miembros dañados. Remover el concreto dañado al menos 2.5 centímetros más allá del acero de refuerzo expuesto. Colocar el concreto de reemplazo. Retirar los puntales de soporte después de una semana. Reparar y reemplazar acabados. De ser necesario, reemplazar mobiliario, plafones, equipo el eléctrico, mecánico y de tuberías.
	DS3 (sec.)	concreto de recubrimiento expone una longitud significativa del acero de refuerzo de la viga. Puede presentarse aplastamiento en el núcleo de concreto del elemento. Puede presentarse pandeo o fractura en el acero de refuerzo.	Remover mobiliario, plafones, equipo el eléctrico, mecánico y de tuberías a 4.5 metros de cada lado del área dañada. Apuntalar miembros dañados. Remover el concreto dañado al menos 2.5 centímetros más allá del acero de refuerzo expuesto. Colocar el concreto de reemplazo. Retirar los puntales de soporte después de una semana. Reparar y reemplazar acabados. De ser necesario, reemplazar mobiliario, plafones, equipo el eléctrico, mecánico y de tuberías.

Muros de mampostería	de DS1 (sec.)	Se presentan grietas diagonales, y estas permanecen cerradas con notables grietas residuales.	Rellenar grietas con grout epóxico. Pintar el muro por ambos lados.
	DS2 (sec.)	Grietas diagonales con ancho perceptible. Se presentan una o más grietas en cada dirección. Aplastamiento o desprendimiento del material en las esquinas inferiores y superiores del muro.	Apuntalar el muro. Demoler el muro. Construir un nuevo muro.
Muros tablaroca	de DS1 (sec.)	Se presenta destornillamiento en las zonas de sujeción, agrietamiento del tablero y un ligero aplastamiento en las esquinas del panel.	Reparar las juntas y pintar.
	DS2 (sec.)	Se presenta agrietamiento moderado y/o aplastamiento en las esquinas del panel. Se presentan aberturas en las esquinas del tablero y se los pernos de sujeción se deforman por flexión.	Retirar y reemplazar el 10% del tablero (por ambos lados). Reparar el 25% del tablero. Pintar el 50% del tablero. Reemplazar los pernos de sujeción.
	DS3 (sec.)	Se presenta pandeo en los pernos de sujeción; grandes deformaciones en las guías superiores e inferiores. El panel desarrolla grandes deformaciones.	Retirar y reemplazar el 50% del marco del tablero. Reparar el 50% del tablero por ambos lados. Pintar el 100% del tablero. Reemplazar los pernos de sujeción.
Ventanas exteriores	DS1 (sec.)	El vidrio se agrieta.	Reemplazar el panel de vidrio agrietado.
	DS2 (sec.)	El vidrio se fractura.	Reemplazar el panel de vidrio agrietado.
Plafones	DS1 (sec.)	Se daña aproximadamente el 5% del total soporte de los tableros.	Reinstalar, reparar, o reemplazar el 5% del área de plafones dañados.
	DS2 (sec.)	Se daña aproximadamente el 30% del total del soporte de los tableros.	Reemplazar el 30% del área de plafones dañados.
	DS3 (sec.)	Se daña aproximadamente el 50% del total del soporte de los tableros.	Reemplazar el 100% de los plafones.
Aspersores	DS1 (sec.)	Se presente fuga y goteo con una relación de 2% de fugas por cada 6 metros de tubería.	Reemplazo de las juntas dañadas.
	DS2 (sec.)	Se presenta rotura de juntas con una relación de 2% por cada 6 metros de tubería.	Reemplazo de 6 metros pies de longitud de tubería y sus respectivas juntas.

*sec.: secuencial, m. exc.: mutuamente excluyente.

Tabla A2. Parámetros de las distribuciones de probabilidad de estado de daño de los grupos de desempeño utilizados (FEMA, 2012b).

Grupo de desempeño (PG)	Parámetro de demanda de ingeniería (EDP)	Estado de daño discreto (DS)	Distribución de probabilidad	Parámetros de la distribución de prob.	
				μ	σ
Columna	Distorsión	DS1 (sec.)	Lognormal	0.02	0.4
		DS2 (sec.)	Lognormal	0.0275	0.3
		DS3 (sec.)	Lognormal	0.05	0.3
		DS4 (exc. DS2, DS3)	Lognormal	0.05	0.3
Conexión columna-trabe	Distorsión	DS1 (sec.)	Lognormal	0.015	0.4
		DS2 (sec.)	Lognormal	0.0175	0.4
		DS3 (sec.)	Lognormal	0.02	0.4
Muros de mampostería	Distorsión	DS1 (sec.)	Lognormal	0.002	0.86
		DS2 (sec.)	Lognormal	0.0033	0.77
Muros divisorios de Tablaroca	Distorsión	DS1 (sec.)	Lognormal	0.005	0.4
		DS2 (sec.)	Lognormal	0.01	0.3
		DS3 (sec.)	Lognormal	0.021	0.2
Ventanas exteriores	Distorsión	DS1 (sec.)	Lognormal	0.0156	0.35
		DS2 (sec.)	Lognormal	0.0561	0.3
Plafones	Aceleración máxima de piso (g)	DS1 (sec.)	Normal	1.47	0.3
		DS2 (sec.)	Lognormal	1.88	0.3
		DS3 (sec.)	Lognormal	2.03	0.3
Aspersores	Aceleración máxima de piso (g)	DS1 (sec.)	Normal	1.1	0.4
		DS2 (sec.)	Normal	2.4	0.5

Tabla A3. Distribución de probabilidad de los tiempos de reparación de los estados de daño discretos de los grupos de desempeño utilizados (FEMA, 2012b).

Grupo de desempeño (PG)	Estado de daño discreto (DS)	Unidad	Cantidad máxima.	Tiempo de reparación		
				Distribución de probabilidad	Tiempo (días)	C.V. ó σ
Columna	DS1 (sec.)	unitario	20	Normal	15.1	0.46
	DS2 (sec.)			Normal	24.3	0.39
	DS3 (sec.)			Normal	28.9	0.39
Conexiones columna-trabe	DS4 (exc. DS2, DS3)	unitario	20	Normal	24.3	0.39
	DS1 (sec.)			Normal	15.1	0.46
	DS2 (sec.)			Normal	24.3	0.39
Muros de mampostería	DS3 (sec.)	100 m2	30	Normal	28.9	0.39
	DS1 (sec.)			Normal	2.62	0.27
	DS2 (sec.)			Normal	3.74	0.29
Muros divisorios de tablaroca	DS1 (sec.)	120 m2	10	Normal	1.47	0.51
	DS2 (sec.)			Lognormal	2.8	0.61
	DS3 (sec.)			Lognormal	5.74	0.32
Ventanas exteriores	DS1 (sec.)	unitario	100	Lognormal	0.696	0.28
	DS2 (sec.)			Lognormal	0.696	0.28
	DS3 (sec.)			Lognormal	0.696	0.28
Plafones	DS1 (sec.)	55 m2	10	Normal	0.463	0.6
	DS2 (sec.)			Lognormal	3.7	0.58
	DS3 (sec.)			Lognormal	7.67	0.32
Aspersores	DS1 (sec.)	30 m	10	Lognormal	0.369	0.7
	DS2 (sec.)			Lognormal	0.313	0.48

REFERENCIAS

- Almufti, I y M Willford (2013). “Resilience-based earthquake design initiative for the next generation of buildings: REDi™ Rating System”. Arup, San Francisco, CA, USA.
- Almufti, I y M Willford (2014). “The REDi™ rating system: A framework to implement resilience-based earthquake design for new buildings”. Memorias, *Tenth U.S. National Conference on Earthquake Engineering*, Anchorage, AK, USA.
- ASCE (2013). “Seismic evaluation and retrofit of existing buildings, ASCE 41-13”. American Society of Civil Engineers, Reston, VA, USA.
- Aslani, H y E Miranda (2005). “Probabilistic earthquake loss estimation and loss disaggregation in buildings”. Reporte técnico No. 157, Department of Civil and Environmental Engineering John A. Blume, Stanford University, Stanford, CA, USA.
- ATC (1989). “Procedures for post-earthquake safety evaluation of buildings, ATC-20”. Applied Technology Council, Redwood City, CA, USA.
- Bruneau, M, S E Chang, R T Eguchi, G C Lee, T D O’ Rourke, A M Reinhorn, M Shinozuka, K Tierney, W A Wallace, y D von Winterfeldt (2003). “A framework to quantitatively assess and enhance the resilience of communities”. *Earthquake Spectra*, Vol. 19, No. 4, pp. 733-752. DOI: [10.1193/1.1623497](https://doi.org/10.1193/1.1623497)
- Burton, H V, G Deierlein, D Lallemand y T Lin (2016). “Framework for incorporating probabilistic building performance in the assessment of community seismic resilience”. *Journal of Structural Engineering*, Vol. 142, No. 8, pp. C4015007-1—C4015007-11. DOI: [10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0001321](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001321)
- Caverzan, A y G Solomos (2014). “Review on resilience in literature and standards for critical built-infrastructure”. Informe sobre ciencia y política del JCR, Joint Research Centre, Institute for the Protection and Security of the Citizen, European Commission, Ispra, ITA.

- Chang, G A y J B Mander (1994). "Seismic energy-based fatigue damage analysis of bridge columns: Part 1-Evaluation of seismic capacity". *Informe técnico No. NCEER-94-0006*. University at Buffalo, State University of New York, Buffalo, NY, USA.
- Cimellaro G P, A M Reinhorn y M Bruneau (2006). "Quantification of seismic resilience". *Memorias, Eighth U.S., National Conference on Earthquake Engineering*, San Francisco, CA, USA.
- Cimellaro G P, A M Reinhorn y M Bruneau (2010). "Framework for analytical quantification of disaster resilience". *Engineering Structures*, Vol. 32, pp. 3639-3649. [DOI:10.1016/j.engstruct.2010.08.008](https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2010.08.008)
- Comerio, M C (2006). "Estimating downtime in loss modeling". *Earthquake Spectra*, Vol. 22, No. 2, pp. 349-365. [DOI: 10.1193/1.2191017](https://doi.org/10.1193/1.2191017)
- Cornell, A y H Krawinkler (2000). "Progress and challenges in seismic performance assessment". *Noticias del PEER Center*, Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California - Berkeley, Berkeley, CA, USA.
- FEMA (2000). "Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings, FEMA 356". Federal Emergency Management Agency, Washington, DC, USA.
- FEMA (2012a). "Seismic performance assessment of buildings, Volume 1-Methology, FEMA P-58-1". Federal Emergency Management Agency, Washington, DC, USA.
- FEMA (2012b). "Seismic performance assessment of buildings, Volume 3-Supporting electronic materials and background documentation, FEMA P-58-3". Federal Emergency Management Agency, Washington, DC, USA.
- GCDMX (2017a). "Normas técnicas complementarias. Diseño de estructuras de concreto, No. 220-Bis, NTC-DEC". *Gaceta Oficial de la Ciudad de México*, CDMX, MEX.
- GCDMX (2017b). "Normas técnicas complementarias. Criterios y acciones para el diseño de edificaciones, No. 220-Bis, NTC-CADE". *Gaceta Oficial de la Ciudad de México*, CDMX, MEX.
- GCDMX (2020). "Normas técnicas complementarias para diseño por sismo con comentarios, No. 361, NTC-DS". *Gaceta Oficial de la Ciudad de México*, CDMX, MEX.
- Giuffrè, A y P E Pinto (1970). "Il comportamento del cemento armato per sollecitazioni cicliche di forte intensità". *Giornale del Genio Civile*, Roma, ITA.
- Günay, S y K M Mosalam (2013). "PEER Performance-based earthquake engineering methodology, revisited". *Journal of Earthquake Engineering*, Vol. 17, No. 6, pp. 829-858. [DOI: 10.1080/13632469.2013.787377](https://doi.org/10.1080/13632469.2013.787377)
- Gutiérrez, J, G Ayala y J M Bairán (2019). "Evaluación del tiempo de recuperación de edificios de concreto reforzado dañados por sismo". *Memorias, XXII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica*. Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica, Monterrey, NL, MEX.
- Kadysiewski, S y K M Mosalam (2009). "Modeling of unreinforced masonry infill walls considering in-plane and out-of-plane interaction". *Informe técnico No. 2008/102*. Pacific Earthquake Engineering Research, University of California, Berkeley, Berkeley, CA, USA.
- Kohrs-Sansorny, C, F Courboux, M Bour, y A Deschamps (2005). "A two-stage method for ground-motion simulation using stochastic summation of small earthquakes". *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 95, No. 4, pp. 1387-1400. [DOI: 10.1785/0120040211](https://doi.org/10.1785/0120040211)
- Mazzoni, S, F McKenna, M H Scott, G L Fenves, *et al.* (2007). "Open system for earthquake simulation, OpenSees". Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, Berkeley, CA, USA.

- Mieler, M W, S R Uma y J Mitrani-Reiser (2016). “Using failure analysis tools to establish seismic resilience objectives for building components and systems”. *Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering*, Vol. 49, No.1, pp. 86-97. [DOI:10.5459/bnzsee.49.1.86-97](https://doi.org/10.5459/bnzsee.49.1.86-97)
- Miranda, E, G Mosqueda, R Retamales y G Pekcan (2012). “Performance of nonstructural components during the 27 February 2010 Chile earthquake”. *Earthquake Spectra*, Vol. 28, No. S1, pp. S453-S471. [DOI: 10.1193/1.4000032](https://doi.org/10.1193/1.4000032)
- Mitrani-Reiser, J (2007). “An ounce of prevention: Probabilistic loss estimation for performance-based earthquake engineering”. *Tesis de doctorado*. California Institute of Technology, Pasadena, CA, USA.
- Mitrani-Reiser, J, S Wu y J L Beck (2016). “Virtual Inspector and its application to immediate pre-event and post-event earthquake loss and safety assessment of buildings”. *Natural Hazards*, Vol. 81, pp. 1861-1878. [DOI 10.1007/s11069-016-2159-6](https://doi.org/10.1007/s11069-016-2159-6)
- Moehle, J y G Deierlein (2004). “A framework methodology for performance-based earthquake engineering”. *Memorias, Thirteenth World Conference on Earthquake Engineering*, Vancouver, BC, CA.
- Ordaz, M, J Arboleda, J, y S Singh (1995). “A scheme of random summation of an empirical Green’s function to estimate ground motions from future earthquakes”. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 85, No. 6, pp. 1635-1647.
- Ortiz, D y E Reinoso (2020). “Tiempo de interrupción de negocios en la Ciudad de México por daños directos y efectos indirectos en edificios a causa del sismo del 19S de 2017”. *Revista de Ingeniería Sísmica*, No. 104, pp. 1-31. [DOI: 10.18867/ris.104.538](https://doi.org/10.18867/ris.104.538)
- Porter, K A (2000). “Assembly-based vulnerability of buildings and its uses in seismic performance evaluation and risk-management decision-making”. *Tesis de doctorado*. Stanford University, Stanford, CA, USA.
- Porter, K A y K Ramer (2012). “Estimating earthquake-induced failure probability and downtime of critical facilities”. *Journal of Business Continuity & Emergency Planning*, Vol. 5, No. 4, pp. 352-364.
- Porter, K A, K Shoaf y H Seligson (2006). “Value of injuries in the Northridge Earthquake”, *Nota técnica, Earthquake Spectra*, Vol. 22, No. 2, pp. 555–563. [DOI: 10.1193/1.2194529](https://doi.org/10.1193/1.2194529)
- Richmond, S B (1968). “Operations Research for Management Decisions”. John Wiley and Sons, USA.
- SEAOC (1995). “VISION 2000, A Framework for Performance-Based Engineering”. Structural Engineers Association of California, Sacramento, CA, USA.
- Toyoda, T (2008). “Economic impacts of Kobe earthquake: A quantitative evaluation after 13 years”. *Memorias, Fifth International Information System for Crisis Response and Management (ISCRAM) Conference, ISCRAM*, Washington, DC, USA.
- Waller, M A (2001). “Resilience in ecosystemic context: Evolution of the concept”. *American Journal of Orthopsychiatry*, Vol. 71, No. 3, pp. 290–297. doi.org/10.1037/0002-9432.71.3.290
- Yang, T Y, J Moehle, B Stojadinovic y A Der Kiureghian (2009). “Seismic performance evaluation of facilities: Methodology and implementation”. *Journal of Structural Engineering*, Vol. 135, No. 10, pp. 1146-1154. [DOI: 10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2009\)135:10\(1146\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2009)135:10(1146))
- Yoo, D Y (2016). “Repair time model for different building sizes Considering the earthquake hazard”. *Tesis de maestría*. California State University, Long Beach, CA, USA.