

DISEÑO SÍSMICO SUSTENTABLE DE ESTRUCTURAS EQUIPADAS CON DISIPADORES VISCOSOS

Ali Rodríguez-Castellanos⁽¹⁾, Mauro Niño-Lázaro⁽²⁾, Sonia E. Ruiz-Gómez⁽²⁾ y Marco A. Santos-Santiago⁽²⁾

RESUMEN

La ingeniería sísmica moderna no únicamente busca salvaguardar la vida humana durante un evento sísmico, si no también controlar las pérdidas económicas y, más recientemente, el impacto ambiental asociado con la rehabilitación del daño estructural después de un sismo. La incorporación de dispositivos de amortiguamiento viscoso en edificaciones puede ayudar a satisfacer tales exigencias. Sin embargo, inclusive satisfaciendo las demandas de resistencia y deformación, el diseño de estos dispositivos no garantiza la óptima selección de sus propiedades histeréticas. En este estudio se diseña un conjunto de edificaciones que incorporan dispositivos viscosos cuyas propiedades histeréticas se varían para tener diversas alternativas de diseño y, enseguida, se evaluó su desempeño con la metodología FEMA P-58. Así, para abordar las tres dimensiones de la sustentabilidad, se definió como diseño óptimo a aquel donde se minimice la pérdida anual esperada en términos de costos de reparación (economía), número de heridos (social) y emisiones de dióxido de carbono (ambiental). Los resultados indicaron que la selección cuidadosa de los parámetros histeréticos de los sistemas de disipación de energía puede reducir significativamente las pérdidas esperadas, en comparación con edificaciones que no incorporan sistemas de amortiguamiento suplementario.

Palabras clave: diseño sustentable; FEMA P-58; amortiguamiento viscoso; impacto ambiental

SUSTAINABLE SEISMIC DESIGN OF STRUCTURES EQUIPPED WITH VISCIOUS DAMPERS

ABSTRACT

Modern earthquake engineering not only seeks to safeguard human life during a seismic event but also to control economic losses and, more recently, the environmental impact associated with the rehabilitation of structural damage after an earthquake. The inclusion of viscous damping devices in building structures can help to satisfy these requirements. Nevertheless, even if the building structure meets the strength and deformation demands, the design of these devices does not guarantee an optimal selection of their hysteretic properties. This study involves the design of building structures that incorporate viscous devices, with varying hysteretic properties to obtain different design alternatives and, immediately, to assess their seismic performance utilizing the FEMA P-58 methodology. Thus, to address the three dimensions of sustainability, the optimal design was defined

Artículo recibido el 04 de mayo de 2023 y aprobado para su publicación el 30 de junio de 2024. Se aceptarán comentarios y/o discusiones hasta cinco meses después de su publicación.

⁽¹⁾ Escuela de Ingeniería Mazatlán, Universidad Autónoma de Sinaloa, Av. Ejército mexicano y Universidad s/n, Mazatlán, Sinaloa, C.P. 82017; arodriguezca@uas.edu.mx

⁽²⁾ UNAM, Instituto de Ingeniería, Av. Universidad No. 3000, Del. Coyoacán, Ciudad de México, México, C.P. 04510. mninol@ingenieria.unam.edu; sruizg@iingen.unam.mx; m_antonio_s@outlook.com

as the one with the lowest expected annual loss in terms of repair costs (economy), number of serious injuries (social), and carbon emissions (environmental impact). It was found that selecting the hysteretic parameters of energy dissipation devices appropriately leads to a significant reduction in expected annual losses when compared to structures without supplemental damping systems.

Keywords: sustainable seismic design; FEMA P-58; viscous damping; environmental impact

INTRODUCCIÓN

Los códigos para el diseño sísmico de edificaciones propician diseños estructurales capaces de resistir una variedad de cargas estáticas y dinámicas; además, tienen como objetivo prevenir el colapso de la estructura ante un evento sísmico de alta intensidad. Evidentemente, el propósito es promover la seguridad de vida por encima de la preservación de la estructura (ASCE, 2017a; GCDMX, 2020). No obstante, cumplir con tal enfoque no garantiza que se eviten grandes pérdidas económicas debido al daño estructural inducido por un evento sísmico determinado. En este sentido, la ingeniería sísmica actual sigue metodologías para el diseño sísmico de edificaciones basado en desempeño, las cuales consisten en estimar e, incluso, controlar el desempeño de las estructuras a través de niveles de desempeño discretos (*e.g.*, operacional, ocupación inmediata, seguridad de vida y prevención al colapso) (ATC, 1996; FEMA, 1997; Ghobarah, 2001, ASCE, 2017b). Ahora bien, el enfoque anterior permite cuantificar y delimitar el daño inducido en una edificación cuando se sujeta a un nivel de intensidad sísmica específica. Sin embargo, no comunica explícitamente a las partes interesadas (*e.g.*, ingenieros, propietarios, inversionistas, desarrolladores, aseguradoras, etc.) la repercusión económica por acciones de reparación o el tiempo de inactividad ocasionado por las mismas, mucho menos el número de heridos o decesos que se podrían presentar ante las acciones sísmicas de diseño o eventos sísmicos extraordinarios.

Adicionalmente, se reconoce que la industria de la construcción contribuye sustancialmente al consumo de recursos naturales e impacta al medio ambiente con emisiones al aire y generación de residuos (Comber *et al.*, 2012; Feese *et al.*, 2015; Hossain y Gencturk, 2016; Salgado *et al.*, 2020). Anualmente, se estima que el 40% de las emisiones globales de gases de efecto invernadero (carbón incorporado) provienen del sector de la construcción (Architecture 2030, 2023). Además, cuando ocurre un desastre natural como un evento sísmico, las acciones de reparación generan nuevas emisiones de carbono debido a la extracción de materiales y su implementación para rehabilitar la edificación a su estado original. Por ello, hoy en día los proyectos de edificación se encuentran bajo el escudriño público en materia ambiental. En ese sentido, la ingeniería sísmica enfatiza el incorporar, como medida de desempeño, el impacto ambiental asociado con dichas acciones de reparación y/o rehabilitación y, de este modo, las partes interesadas puedan tomar decisiones de diseño desde un punto de vista ambiental. Diversas investigaciones exponen que el consumo de energía incorporada (relacionada con la extracción de la materia prima, manufacturación de los materiales, transportación, generación de residuos, etc.) asociado con acciones de reparación y/o rehabilitación producto del daño estructural inducido por un evento sísmico determinado, puede representar hasta el 30% del impacto ambiental generado en la fase inicial de construcción (Comber *et al.*, 2012; Menna *et al.*, 2013; Wei *et al.*, 2016; Salgado y Guner, 2021).

Al respecto, existen metodologías más avanzadas, asociadas con el diseño sísmico de edificaciones basado en desempeño, las cuales expanden el enfoque actual y facilitan la comunicación del desempeño a través de medidas comprensibles para las partes interesadas. Recientemente, la Agencia Federal para el Manejo de Emergencias (FEMA, por sus siglas en inglés) presentó una metodología para evaluar el desempeño sísmico de edificaciones denominada FEMA P-58 (FEMA, 2018a). Esta metodología expresa

probabilísticamente el desempeño sísmico de una edificación en términos de costos de reparación, tiempo de reparación, número de heridos y decesos, impacto ambiental y condición de inseguridad por inestabilidad (denominadas medidas de desempeño). Además, este tipo de metodologías beneficia el *diseño sísmico sustentable*, el cual promueve un balance en el desempeño de la edificación en términos económicos, sociales y ambientales (Dong y Frangopol, 2016; Gencturk *et al.*, 2016; Park *et al.*, 2018; Passoni *et al.*, 2021). En el ámbito nacional, el gobierno mexicano promueve la sustentabilidad a través de estímulos económicos al sector productivo y la academia, de tal forma que se contribuya a la creación, desarrollo y circulación del conocimiento que impacte positivamente en la sociedad, con un enfoque en la protección del medio ambiente (Orozco, 2019).

Evidentemente la tendencia moderna en el diseño sismorresistente consiste en cuantificar el desempeño a través de medidas cuantitativas (*e.g.* costos de reparación, tiempo de reparación, impacto ambiental, etc.) y, de esta forma, permita a los responsables de la toma de decisiones considerar el nivel de daño en la edificación que están dispuestos a aceptar. De esta forma, los dispositivos de amortiguamiento viscoso surgen como una alternativa innovadora para controlar el daño en una edificación debido a un evento sísmico determinado, pues aportan amortiguamiento suplementario a la estructura, disipan energía sísmica mediante el flujo de líquidos viscosos en su interior, limitan las distorsiones de entrepiso y, entre otras cosas, actúan como elementos fusibles. En contraparte, las edificaciones estructuradas a base de pórticos resistentes a momentos brindan un amortiguamiento limitado, disipan energía a través de articulaciones plásticas en vigas y columnas (causando daño localizado) y su flexibilidad hace difícil el control de distorsiones. En este sentido, se reconoce que los sistemas de disipación de energía de fluido viscoso potencian el desempeño sísmico de las estructuras (Banazadeh *et al.*, 2017; Del Gobbo *et al.*, 2018). Básicamente, su implementación implica definir los parámetros del comportamiento histerético de los disipadores de energía, es decir, los valores de α y C asociados con la no linealidad del dispositivo y con la constante de amortiguamiento del mismo, respectivamente. Ahora bien, el desafío es la definición de los valores de α y C , pues aun satisfaciendo las demandas de resistencia y deformación en la estructura, no se asegura que las características seleccionadas para tales dispositivos sean óptimas desde un punto de vista sustentable.

En relación con lo anterior, el objetivo del presente estudio es determinar el diseño óptimo, en términos de sustentabilidad, de un conjunto de edificaciones de 28 niveles (localizadas en Acapulco Guerrero), equipadas con dispositivos de amortiguamiento viscoso, considerando que tales mecanismos benefician el desempeño estructural. Para ello, se varían las propiedades de los dispositivos de disipación de energía (*i.e.*, α y C) con el fin de establecer diversos diseños estructurales, cada uno, con una respuesta dinámica distinta. Enseguida, se evalúa el desempeño sísmico de dichas estructuras utilizando la metodología FEMA P-58 (FEMA, 2018a), una metodología establecida para el diseño sísmico basado en desempeño que favorece el diseño sísmico sustentable. Finalmente, se selecciona como diseño óptimo, desde una perspectiva sustentable, a aquella edificación donde se minimiza, de manera simultánea, la pérdida anual esperada por costos de reparación (economía), emisiones de carbono (medio ambiente) y número de heridos (social).

METODOLOGÍA

Etapa I. Para lograr el objetivo planteado, se diseña un conjunto de edificaciones de 28 niveles equipadas con disipadores de energía de fluido viscoso, donde las propiedades de tales dispositivos (*i.e.*, α y C) se varían para establecer diversas alternativas de diseño. Al respecto, existen varias normativas que proporcionan métodos simplificados para el diseño sísmico de edificios que incluyen dispositivos pasivos de disipación de energía (*e.g.*, ASCE, 2017a; GCDMX, 2020). Entre estos métodos, se encuentra el basado análisis modal espectral y fuerzas laterales equivalentes.

En este estudio, siguiendo las sugerencias de otros trabajos previamente publicados en la literatura (Ramírez *et al.*, 2001; ASCE, 2017a; Santos-Santiago *et al.*, 2020), se emplea el método basado en análisis modal espectral para establecer el diseño de los casos de estudio. Este método permite establecer iterativamente los parámetros que conforman la ley constitutiva que caracteriza el comportamiento histerético de los dispositivos de disipación de energía de fluido viscoso (Ec. 1) (Lin y Chopra, 2002):

$$F_D = C|V|^\alpha \text{sgn}(V) \quad (1)$$

donde F_D representa la fuerza del disipador; α es un exponente de amortiguamiento asociado con la no linealidad del dispositivo viscoso; C corresponde a la constante de amortiguamiento del dispositivo; V es la velocidad relativa que actúa en el disipador; y $\text{sgn}(V)$ es simplemente la función signo aplicada a la velocidad relativa.

Al respecto, el diseñador debe establecer las características de los dispositivos de amortiguamiento viscoso, es decir, los valores de la constante C y el exponente α , basándose en las propiedades dinámicas de la estructura. Por lo general, para un valor específico de α , se determina la constante de amortiguamiento de forma iterativa hasta lograr el nivel de amortiguamiento requerido (Santos-Santiago *et al.*, 2017; Santos-Santiago *et al.*, 2022). Por lo tanto, en este estudio se experimenta con diferentes valores de α y luego se calcula la constante de amortiguamiento C correspondiente. Es importante destacar que, aunque los métodos simplificados ayudan a definir los parámetros de la ley constitutiva de los dispositivos de amortiguamiento, la selección de los valores para C y α no garantiza necesariamente un desempeño sísmico óptimo, incluso si se satisfacen las demandas de resistencia y deformación de la estructura.

Etapa II. Por lo anterior, para realmente conocer los valores óptimos de C y α se realiza una serie de análisis basado en desempeño. De esta manera, se determina el desempeño en términos de pérdidas económicas, impacto ambiental (emisiones de dióxido de carbono) y número de heridos. Para ello, se utiliza la metodología FEMA P-58 (FEMA, 2018a), la cual se basa en la formulación desarrollada en el Centro de Investigación en Ingeniería Sísmica del Pacífico (PEER, por sus siglas en inglés) (Cornell y Krawinkler, 2000; Moehle y Deierlein, 2004; Yang *et al.*, 2009). La formulación del PEER, a través del teorema de probabilidad total, calcula las consecuencias producto de la acción sísmica en términos de la probabilidad de incurrir en valores específicos de medidas de desempeño (*e.g.*, pérdidas por costos de reparación, tiempo de reparación, número de heridos y decesos, impacto ambiental, etc.). Al respecto, tal aproximación puede expresarse como la triple integral mostrada a continuación (Moehle y Deierlein, 2004):

$$\lambda(DV) = \int_{im} \int_{dm} \int_{edp} G(DV|DM) dG(DM|EDP) dG(EDP|IM) |d\lambda(IM)| \quad (2)$$

donde $G(x|y)$ es la función de distribución acumulada complementaria de una variable aleatoria X dado que la variable aleatoria Y tome un valor igual a y . Por lo tanto, $dG(x|y)$ representa la derivada de dicha función de distribución. Por otro lado, $\lambda(x)$ denota la tasa media a la cual una variable aleatoria X excede un determinado valor x por unidad de tiempo. Finalmente, DV es la variable de decisión o de consecuencia (*e.g.*, costos de reparación, número de heridos, etc.); DM es la medida de daño asociada con la respuesta de la edificación; EDP es el parámetro de demanda que caracteriza la respuesta estructural y no estructural (*e.g.*, distorsiones de entrepiso, aceleración de piso, etc.); e IM es la medida de intensidad utilizada para describir el potencial de un evento sísmico (*e.g.*, $Sa(T_i)$, PGA , etc.). Al respecto, examinando la ecuación 2, se observa que la formulación del PEER consta de los siguientes análisis: *análisis de daño*, *análisis de pérdidas*, *análisis de peligro sísmico* y *análisis de la respuesta estructural*. En este aspecto, la metodología P-58 involucra, aunque no de forma puntual, cada una de los análisis identificados con anterioridad. A

continuación, se describe brevemente cada una de los pasos que incluye la metodología FEMA P-58 (FEMA, 2018a) para la evaluación del desempeño:

Paso 1. Construcción del modelo de desempeño. La construcción del modelo de desempeño es una colección organizada de datos útil para definir la vulnerabilidad de los elementos que conforman una edificación (e.g., elementos estructurales y no estructurales) y establecer las consecuencias correspondientes (e.g., económicas, ambientales, número de heridos etc.). Es decir, en este paso se debe contar con la información para precisar la distribución del daño, en los componentes que conforman una edificación, dado un nivel demanda, $G(DM|EDP)$ (i.e., funciones de vulnerabilidad) y, asimismo, establecer la distribución de la variable de consecuencia dado el nivel de daño alcanzado, $G(DV|DM)$ (i.e., funciones de consecuencia). De este modo, la construcción del modelo de desempeño aborda el *análisis de daño* y *análisis de pérdidas* identificados en la ecuación 2. Además, también conlleva la recolección de algunos datos iniciales vinculados con las dimensiones de la edificación, costos de reemplazo de la edificación, tiempo de construcción e impacto ambiental de la construcción. Igualmente, aquí también se definen las condiciones ocupacionales de la estructura y un modelo que caracterice la distribución del número de personas dentro de la misma.

Paso 2. Definición del peligro sísmico. FEMA P-58 (2018a) utiliza un análisis probabilístico de peligro sísmico para determinar la amenaza sísmica en un sitio particular. Este análisis combina las probabilidades correspondientes a que una medida de intensidad, IM , exceda un nivel de intensidad, im , dada la ocurrencia de eventos sísmicos asociados con las posibles magnitudes y ubicaciones concernientes a cada una de las zonas sísmicas que influyen en el peligro sísmico del lugar. El producto final se expresa mediante curvas de peligro sísmico, que representan la tasa media anual de excedencia relacionada con un valor de intensidad y periodo estructural específico. En esta etapa, también se seleccionan los registros sísmicos que se utilizarán para los posteriores análisis no lineales paso a paso en el tiempo. Es importante que los registros sísmicos seleccionados sean consistentes con el análisis de peligro sísmico realizado, es decir que, para un valor particular de intensidad en la curva de peligro, se usen registros sísmicos con una combinación de magnitud y distancia que potencialmente generen dicho valor de intensidad. Claramente, este paso aborda el *análisis de peligro sísmico*, $\lambda(IM)$, especificada en la ecuación 2.

Paso 3. Análisis de la respuesta de la edificación. En esta etapa se evalúa la respuesta de la estructura ante la acción sísmica y se identifican los valores de demanda estructural relacionados con el daño en los componentes de la edificación. Los parámetros de demanda comúnmente utilizados son la distorsión de entrepiso y aceleración de piso. FEMA P-58 (2018a) presenta dos métodos de análisis para estimar estos parámetros: uno simplificado para análisis estáticos lineales (ASCE, 2017b) y otro no lineal paso a paso en el tiempo. Este último método es el que se utiliza en este estudio. Claramente, este paso aborda el *análisis de la respuesta estructural*, $G(EDP|IM)$, indicada en la ecuación 2. El objetivo es ensamblar una matriz que representa los valores de demanda estructural obtenidos de un análisis asociado con cierta intensidad y los parámetros de demanda estimados en ubicaciones específicas de la edificación. Esta matriz es la semilla para generar un conjunto de demandas simuladas que se utilizan posteriormente para calcular el desempeño de la edificación. Es importante señalar que el análisis no lineal es más preciso, pero también más complejo y costoso que el método simplificado. En resumen, este paso es crucial para evaluar la respuesta de la estructura ante un evento sísmico y determinar los valores de demanda estructural que pueden causar daño en los componentes de la edificación.

Paso 4. Definición de la fragilidad al colapso. La razón principal de decesos o heridos durante un evento sísmico es producto del colapso de la edificación. Por lo tanto, para evaluar el desempeño desde esta perspectiva, se requiere establecer la probabilidad al colapso de la estructura. Para ello, se calcula la denominada curva de fragilidad al colapso, la cual indica la probabilidad al colapso de la edificación dado un nivel de intensidad. Al respecto, FEMA P-58 (FEMA, 2018a) presenta distintas aproximaciones para

obtener la curva de fragilidad al colapso; en este sentido, el método con mayor aproximación es el basado en análisis dinámicos incrementales, IDA (Vamvatsikos y Cornell, 2001). Este consiste en realizar una serie de análisis no lineales paso a paso en el tiempo asociados con múltiples niveles de intensidad que produzcan desde una respuesta lineal hasta intensidades que provoquen el colapso. Adicionalmente, en este paso, también deben precisarse los modos de colapso aunado con su respectiva probabilidad de ocurrencia. Asimismo, debe determinarse el área de afectación para cada entrepiso y su correspondiente probabilidad de que las personas en dichas áreas de colapso resulten heridas o perezcan.

Paso 5. Cálculo del desempeño. La metodología FEMA P-58 (2018a), para evaluar el desempeño sísmico de las estructuras y considerar las incertidumbres inherentes en su estimación, utiliza el método de Monte Carlo y una matriz de demandas simuladas (denominadas *realizaciones*). El cálculo del desempeño comienza con la primera realización y se determina si se produce o no el colapso de la estructura. En caso de colapso, se estiman las pérdidas asociadas con los valores de reemplazo, de lo contrario, se evalúa el nivel de daño y se calculan las pérdidas correspondientes. Este proceso se repite para múltiples realizaciones, y los valores de pérdida se ordenan ascendentemente para obtener una función de distribución de la variable de decisión de interés. Para facilitar el proceso, se utiliza un software llamado: herramienta de cálculo para la evaluación del desempeño (PACT, por sus siglas en inglés). PACT (FEMA P-58b) es una herramienta electrónica, y repositorio de funciones de fragilidad y consecuencia, que realiza los cálculos probabilísticos y de acumulación de pérdidas descritos en la metodología FEMA P-58 (2018a). En esta investigación se utilizó PACT para todos los cálculos probabilísticos.

IMPACTO AMBIENTAL

Aunque la cuantificación del impacto ambiental se encuentra de forma implícita en el paso de *Cálculo del desempeño*, su determinación se aborda de forma explícita a continuación. El impacto ambiental se refiere a los cambios en el medio ambiente ocasionados por la actividad humana o la naturaleza. La metodología FEMA P-58 (FEMA, 2018a) utiliza dos métricas para caracterizar el impacto ambiental: emisiones de dióxido de carbono equivalente (kg-CO₂eq) y energía necesaria para la producción de los materiales (MJ) (también conocidas como carbón y energía incorporados, respectivamente). En este sentido, la evaluación del impacto ambiental, relacionado con la construcción inicial de la edificación o acciones de reparación producto del daño sísmico, se determina mediante un análisis de ciclo de vida (ACV). Este análisis estima el impacto ambiental que puede tener un producto o proceso sobre el medio ambiente durante una etapa específica o durante toda su vida útil.

La metodología FEMA P-58 (FEMA, 2018a) cuantifica el impacto ambiental, producto de las acciones de reparación requeridas para restaurar una edificación a su condición inicial (*i.e.*, antes de ser dañada sísmicamente), directamente de la estimación de los costos de reparación y mediante un ACV basado en el modelo económico insumo-producto. Este último relaciona la cantidad de dinero que se gasta entre los sectores industriales que conforman la economía de un país con el impacto ambiental que genera la operación de tales sectores. Al respecto, este procedimiento incluye los siguientes pasos: 1) estimar los costos resultantes de las acciones de reparación que se lleven cabo para resarcir el daño en la edificación como consecuencia de la acción sísmica; 2) identificar los sectores industriales involucrados en tales actividades de restauración junto con sus respectivos factores de impacto ambiental por unidad monetaria gastada (*e.g.*, 0.50 kg CO₂eq/US\$); 3) desglosar los costos de reparación estimados y asignarlos en los diferentes sectores industriales identificados; 4) sumar los costos asociados con cada uno de los sectores industriales establecidos y 5) multiplicar el costo obtenido en cada uno de los sectores industriales por el factor de impacto y, finalmente, sumar los impactos de todos los sectores para obtener el impacto ambiental total.

De esta manera, similar al costo total de reemplazo de la edificación, deben establecerse las cantidades de reemplazo en términos ambientales (*i.e.*, en términos de carbón y energía incorporados). Esto significa definir el impacto ambiental inicial por la construcción de una edificación o el reemplazo dado el colapso de la misma. En esta investigación, tales cantidades de reemplazo se establecieron a través de un ACV basado en el modelo económico insumo-producto a un nivel más generalizado. Este enfoque es más simple y, aunque menos preciso, permite realizar el análisis sin información detallada sobre el inventario de la estructura y sus costos de construcción. Básicamente, este método consiste en multiplicar el costo total de la edificación por el factor de impacto ambiental asociado con la construcción de una estructura con un destino ocupacional específico (*e.g.*, uso de oficinas, residencial, etc.).

En relación con lo anterior, existen bases de datos (*e.g.*, CMU GDI, 2008; Yang *et al.*, 2017) que precisan factores de impacto ambiental asociados con el número de dólares gastados en los diversos sectores industriales presentes en la economía de un país y, asimismo, definen factores de impacto ambiental relacionados con la construcción de estructuras con usos ocupacionales determinados. En este aspecto, la metodología FEMA P-58 (FEMA, 2018a) estima las consecuencias ambientales, una vez calculados los costos de reparación dado el estado de daño en los distintos componentes de la edificación, a través de un ACV (tal como se describió previamente) y utiliza la base de datos desarrollada por Yang *et al.* (2017). Esta base de datos vincula la interacción económica entre los diversos sectores industriales de los Estados Unidos con las emisiones ambientales para tales sectores. Igualmente, provee factores de impacto ambiental relacionados con la construcción de edificios con usos ocupacionales específicos.

En relación con lo anterior, los países en vías de desarrollo, incluyendo México, carecen de una base de datos adecuada para caracterizar el impacto ambiental en el sector de la construcción (Güereca *et al.*, 2015; Quispe *et al.*, 2017). Para evaluar el impacto ambiental de las edificaciones, se suelen utilizar inventarios de ciclo de vida de países desarrollados (Reynaga *et al.*, 2013; Güereca *et al.*, 2015; Contreras-Jiménez *et al.*, 2017; Gámez-García *et al.*, 2019; Colín, 2020). Para abordar esta limitación, en este estudio se utilizan los valores de consecuencia ambiental disponibles en la base de datos del PACT (FEMA P-58b), la cual se basa en el modelo desarrollado por Yang *et al.* (2017). Asimismo, se emplea el modelo de Yang *et al.* (2017) para definir las cantidades de reemplazo asociadas con las emisiones de carbono y energía incorporada en la fase inicial de construcción de la estructura. Por otro lado, el impacto ambiental se presenta únicamente a través de las emisiones de carbono (carbón incorporado/ gases de efecto invernadero/ potencial de calentamiento global). En este sentido, se ha reconocido que el CO₂ equivalente es un gran predictor de otros indicadores de impacto ambiental relevantes a la hora de evaluar el impacto debido a acciones de reparación en edificaciones sísmicamente dañadas (Simonen *et al.*, 2018).

ETAPA I: DISEÑO ESTRUCTURAL PARA LOS CASOS DE ESTUDIO

México es un país sísmicamente activo, de acuerdo con el Servicio Sismológico Nacional (SSN, 2023), solo en el año 2022 y 2021 se registraron aproximadamente 30,000 y 29,000 eventos sísmicos, respectivamente. En este sentido, alrededor del 80% de los eventos sísmicos reportados ocurrieron cerca de los estados que conforman la costa del Pacífico mexicano. De tal forma, el diseño estructural de las edificaciones que se construyen en dicha zona lo rige las fuerzas laterales que imponen los sismos. Por lo tanto, la ubicación de la estructura se asumió en el puerto de Acapulco, Guerrero y, apropiadamente, se le asignó un uso destinado a hotelería.

Los casos de estudio corresponden a una edificación de 28 niveles que utiliza marcos de concreto y acero en sección compuesta. Las Figuras 1a y 1b muestran la configuración de la estructura, mientras que la Figura 1c señala la ubicación de los disipadores de energía. Para mejorar su comportamiento a flexión, se integró un sistema de diagonales (conocido como *outrigger*) en los niveles 15 y 28, tanto en sentido longitudinal como transversal. En un principio, se realizó el diseño sísmico de la estructura de forma

convencional, siguiendo las recomendaciones del Manual de Diseño de Obras Civiles para el diseño por sismo presentado por la Comisión Federal de Electricidad, CFE (CFE, 2015). Este diseño preliminar, sin la consideración de un sistema de amortiguamiento suplementario, se denominó “edificio convencional”.

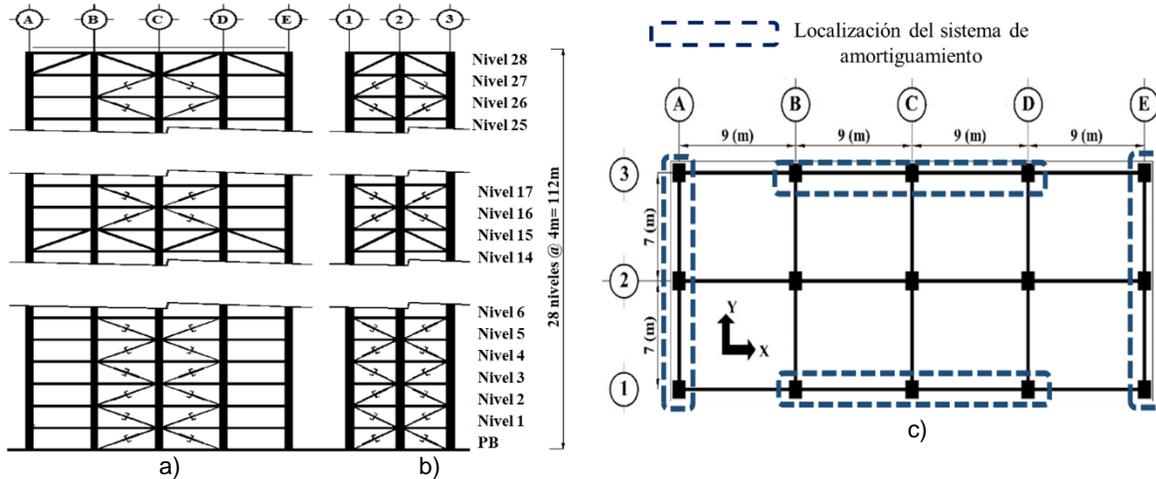


Figura 1. Configuración de la edificación analizada: a) elevación en dirección X (Dir. longitudinal); b) elevación en dirección Y (Dir. transversal); y c) vista en planta

Enseguida, se utilizó el método simplificado basado en el análisis modal espectral para el diseño de las edificaciones con dispositivos de fluido viscosos, tal como se mencionó anteriormente y de acuerdo a lo sugerido por otros trabajos de investigación (Ramírez *et al.*, 2001; ASCE, 2017a; Santos-Santiago *et al.*, 2020). De este modo, se llevaron a cabo diversos análisis simplificados variando el exponente α desde 0.1 a 1.0 en incrementos de una décima. Así, se determinó la constante C (ecuación 1) que permitiera alcanzar un amortiguamiento efectivo del 20% del amortiguamiento crítico.

En relación con lo anterior, se generaron diez casos de estudio adicionales al edificio convencional, identificados como “E” seguido del valor del exponente α . Por ejemplo, E-01 corresponde a la edificación con un valor de α igual a 0.1, E-00 es la estructura convencional sin dispositivos de disipación de energía, y E-10 representa el edificio con un sistema de amortiguamiento viscoso lineal ($\alpha = 1.0$). El diseño de las edificaciones con y sin disipadores se llevó a cabo mediante el software ETABS 18 (CSI, 2018). Al respecto, la Tabla 1 a Tabla 5 contienen las secciones resultantes para el edificio convencional y, asimismo, para las estructuras que incluyen dispositivos de amortiguamiento suplementario. Adicionalmente, para el caso de las columnas se incluye un superíndice que indica los porcentajes de acero. Hasta aquí, se ha culminado con la Etapa I, que consistió en el diseño de un conjunto de edificaciones de 28 niveles equipadas con dispositivos de amortiguamiento viscoso.

Tabla 1. Columnas para edificio convencional (izquierda) y con disipadores (derecha)

Sección	Niveles	f _c (kg/cm ²)	E _c (kg/cm ²)	Sección	Niveles	f _c (kg/cm ²)	E _c (kg/cm ²)
C1 (1.10x1.25) ^{2.8%}	PB-N3	500	288885	C1 (0.90x1.10) ^{3.6%}	PB-N5	500	288885
C1 (1.10x1.25) ^{1.0%}	N3-N12			C1 (0.90x1.00) ^{1.6%}	N5-N10		
C2 (0.95x1.10) ^{1.0%}	N12-N18			C2 (0.90x0.90) ^{1.7%}	N10-N15		
C3 (0.90x1.05) ^{1.0%}	N18-N25			C3 (0.80x0.90) ^{2.0%}	N15-N20		
C6 (0.70x0.70) ^{1.0%}	N25-N28	350	261916	C6 (0.70x0.70) ^{1.0%}	N20-N28	350	261916

Tabla 2. Vigas (dirección X) para edificio convencional (izquierda) y con disipadores (derecha)

Sección	Niveles	f _y (kg/cm ²)	E _s (kg/cm ²)	Sección	Niveles	f _y (kg/cm ²)	E _s (kg/cm ²)
W30X116	N1-N8	3515	2039000	W30X90	N1-N6	3515	2039000
W30X99	N9-N13			W27X84	N7-N14		
W27X84	N14			W24x76	N15-N26		
W24x76	N15-N17			W27x84	N26-N28		
W27x84	N18-N23						
W24x76	N24-N26						
W27x84	N27-N28						

Tabla 3. Vigas (dirección Y) para edificio convencional (izquierda) y con disipadores (derecha)

Sección	Niveles	f _y (kg/cm ²)	E _s (kg/cm ²)	Sección	Niveles	f _y (kg/cm ²)	E _s (kg/cm ²)
W33X130	N1-N13	3515	2039000	W30X99	N1-N2	3515	2039000
W30X99	N14-N15			W30X108	N3-N7		
W30x116	N15-N23			W30X99	N8-N19		
W30X99	N24-N26			W27x84	N20-N23		
W24X76	N27-N28			W24X76	N24-N28		

Tabla 4. Sistema *outrigger* para edificio convencional (izquierda) y con disipadores (derecha)

Sección	Niveles	f _y (kg/cm ²)	E _s (kg/cm ²)	Sección	Niveles	f _y (kg/cm ²)	E _s (kg/cm ²)
W12x96	N14-15	3515	2039000	W12x96	N14-15	3515	2039000
W12x96	N27-28			W12x96	N27-28		

Tabla 5. Propiedades de los amortiguadores para edificios con disipadores

Caso de estudio	Exponente amortiguamiento, α	Constante amortiguamiento, C (ton (s/m) ^{α})	Caso de estudio	Exponente amortiguamiento, α	Constante amortiguamiento, C (ton (s/m) ^{α})
E-01	0.1	150	E-06	0.6	696
E-02	0.2	207	E-07	0.7	925
E-03	0.3	284	E-08	0.8	1221
E-04	0.4	386	E-09	0.9	1595
E-05	0.5	520	E-10	1.0	2070

ETAPA II: EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO PARA LOS CASOS DE ESTUDIO

Modelo de desempeño para los casos de estudio (*Paso 1*)

A continuación, se dará inicio a la Etapa 2, que se enfoca en la evaluación del desempeño sísmico de los casos de estudio utilizando la metodología de FEMA P-58 (2018a). Previamente se indicó que la construcción del modelo de desempeño implica la recolección de datos relacionados con el tamaño de la estructura, cantidades de reemplazo, uso ocupacional y, fundamentalmente, identificar los bienes de la edificación y su vulnerabilidad. Dentro de este contexto, deben establecerse las dimensiones en planta y elevación de la estructura, las cuales se definieron conforme a la Figura 1. También, requiere definirse el costo total de reemplazo de la estructura (*i.e.*, su costo de reconstrucción). Para ello, es necesario una cuantificación minuciosa de las partes que conforman el edificio. Para los casos de estudio se incluyeron los costos asociados con los elementos estructurales, conexiones, fabricación y montaje, instalaciones eléctricas y pluviales, vidrio templado de fachada, desperdicios, etc. Además, en el costo total de reemplazo debe incluirse, dado el colapso de la estructura, los costos asociados con la demolición y remoción de escombros del lugar. En relación con lo anterior, la demolición y remoción de residuos puede incrementar entre 20% y 30% el costo total de reemplazo, en este estudio se utilizó un incremento del 25% (FEMA, 2018a).

Además, al igual que el costo total de reemplazo de la edificación, también es necesario establecer las cantidades de reemplazo en términos ambientales. Para ello, se empleó una base de datos desarrollada por Yang *et al.* (2017) que proporciona distintos factores de impacto ambiental relacionados con la construcción de edificios con diversos usos ocupacionales. Según esta base de datos, la construcción de un hotel genera una cantidad de emisiones de carbono y energía incorporada por dólar gastado de 0.326 kg CO₂eq/US\$ y 5.791 MJ/US\$, respectivamente. Es importante destacar que esta base de datos corresponde a la economía de Estados Unidos en el año 2013. Por lo tanto, considerando la inflación y el cambio del valor del dólar entre junio de 2013 y enero de 2023, que es de 1.28 según el U.S. Bureau of Labor Statistics (GEUA, 2022), las cantidades de emisiones de carbono y energía incorporada para enero de 2023 son de 0.254 kg CO₂eq/US\$ y 4.524 MJ/US\$, respectivamente. Posteriormente, estos factores de impacto ambiental se multiplican por el costo total de reemplazo de la edificación, lo que permite obtener las cantidades de reemplazo asociadas con emisiones de carbono y energía incorporada para los casos de estudio.

Por otro lado, la construcción del modelo de desempeño también requiere especificar el uso ocupacional de la estructura. Lo anterior permite establecer un modelo que represente la distribución de las personas dentro de la misma en función del día y la hora, lo cual es útil para evaluar el potencial de heridos y decesos cuando la estructura se encuentra ocupada. Previamente, se indicó que la edificación tiene un uso destinado a hotelería. Al respecto, Seligson, 2008 provee modelos poblacionales relacionados con distintos usos ocupacionales, entre estos, se encuentra disponible uno que se adapta al caso de estudio. Así, la Figura 2 muestra el modelo seleccionado que define la distribución del número de personas dentro de la edificación para días entre semana y fines de semana en función de la hora del día. El modelo establece un valor máximo de 2.5 personas por, aproximadamente, 100 m² y conlleva una dispersión de 0.2.

Asimismo, precisar el uso ocupacional de la estructura facilita estimar la cantidad de componentes no estructurales y contenidos que se encuentren en la edificación (ventanas, muros divisorios, plafones, elevadores, tuberías relacionadas con HVAC, etc.). Sobre este particular, la metodología P-58 presenta un estudio de, aproximadamente, 3000 edificaciones con distintos usos ocupacionales, cuyo resultado se tradujo en una herramienta que brinda las cantidades promedio de componentes no estructurales y contenidos en una estructura asociado con su uso. Consiguientemente, en este estudio se utilizó dicha herramienta para abastecer a la estructura de los componentes mencionados con anterioridad (FEMA, 2018b).

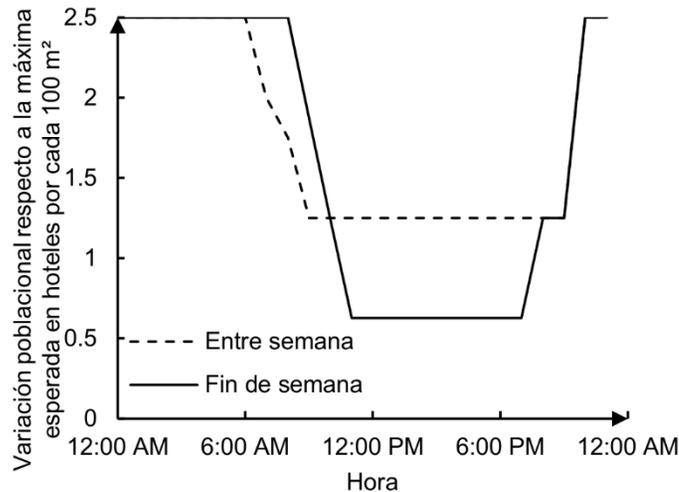


Figura 2. Variación del número de personas en la edificación (relativo al valor máximo esperado de personas) en función de la hora y día para uso ocupacional de hotel

Finalmente, debe establecerse la vulnerabilidad de cada uno de los elementos que conforman la edificación: componentes estructurales y no estructurales. La vulnerabilidad se define mediante curvas de fragilidad, las cuales establecen la probabilidad de incurrir en un determinado estado de daño dada la ocurrencia de un parámetro de demanda estructural (Baker, 2015). PACT en su base de datos (FEMA, 2018b) proporciona una serie de curvas de fragilidad para distintos elementos estructurales y no estructurales, así como las consecuencias asociadas a los diferentes niveles de daño en términos de costos de reparación, tiempo de reparación, impacto ambiental, entre otros. Estas curvas de fragilidad se elaboraron mediante datos de pruebas experimentales (*e.g.*, Deierlein y Victorsson, 2009; Lowes y Li, 2009).

En este sentido, la metodología FEMA P-58 recomienda, en caso de no contar con las fragilidades de los elementos que componen la estructura analizada, una serie de protocolos para examinar experimentalmente el desempeño de componentes estructurales y no estructurales de una edificación y, de esta manera, definir su vulnerabilidad a través de curvas de fragilidad (FEMA, 2007; FEMA, 2018a).

En este estudio, se emplearon las funciones de fragilidad disponibles en la base de datos del PACT (FEMA, 2018b) para los casos de estudio, ya que se consideran compatibles debido a su origen experimental y a su naturaleza probabilística, que incluye la incertidumbre asociada con la variabilidad en las técnicas constructivas, la calidad de los materiales, el diseño estructural, la eficiencia del parámetro de demanda para predecir el daño, entre otros factores. Además, la dispersión contenida en las funciones de fragilidad ayuda a subsanar el hecho de que los especímenes ensayados no se hayan construido con técnicas y calidad de materiales locales, lo que hace que los datos disponibles sean una buena aproximación para caracterizar la vulnerabilidad de los componentes estructurales y no estructurales de los casos analizados. Por otro lado, en dicha base de datos no se incluyen curvas de fragilidad para los amortiguadores viscosos. Por lo tanto, la vulnerabilidad de los disipadores viscosos se incorpora siguiendo el trabajo de Santos-Santiago *et al.* (2022), que determinó analíticamente un par de curvas de fragilidad relacionadas con dos niveles de daño y las consecuencias asociadas a los mismos.

En dichos protocolos la fragilidad de los especímenes (*i.e.*, componentes estructurales y no-estructurales) se establece a través de ensayos experimentales cuasi-estáticos. Por lo tanto, más que reflejar un entorno sísmico particular, se busca que los ciclos de fuerza o deformación estén controlados y preestablecidos, donde el objetivo es identificar claramente la relación entre los estados de daño definidos

y los parámetros de demanda seleccionados para caracterizar la vulnerabilidad de los especímenes (FEMA, 2007).

Por último, las funciones de consecuencia asociadas con los costos de reparación fueron desarrolladas para la zona norte de California en Estados Unidos en el año 2011. De tal forma, es lógico pensar que dichos costos deberían ajustarse a la región geográfica donde se ubica la estructura y, adicionalmente, ajustarse a la situación económica actual. Por lo tanto, para considerar la inflación, el cambio en el valor del dólar de junio del 2011 a enero del 2023 es de 1.33 de acuerdo con los datos reportados por la U.S. Bureau of Labor Statistics (GEUA, 2023). Por otro lado, con la finalidad de ajustar los costos de reparación indicados en la metodología FEMA P-58 (2018b) a la situación local, se utilizó la siguiente aproximación (Porter *et al.*, 2015; Silva *et al.*, 2020):

$$C_{costo\ local}^i = C_{costo\ EUA}^i [(1 - f_{lab}) \cdot r_{mat} + f_{lab} \cdot r_{lab}] \quad (3)$$

donde $C_{costo\ local}^i$ representa el costo promedio de reparación (unitario) en el contexto local; $C_{costo\ EUA}^i$ es el costo promedio de reparación (unitario) en los EUA; f_{lab} representa la fracción del costo unitario en Estados Unidos (EUA) asociado con la mano de obra. Según Porter *et al.* (2015), si no se cuenta con información más precisa, se recomienda utilizar un valor de 0.9 para acciones de reparación de elementos arquitectónicos, estructurales, y sistemas mecánicos, eléctricos y de plomería. Para las acciones que implican el reemplazo de componentes arquitectónicos y estructurales, se recomienda un valor de 0.5. Por último, para las acciones que implican el reemplazo de sistemas mecánicos, eléctricos y de plomería, se sugiere un valor de 0.1. Es importante destacar que estos valores se relacionan con la importancia de los materiales y el costo de la mano de obra necesarios para llevar a cabo las reparaciones. Por otra parte, el parámetro r_{mat} representa la razón entre el costo local de los materiales donde se construye y el costo de los mismos en EUA. Similarmente, r_{lab} representa la relación entre el costo local de la mano de obra y el costo de la misma en EUA. Estos parámetros se definen con base en un informe de Turner y Townsend (2021) que compara los costos de construcción en diversas ciudades del mundo. En este sentido, las ciudades de referencia fueron San Francisco (California) y Ciudad de México.

Caracterización del peligro sísmico y selección de acelerogramas (Paso 2)

Para la evaluación del desempeño se dispone de tres diferentes aproximaciones: basado en intensidad, basado en escenario y basado en el tiempo (FEMA, 2018a). El método basado en intensidad evalúa el desempeño probable de la estructura asumiendo que está sujeta a una intensidad específica. A su vez, el método basado en escenario determina el desempeño de la edificación considerando que está sujeta a un evento sísmico con magnitud y distancia particulares. Por su parte, el método basado en el tiempo establece el desempeño probable de la edificación en un periodo de tiempo considerando todos los eventos sísmicos que pueden ocurrir en dicho periodo y, además, considerando la probabilidad de ocurrencia asociada con cada uno de esos eventos sísmicos. Adicionalmente, en este método se incluye la incertidumbre asociada con la magnitud y distancia de los posibles eventos sísmicos, asimismo, la intensidad que ellos puedan generar. Es evidente que la evaluación del desempeño sísmico basado en el tiempo requiere de un análisis probabilista de peligro sísmico.

En relación con lo anterior, en esta investigación se realizó un análisis basado en el tiempo. En la Figura 3 se presenta la curva de peligro sísmico empleada en este estudio, la cual especifica la tasa media anual de excedencia de $Sa(T_1)$ correspondiente al sitio de interés (Acapulco, Gro.) (Carrillo, 2016) y al periodo fundamental de la edificación. En la figura se observa que la curva está dividida en diez intervalos equivalentes de $Sa(T_1)$ delimitados por marcadores triangulares. Del mismo modo, se identifica con círculos la tasa de excedencia asociada con la intensidad en los puntos medios de cada intervalo. Así, para cada

intervalo (triángulos) de la curva de peligro sísmico, se evalúa el desempeño utilizando el método basado en intensidad, donde la intensidad objetivo corresponde al valor medio de cada intervalo (círculos). Enseguida, los resultados de desempeño obtenidos se ponderan por la tasa de excedencia concerniente a cada intensidad objetivo. Los resultados de estas evaluaciones se suman para cada uno de los intervalos cuyo resultado es la tasa media anual de excedencia de una medida de desempeño.

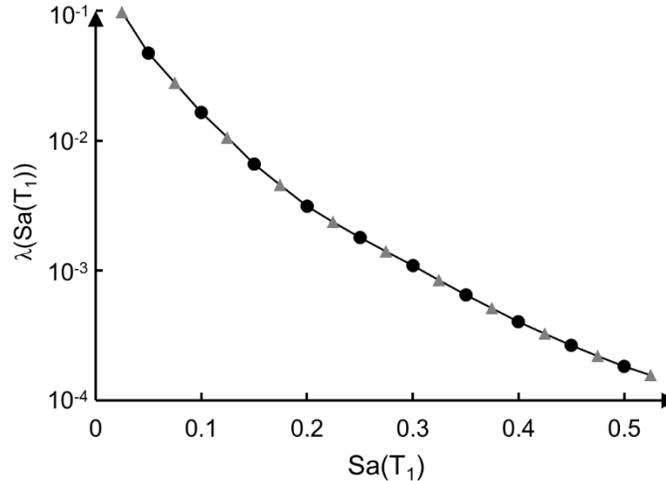


Figura 3. Tasa media anual de excedencia (λ) de $Sa(T_1)$ para el sitio de referencia, asociada con el periodo fundamental de la estructura $T_1=4.7s$

Adicionalmente, en esta etapa se compilaron un conjunto de acelerogramas pertenecientes a eventos sísmicos interplaca e intraplaca captados en terreno firme por estaciones acelerométricas cercanas al sitio de interés (Acapulco, Gro.). El objetivo es que exista consistencia entre el sitio donde se desplanta la estructura y los sitios donde se registra el movimiento del terreno. Los acelerogramas seleccionados se utilizaron para realizar análisis no lineales paso a paso en el tiempo asociados con los casos de estudio definidos previamente. Estos registros fueron proporcionados por la Red Acelerográfica del Instituto de Ingeniería de la UNAM (RAII-UNAM) y corresponden a eventos sísmicos con magnitudes de momento (M_w) iguales o superiores a 6.5 y distancias epicentrales alrededor de 30 km (Tabla 1).

Tabla 6. Registros sísmicos utilizados para los análisis no lineales

Nombre	Estación	Fecha	Latitud	Longitud	M_w	Profundidad
EQ-01	COYC	14/09/1995	16.31	98.88	7.2	22
EQ-02	COYC	11/01/1997	17.91	103.04	6.9	16
EQ-03	COYC	15/06/1999	18.18	97.51	6.5	69
EQ-04	COYC	30/09/1999	15.95	97.03	7.1	17
EQ-05	COYC	12/12/2011	17.84	99.98	6.5	58
EQ-06	ACAD	14/09/1995	16.31	98.88	7.2	22
EQ-07	ACAC	14/09/1995	16.31	98.88	7.2	22
EQ-08	ACAD	14/09/1995	16.31	98.88	7.2	22
EQ-09	ACAD	11/01/1997	17.91	103.04	6.9	16
EQ-10	ACAD	15/06/1999	18.18	97.51	6.5	69
EQ-11	ACAD	30/09/1999	15.95	97.03	7.1	17
EQ-12	ACAD	11/12/2011	17.84	99.98	6.5	58

Cada registro sísmico fue sometido a una corrección de línea base y se le aplicó un filtro de paso banda con frecuencias de corte de 0.1 Hz y 10 Hz. Además, se ajustó la duración de los movimientos para que corresponda a un intervalo del 5% al 95% de la intensidad de Arias. De este modo, la Figura 4 muestra los espectros de respuesta de pseudo aceleración para cada uno de los registros sísmicos compilados.

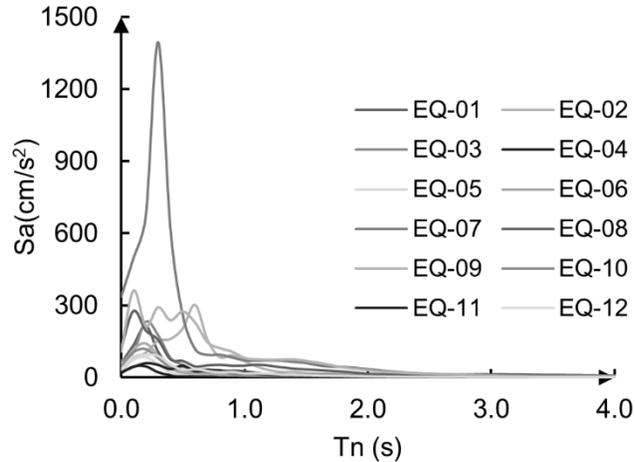


Figura 4. Espectros de respuesta de pseudo aceleración asociados a los registros sísmicos indicados en la Tabla 6.

Por otro lado, los acelerogramas seleccionados se modificaron a través de factores de escala de tal forma que al calcular el espectro de aceleraciones se obtenga el nivel de intensidad requerido. Lo anterior es una metodología habitual a la hora de realizar análisis no lineales tiempo historia (Günay y Mosalam, 2013).

Los registros sísmicos se escalaron usando la medida de intensidad Sa_{avg} (Baker y Cornell, 2006). Sa_{avg} se argumenta como gran predictor de la respuesta para sistemas estructurales no lineales, para estructuras con influencia de sus modos superiores y comportamiento degradante (Bianchini *et al.*, 2009; Tsantaki *et al.*, 2012; Eads *et al.*, 2015; Kazantzi y Vamvatsikos, 2015; Kohrangi *et al.*, 2018). Al respecto, Sa_{avg} se expresa de la siguiente forma:

$$Sa_{avg}(T_1 \dots T_N) = \left(\prod_{i=1}^N Sa(T_i) \right)^{1/N} \quad (4)$$

donde Sa_{avg} es la media geométrica entre valores de aceleración espectral, asociada con N número períodos, en un intervalo comprendido entre un periodo inicial T_I y un periodo final T_N . Al respecto, para el periodo inicial se consideró 0.2 veces el periodo de la estructura ($T_I = 0.2T_e$) y, para el periodo final, 1.5 veces el periodo de la edificación ($T_N = 1.5T_e$). Lo anterior se estableció conforme a las Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo (GCDMX, 2020).

Respuesta estructural para los casos de estudio (Paso 3)

Tal como se estableció previamente, la determinación de la respuesta estructural es esencial en la evaluación del desempeño de las edificaciones. Para lograr este propósito, en este estudio se utilizó el método de análisis no lineal paso a paso en el tiempo. Aunque los diseños estructurales presentados en secciones precedentes son útiles para establecer las secciones que conforman la edificación, la respuesta no

lineal de los casos de estudio (*i.e.*, E-00 a E-10) se obtuvo mediante el software Ruaumoko 3D (Carr, 2015). Este programa permite realizar de manera sistemática múltiples análisis no lineales de una estructura sometida a diferentes registros sísmicos.

Las vigas y columnas que conforman la edificación se modelaron como elementos tipo barra, asimismo, se les asignó un modelo de plasticidad concentrada para caracterizar su comportamiento no lineal. Para este fin, los modelos de comportamiento histerético empleados para definir el comportamiento no lineal de vigas y columnas fueron Ramberg-Osgood y Takeda modificado, respectivamente (Ramberg y Osgood, 1943; Takeda *et al.*, 1970). Los dispositivos de amortiguamiento viscoso se modelaron como elementos tipo *damper*, con valores de constante de amortiguamiento C y exponente α determinados según lo descrito anteriormente.

Se asumió un 2% de amortiguamiento para todos los modos que influyen en la respuesta de la edificación utilizando el modelo de amortiguamiento de Rayleigh. Se incluyeron los efectos de segundo orden ($P-\Delta$) y se supuso un empotramiento perfecto en la base de la edificación, ya que no se consideraron los efectos de la interacción suelo-estructura debido a que se asumió que la estructura se encuentra sobre un terreno rígido.

El propósito en esta etapa es obtener la respuesta no lineal para los casos de estudio (*i.e.*, E-00 a E-10). Para este fin, como ya se mencionó, las edificaciones se modelaron en el programa Ruaumoko 3D (Carr, 2015) y se sometieron a 12 parejas de acelerogramas (Tabla 6) escalados para diferentes niveles de intensidad tal como se describió en la sección anterior. El primer objetivo de estos análisis fue determinar los desplazamientos de entrepiso y las aceleraciones de piso. La Figura 5 presenta las distorsiones máximas obtenidas para cada uno de los entrepisos de la estructura E-06 (*i.e.*, $\alpha=0.6$) en dirección E-O. Estos resultados se obtuvieron al someter la edificación al conjunto de registros sísmicos (Tabla 6) escalados a un nivel de intensidad de 0.50g (*i.e.*, ultimo círculo en la Figura 3).

En general, los valores máximos de las distorsiones de entrepiso y aceleraciones de piso se calcularon para ambas componentes ortogonales (*i.e.*, N-S y E-O) y, asimismo, para cada uno de los valores de intensidad identificados en la curva de peligro sísmico (círculos, Figura 3). Además, lo anterior se realizó para cada uno de los casos de estudio (E-00 a E-10).

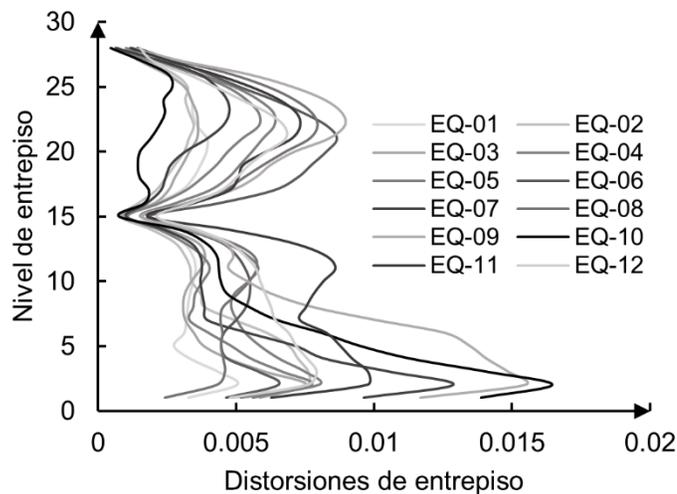


Figura 5. Distorsiones máximas de entrepiso para el caso E-06 (*i.e.*, $\alpha=0.6$) producto de los registros sísmicos escalados para una intensidad de 0.50g

La figura anterior es una representación visual de los resultados; sin embargo, lo que realmente se requiere es ensamblar una matriz de parámetros de demanda donde las columnas estén asociadas a vectores de demanda pertenecientes a cada nivel de la edificación y, por su parte, los vectores fila estén relacionados con la respuesta que produce cada uno de los registros sísmicos. Esta matriz es la semilla para generar un conjunto de demandas simuladas que, subsecuentemente, se utilizan para calcular el desempeño. Así, la Tabla 7 muestra a modo de ejemplo la estructura de dicha matriz.

Tabla 7. Ejemplo de Matriz de EDP para los distintos registros sísmicos (E-06, intensidad 0.50g)

Registro sísmico	EDP 1	EDP 2	EDP 3	EDP 4	...	EDP 28
EQ-01	0.0032	0.0050	0.0043	0.0033	...	0.0007
EQ-02	0.0048	0.0075	0.0076	0.0072	...	0.0005
EQ-03	0.0058	0.0075	0.0060	0.0047	...	0.0007
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
EQ-12	0.0047	0.0075	0.0079	0.0075	...	0.0015

Análisis dinámicos incrementales y curva de colapso (Paso 4)

En la sección anterior se llevaron a cabo análisis no lineales para obtener la respuesta sísmica de las edificaciones y construir una matriz de parámetros de demanda estructural, necesaria para generar conjuntos de demandas simuladas utilizados en la evaluación del desempeño. Además, estos análisis permiten ejecutar Análisis Dinámicos Incrementales (IDA)(Vamvatsikos y Cornell, 2001), que proporcionan información sobre la curva de fragilidad al colapso y permiten evaluar el desempeño en términos de heridos y decesos.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos de una serie de IDAs. Se destaca que los acelerogramas fueron escalados para producir niveles de intensidad que van desde 0.05g hasta 2.0g (en incrementos de 0.05g). Las Figuras 6a y 6b presentan los resultados de los IDAs para los casos de estudio E-04 y E-08, respectivamente. Las líneas continuas representan la respuesta, en términos de la distorsión máxima que ocurre en cualquiera de los entrepisos, obtenida para cada uno de los acelerogramas escalados hasta que se produzca el colapso de la estructura. La línea discontinua está asociada con el promedio de la respuesta estimada para cada registro sísmico, que se puede considerar como una curva de capacidad.

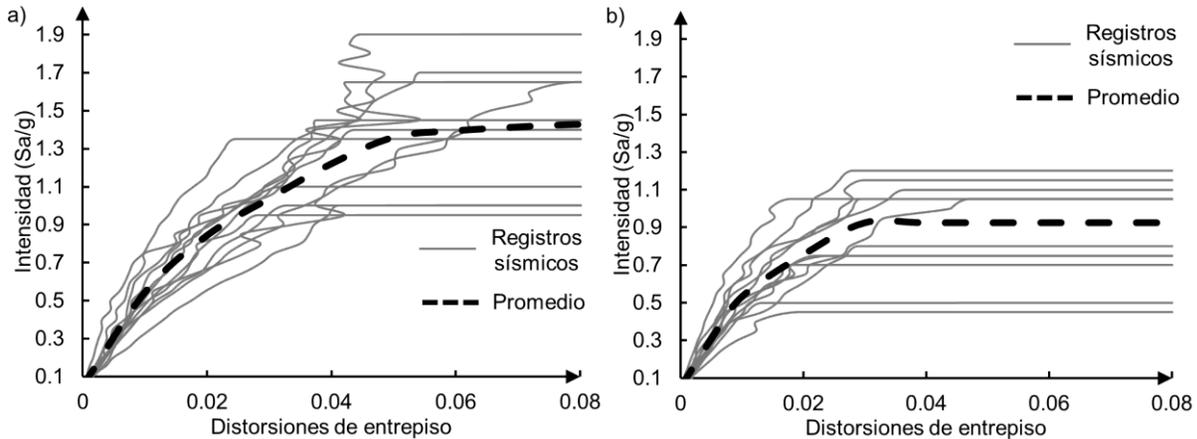


Figura 6. Análisis dinámicos incrementales asociados con los registros sísmicos de la Tabla 6. a) caso E-04 y b) E-08

En general, todas las curvas exhiben una región elástica que finaliza una vez que ocurre la primera articulación plástica. Posterior a la primera incursión no lineal, hay curvas que representan un *ablandamiento* del sistema donde los desplazamientos se incrementan rápidamente hasta que ocurre el colapso de la estructura. Asimismo, hay curvas que exhiben patrones sucesivos de *ablandamiento* y *endurecimiento*, sin embargo, eventualmente se genera el colapso de la edificación. Para esta investigación, se establece que el colapso de la estructura se produce cuando: a) se alcanzan niveles de intensidad superiores a 2.0g; b) se produce un error de convergencia que genera valores de respuesta excesivos; y c) la pendiente de la recta tangente de la curva es menor o igual al 20% de la pendiente elástica, según lo propuesto por Vamvatsikos y Cornell, (2001).

A través de los resultados obtenidos es posible identificar el número de colapsos que se produce para cada valor de intensidad. De tal forma, la probabilidad al colapso dado un determinado nivel de intensidad, $P(C|IM)$, se puede calcular de la siguiente manera:

$$P(C|IM) = \frac{n}{N} \tag{5}$$

donde n es el número de análisis, realizados para una intensidad específica, en los cuales se alcanzó el colapso de la estructura. Por su parte, N es el número total de análisis determinados para tal intensidad. En este sentido, las Figuras 7a y 7b muestran los valores de la $P(C|IM)$ para los casos de estudio E-04 y E-08, respectivamente (puntos), a los cuales se les ajustó una función de distribución (línea continua), de este modo, la probabilidad al colapso se expresa utilizando una función de distribución lognormal de IM .

Para el caso E-04 se obtuvo un valor medio $\theta = 1.3g$ y una desviación estándar $\beta = 0.227$. A su vez, para el caso E-08 se determinó un valor medio $\theta = 0.81g$ y una desviación estándar $\beta = 0.291$. Lo anterior indica que, en promedio, existe un 50% de probabilidad de colapso cuando se alcance un nivel de intensidad de 1.3g y 0.81g para el caso E-04 y E-08, respectivamente. Es decir, para las condiciones establecidas en estos dos casos de estudio, la estructura con un sistema de amortiguamiento donde el exponente α es igual a 0.8 es más vulnerable que aquella donde α es igual a 0.4.

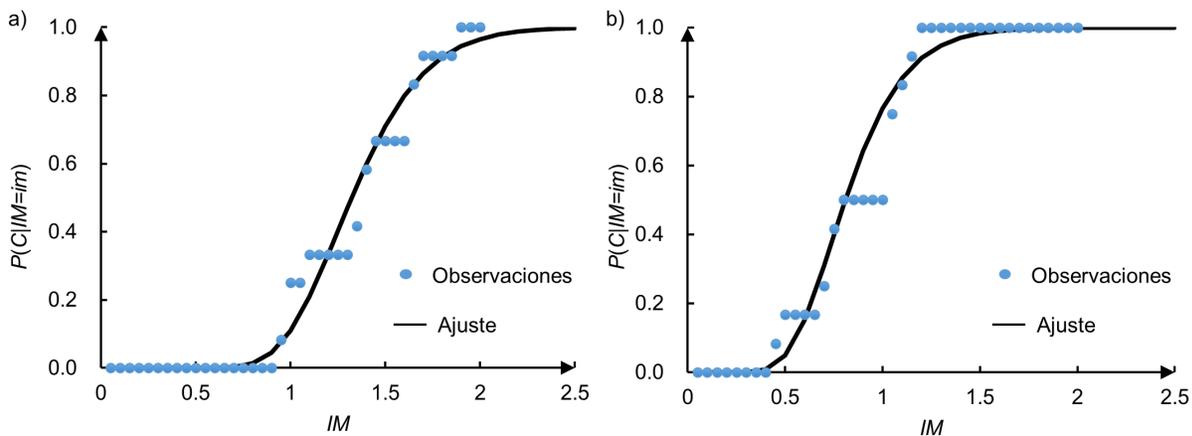


Figura 7. Curvas de fragilidad asociadas al colapso de la edificación: a) caso E-04 y b) E-08

Evaluación del desempeño para los casos de estudio (paso 5)

La metodología FEMA P-58 considera las incertidumbres que afectan la evaluación del desempeño sísmico a través de una técnica basada en el método de Monte Carlo y, adicionalmente, con una matriz de demandas simuladas a partir de resultados obtenidos de un número limitado de análisis no lineales. Al respecto, las

columnas que componen dicha matriz contienen valores de demanda estructural asociados con cada nivel y dirección de análisis en la edificación. En este sentido, a tales vectores de demanda simulados se les denomina *realización* y la cantidad de vectores de demanda (o *realizaciones*) puede variar de cientos a miles.

Ahora bien, el cálculo del desempeño inicia con la primera realización (primer vector de demandas simuladas) y, enseguida, se especifica si se produce o no el colapso de la estructura, lo anterior se determina tras la generación de un número aleatorio que define si ocurre el colapso de la edificación en función de la curva de fragilidad al colapso. En caso que se cumpla tal condición, las pérdidas estarán asociadas con los valores de reemplazo (*i.e.*, costos iniciales, tiempo de construcción, impacto ambiental, etc.). De este modo, se determina el número de heridos y decesos en función del uso ocupacional de la edificación y, adicionalmente, la estructura se clasifica como insegura por inestabilidad. Así, se continúa con una nueva realización.

En caso de no producirse el colapso, es necesario determinar si el daño generado por la acción sísmica es o no reparable. Lo anterior se define a través de las derivas residuales máximas y una curva de fragilidad asociada con la viabilidad para reparar la edificación. Si la estructura se asume como irreparable, las pérdidas corresponderán nuevamente con los valores de reemplazo. De esta manera, la edificación se clasifica como insegura por inestabilidad y se determina el posible número de heridos y decesos. De esta manera, se sigue con una nueva realización.

En caso de no producirse el colapso y el daño remanente sea reparable, se evalúa el nivel de daño infringido en la estructura y se calculan las pérdidas correspondientes. Para ello, se relacionan los valores de la realización con las funciones de fragilidad de cada uno de los elementos estructurales y no estructurales que componen la edificación y, con base en lo anterior, se asigna un estado de daño de forma aleatoria. Enseguida, se calculan las pérdidas asociadas con el estado de daño definido previamente y, finalmente, la suma de las pérdidas de cada uno de los componentes en la estructura corresponderá a la pérdida total en términos de la variable de decisión de interés para dicha realización. El procedimiento anterior se realiza tantas veces como realizaciones se hayan establecido. Por último, los valores calculados de pérdidas (para cada una de las realizaciones) se ordenan de forma ascendente para obtener una función de distribución de la variable de decisión de interés.

El procedimiento descrito previamente es altamente repetitivo. Por lo tanto, en esta investigación se utilizó la herramienta electrónica PACT (FEMA, 2018b) y su colección de funciones de fragilidad y consecuencia para llevar a cabo los cálculos probabilísticos y de acumulación de pérdidas.

Funciones de desempeño para los casos de estudio

Debido a las incertidumbres inherentes en la evaluación del desempeño de una edificación, es imposible determinar con precisión su comportamiento ante un sismo. Sin embargo, mediante funciones de desempeño es posible definir la probabilidad de que el desempeño de la estructura sea igual o menor a un valor específico ante un nivel determinado de intensidad sísmica. Las Figuras 8a a 8d presentan algunas curvas de desempeño en términos de costos de reparación asociados a distintos niveles de intensidad sísmica y casos de estudio. Se destaca que los costos de reparación se normalizaron en relación al costo total de reemplazo de la estructura, lo anterior permite una mejor comprensión de las consecuencias del daño generado.

La Figura 8a corresponde a la estructura que no cuenta con dispositivos de amortiguamiento viscoso (E-00). De tal forma, si se desea conocer en promedio los costos de reparación para niveles de intensidad entre 0.1g y 0.2g, *i.e.* asociado con un 50% de probabilidad de no excedencia, se observa que dichos costos

oscilan entre un 2.5% del costo total de reemplazo de la estructura. Sin embargo, si se desea un grado de “certeza” más elevado, *e.g.* relacionado con un 90% de probabilidad de no excedencia, los costos de reparación serían alrededor del 5% del costo total de la edificación. Lo anterior indica que, si ocurre un evento sísmico con tal intensidad, el costo máximo probable sería de un 5% del costo total para tales intensidades. Del mismo modo, los costos asociados a un 90% de probabilidad de no excedencia para intensidades de 0.4g y 0.5g serían cercanos al 25% y 60% del costo de la estructura, respectivamente.

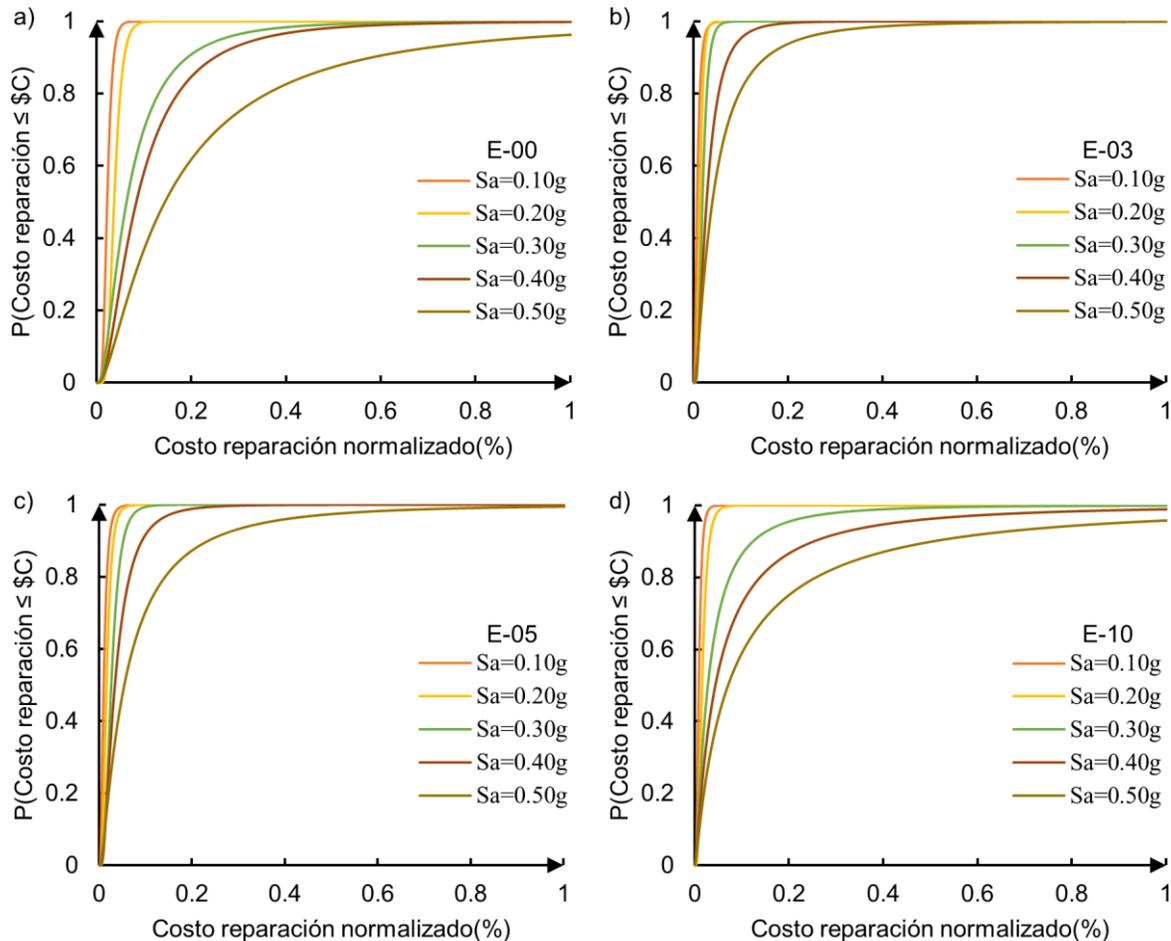


Figura 8. Funciones de desempeño en términos de costos de reparación normalizados para distintos niveles de intensidad sísmica y casos de estudio

En relación con lo anterior, se sugiere que la implementación de dispositivos de disipación de energía mejora el desempeño de la edificación. De tal forma, la Figura 8d ilustra los resultados obtenidos para la estructura E-10 la cual incluye un sistema de amortiguamiento viscoso lineal ($\alpha=1.0$). En ella se observa que, para intensidades de 0.4g y 0.5g, los costos de reparación asociados con un 90% de probabilidad de no excedencia son aproximadamente 25% y 50% del costo total del inmueble. Es decir, se logra incrementar el desempeño en un 10% respecto al caso E-00, pero únicamente para intensidades de 0.5g. Por su parte, la Figura 8c muestra los resultados de desempeño pertenecientes a la estructura E-05 ($\alpha=0.5$). Al respecto, considerando la misma condición de análisis de la estructura E-10, se estiman costos de reparación cercanos al 10% y 25% del costo total de la edificación, respectivamente. Lo anterior indica que la estructura E-05 tiene un mejor desempeño que los dos casos de estudio analizados previamente (*i.e.*, E-00 y E-10). Por último, examinando la Figura 8b, bajo la misma condición de análisis, se observa que los costos de reparación son cercanos a 7.5% y 15% del costo total de reemplazo de la estructura. Por lo tanto, la estructura

E-03 ($\alpha=0.3$) exhibe un mejor desempeño en comparación con los tres casos de estudio analizados previamente (*i.e.*, E-00, E-05 y E-10).

Similarmente, la evaluación del desempeño también se expresa a través del impacto ambiental (emisiones de dióxido de carbono equivalente, kg-CO₂eq) y número de heridos. Sobre este particular, las Figuras 9a y 9b presentan algunas funciones de desempeño en términos de emisiones de dióxido de carbono producto de las acciones de reparación para restaurar la edificación a su condicional inicial. Estas funciones de desempeño están asociadas con diferentes niveles de intensidad sísmica y dos casos de estudio particulares (E-00 y E-03). Es importante mencionar que las emisiones de dióxido de carbono están normalizadas respecto a la cantidad total de dióxido de carbono generado durante la etapa de construcción de la edificación.

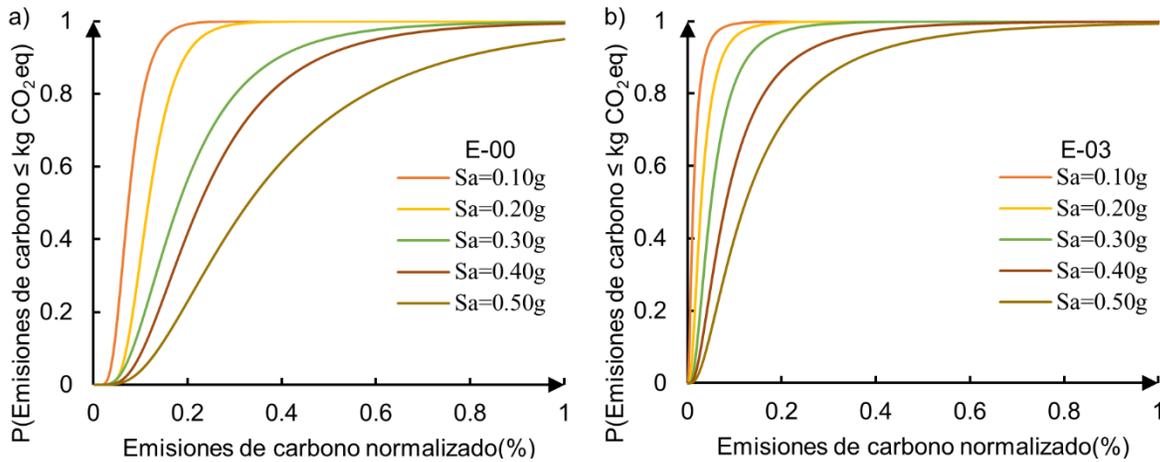


Figura 9. Funciones de desempeño en términos de emisiones de carbono normalizadas (impacto ambiental) para distintos niveles de intensidad sísmica y dos casos de estudio

Al respecto, es posible realizar un análisis similar al descrito previamente, sin embargo, en aras de brevedad se hacen algunas observaciones puntuales. Por ejemplo, la Figura 9a, la cual representa el caso de estudio donde no se implementan dispositivos de amortiguamiento (E-00), indica que el impacto ambiental para intensidades de 0.4g y 0.5g, con un 90% de probabilidad de no excedencia, es respectivamente 50% y 80% de las emisiones de dióxido de carbono emitidas durante la fase de construcción. Para la misma situación, pero con la incorporación de dispositivos de disipación de energía (Figura 9b), el impacto ambiental producto de las acciones de reparación sería aproximadamente un 25% y 35%, respectivamente. Si se relaciona esta información con la obtenida para el caso donde se evaluaron costos de reparación (Figura 8b), se puede establecer que los costos de reparación para intensidades de 0.4g y 0.5g, considerando un 90% de probabilidad de no excedencia, son aproximadamente un 7.5% y 15% del costo total de replazo y, correspondientemente, las acciones de reparación generarían un impacto ambiental cercano al 25% y 35% de las emisiones de dióxido de carbono emitidas durante la fase de construcción, respectivamente.

Similarmente, las Figuras 10a y 10b, presentan algunas funciones de desempeño en términos de número de heridos. La Figura 10a corresponde al caso de estudio sin dispositivos de amortiguamiento. Siguiendo un análisis similar a los párrafos previos, se observa que el número de heridos para intensidades de 0.4g y 0.5g, con 90% de probabilidad de no excedencia, corresponde a 5 y 15 personas en total, respectivamente. Del mismo modo, pero con la implementación de dispositivos de amortiguamiento viscoso (Figura 10b), el número de heridos corresponde a menos de 5 personas para ambas intensidades.

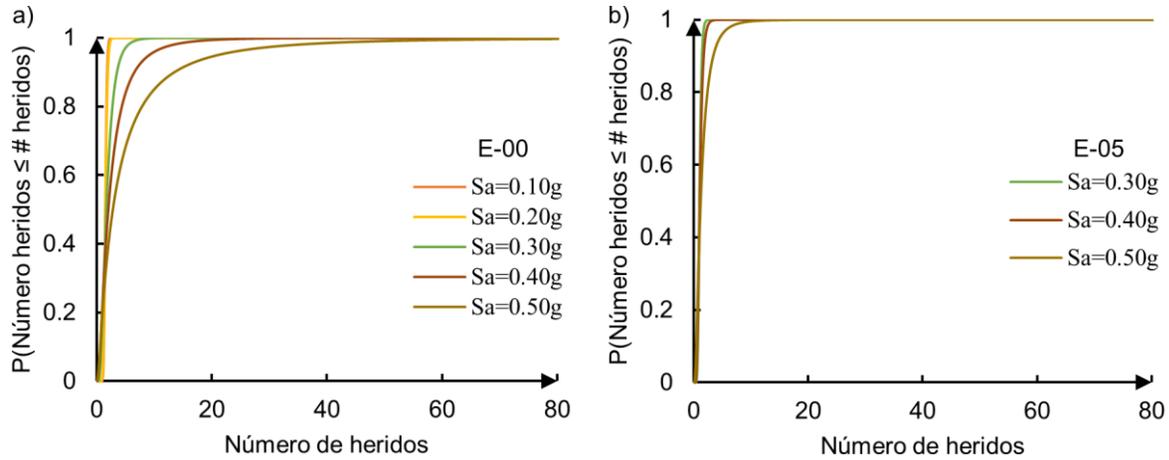


Figura 10. Funciones de desempeño en términos de número de heridos para distintos niveles de intensidad sísmica y dos casos de estudio

Probabilidad de excedencia de variables de desempeño y pérdidas anuales esperadas

En la sección anterior, se presentaron las funciones de distribución que se obtuvieron al evaluar el desempeño mediante el método basado en intensidad. Estas curvas de desempeño son valiosas para un nivel de intensidad sísmica específico. No obstante, no se considera la probabilidad con la que estos niveles de intensidad puedan ocurrir. Para abordar esto, se requiere una evaluación basada en el tiempo. Este procedimiento implica ponderar los resultados de desempeño obtenidos del método basado en intensidad (Figura 11, 12 y 13) con respecto a la probabilidad de excedencia de cada intensidad analizada (círculos en la Figura 3). Finalmente, se suman los resultados de estas evaluaciones para cada intensidad, lo que da como resultado la tasa media anual de excedencia de una medida de desempeño particular. Esta idea se expresa matemáticamente mediante la siguiente ecuación (todas las variables involucradas en la ecuación ya se han definido previamente):

$$P(DV > dv) = \int_{\lambda} P(DV > dv | IM = im) d\lambda(IM) \tag{6}$$

De este modo, las Figuras 11, 12 y 13 presentan la tasa media anual de excedencia asociada con costos de reparación (normalizado), impacto ambiental (normalizado) y número de heridos, respectivamente. En estas figuras se ilustran los resultados correspondientes con los casos de estudio E-00 (Figuras 11a, 12a y 13a) y E-05 (Figuras 11b, 12b y 13b). Adicionalmente, se incluye la contribución de cada uno de los niveles de intensidad (círculos en la Figura 3) a la tasa de excedencia total (envolvente).

En relación con lo anterior, se observa que los niveles de intensidad sísmica bajos son los que contribuyen mayormente con la tasa de excedencia, particularmente, asociada con costos de reparación (Figura 11) e impacto ambiental (Figura 12). Por el contrario, los valores de intensidad más elevados tienen una menor contribución en la tasa de excedencia total. Lo anterior se debe a que, simplemente, conforme se incrementan los valores de intensidad sísmica identificados en la Figura 3 (círculos), la derivada de la curva de peligro sísmico, $d\lambda(IM)$ en la ecuación 6, se vuelve menor y, del mismo modo, su contribución. Similarmente, la Figura 12a, que está asociada al número de heridos, presenta un comportamiento comparable al recién descrito. Sin embargo, para el caso de la estructura E-05 (Figura 13b) los valores de intensidad más bajos (0.05g a 0.20g) no contribuyen al número de heridos, ya que tales niveles de intensidad generan pérdidas nulas en términos de número de heridos.

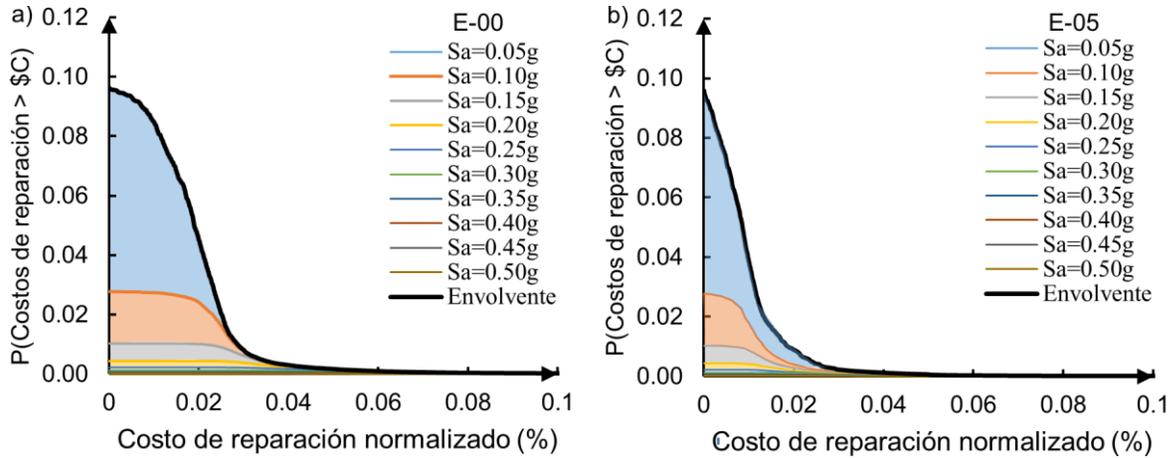


Figura 11. Tasa media anual de excedencia en términos de costos de reparación normalizados para dos casos de estudio: a) E-00, y b) E-05

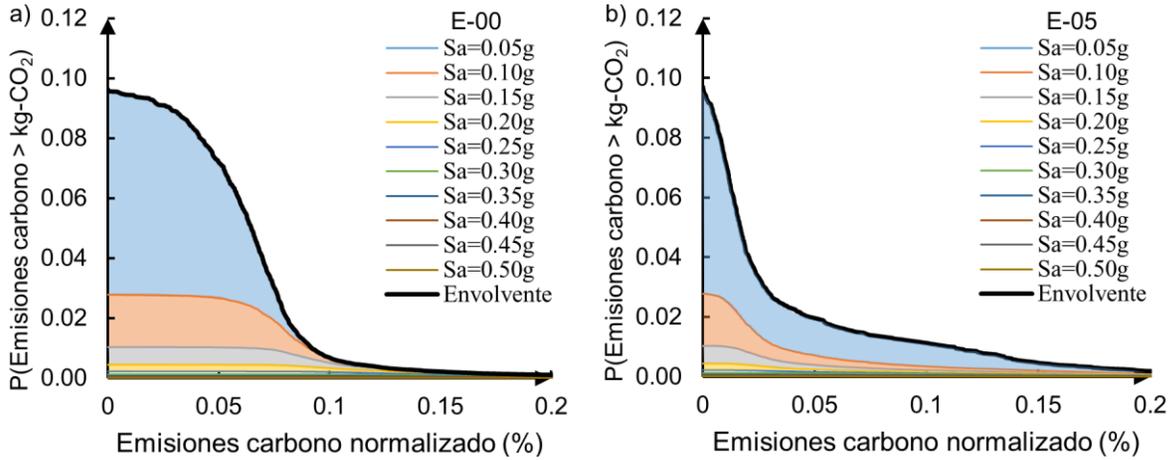


Figura 12. Tasa media anual de excedencia en términos de emisiones de carbono normalizado para dos casos de estudio: a) E-00, y b) E-05

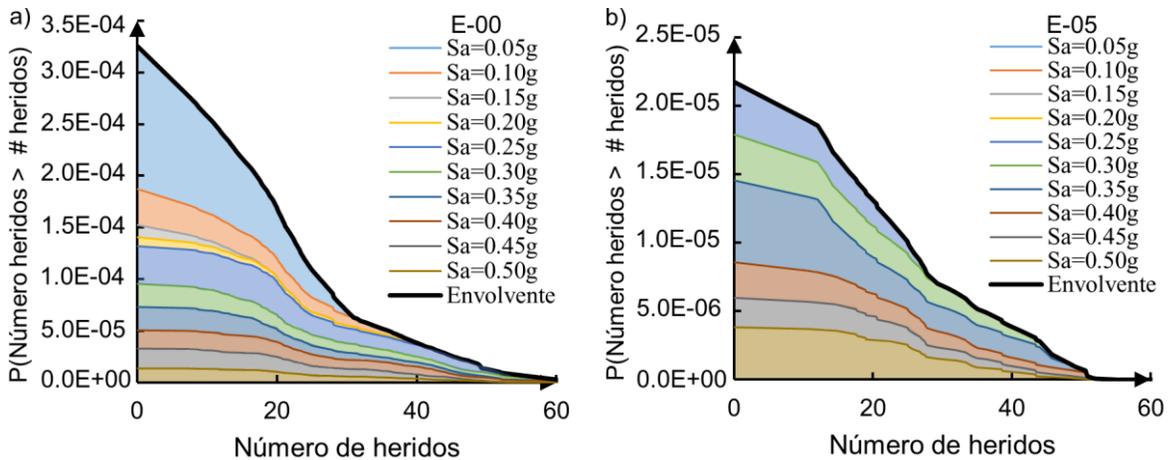


Figura 13 Tasa media anual de excedencia en términos de número de heridos para dos casos de estudio: a) E-00, y b) E-05

Por otro lado, tal como era de esperarse, para la estructura que no incluye un sistema de disipación (E-00) de energía, la probabilidad de exceder un valor particular relacionado con el costo de reparación, impacto ambiental y número de heridos es mayor que aquella estimada para los casos de las estructuras con un sistema de amortiguamiento (E-01 a E-10).

DISEÑO OPTIMO SUSTENTABLE BASADO EN PÉRDIDAS ANUALES ESPERADAS

En términos generales, las figuras anteriores permiten determinar la probabilidad que determinado valor de desempeño sea excedido y, de este modo, comparar los resultados entre ambos casos de estudio. Sin embargo, una forma integral de compararlos es a través de la pérdida anual esperada (EAL, por sus siglas en inglés). La EAL corresponde al área bajo la curva de la tasa media anual de excedencia y representa la pérdida total que, en promedio, se espera que ocurra en un año. La EAL es útil para establecer primas de seguro contra daños provocados por eventos sísmicos futuros. Para calcular la EAL, se utiliza la siguiente fórmula:

$$EAL = \int_0^{\infty} P(DV > dv)d(DV) \tag{7}$$

En este estudio, desde un punto de vista sustentable, se asume como diseño óptimo aquel donde se minimice la pérdida anual esperada en términos de costos de reparación, emisiones al aire (impacto ambiental) y número de heridos. De esta forma, la Tabla 8 contiene las pérdidas anuales esperadas, para cada uno de los casos de estudio, en función de las variables de desempeño aquí analizadas.

Tabla 8. Pérdida anual esperada por costos de reparación, impacto ambiental y número de heridos

Casos de estudio	Costo reparación (\$)	Emisiones carbono (kg-CO ₂ eq)	Número heridos
E-00	0.208%	0.66%	0.00705
E-01	0.075%	0.15%	0.00030
E-02	0.075%	0.13%	0.00042
E-03	0.070%	0.128%	0.00024
E-04	0.15%	0.22%	0.00050
E-05	0.11%	0.37%	0.00054
E-06	0.20%	0.59%	0.00058
E-07	0.09%	0.18%	0.00104
E-08	0.09%	0.14%	0.00448
E-09	0.10%	0.15%	0.00636
E-10	0.10%	0.18%	0.00648

Es importante mencionar que la pérdida anual esperada, asociada con costos de reparación y emisiones de carbono, fue normalizada respecto al costo total de la edificación y cantidad total de dióxido de carbono equivalente emitido durante la fase de construcción, respectivamente. En este aspecto, el caso de estudio E-03 ($\alpha=0.3$) resulta la estructura con menores pérdidas para cada una de las variables de desempeño consideradas, por lo tanto, se establece como el diseño óptimo.

Los resultados del modelo E-03 indican una disminución en las pérdidas anuales del 65% y 80%, en términos de costos de reparación e impacto ambiental (Figuras 14a y 14b), respecto a la edificación que no

cuenta con un sistema de disipación de energía (E-00). Además, se observa una gran reducción en términos de número de heridos, aunque la pérdida anual esperada relacionada con el número de heridos es muy baja para ambos casos.

Por otro lado, tomando como referencia la estructura sin disipadores (E-00), en general, las pérdidas anuales esperadas por costos de reparación son menores en aquellos casos donde el exponente α , relacionado con la no linealidad del amortiguador, toma valores entre 0.1 y 0.3; además, para tales estructuras (*i.e.*, E-01 a E-03) las pérdidas anuales estimadas son similares. Lo anterior se observa en la Figura 14a, la cual expresa la relación entre las pérdidas anuales estimadas para los casos de estudio respecto a la pérdida obtenida para la estructura de referencia. Caso contrario, cuando el exponente α toma valores próximos a 0.4 y 0.6 existen reducciones menos importantes respecto al caso de referencia (ver Figura 14a).

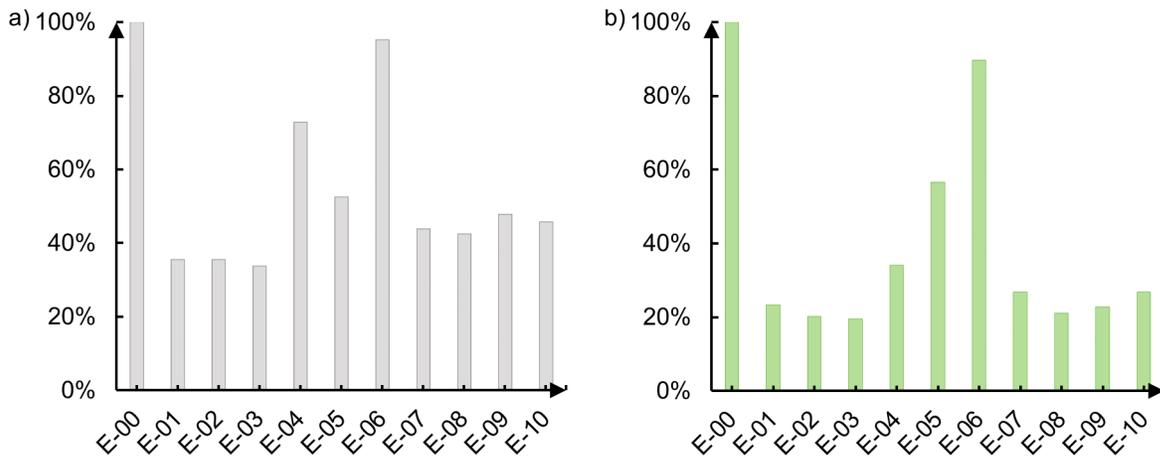


Figura 14. Relación de pérdidas esperadas respecto al caso E-00: a) costos de reparación y b) emisiones de carbono

Asimismo, se observa un comportamiento similar en las pérdidas anuales esperadas por impacto ambiental (ver Figura 14b). Es importante destacar que el impacto ambiental está estrechamente relacionado con los costos de reparación, ya que a menudo, cuanto mayores son los costos de reparación, mayor es el impacto ambiental. Sin embargo, este no es siempre el caso, como se puede apreciar en los casos E-04 y E-05, donde se estimaron costos de reparación anuales de 0.15% y 0.11% respectivamente, pero el impacto ambiental correspondiente fue de 0.22% y 0.37%. Esto se debe a que la respuesta no lineal de las edificaciones es diferente y los componentes estructurales y no estructurales que pueden ser dañados también son distintos, lo que a su vez puede generar diferentes consecuencias para el impacto ambiental.

Por último, las pérdidas anuales relacionadas con el número de heridos son menores para las edificaciones con sistema de amortiguamiento (*i.e.*, E-01 a E-10) en comparación con la estructura de referencia (E-00). Sin embargo, tal como se estableció previamente, estas pérdidas son mejor controladas debido a que las normativas para el diseño están focalizadas en salvaguardar la vida humana, por lo tanto, desde tal punto de vista, dichos lineamientos cumplen con su cometido.

CONCLUSIONES

En esta investigación se definió el diseño óptimo, desde una perspectiva sustentable, de un conjunto de edificaciones que incluyen disipadores de energía de fluido viscoso donde las propiedades histeréticas de los dispositivos (*i.e.*, α) se variaron para establecer diversas alternativas de diseño. Así, se determinó el

desempeño sísmico para cada uno de los casos de estudio. Para ello, se utilizó una metodología que permite evaluar el desempeño sísmico de edificaciones en términos económicos, sociales y ambientales. Este tipo de metodologías están en sintonía con programas nacionales que fomentan el desarrollo sustentable en el país. Por lo tanto, su difusión contribuye a la circulación del conocimiento que impacte positivamente en la sociedad con un enfoque al cuidado del medio ambiente. De este modo, para abordar las tres dimensiones de la sustentabilidad, el desempeño se calculó en términos de costos de reparación (economía), número de heridos (social) y emisiones de dióxido de carbono (impacto ambiental). En relación con lo anterior, se determinó como diseño óptimo aquella edificación con un valor específico de α donde se minimice la pérdida anual esperada en función de las variables de desempeño definidas previamente. De acuerdo con los resultados obtenidos se concluye lo siguiente:

- La evaluación del desempeño basada en el tiempo debería enfocarse principalmente en determinar el desempeño para valores de intensidad moderados y, en menor medida, para niveles de intensidad sísmica altos, ya que la probabilidad de excedencia de un valor de desempeño particular está influenciada mayormente por la ocurrencia de niveles de intensidad sísmica moderados. Evaluar el desempeño prioritariamente para intensidades grandes puede subestimar los resultados obtenidos, pues se estaría excluyendo información importante contenida en la curva de peligro sísmico asociada con intensidades bajas, las cuales resultan en tasas de excedencia más elevadas.
- El modelo E-03 ($\alpha=0.3$) resultó la edificación con menores pérdidas anuales esperadas por costos de reparación, impacto ambiental y número de heridos; por lo tanto, se determinó como el diseño óptimo. Los resultados obtenidos señalan una reducción de la pérdida anual esperada del 65% y 80%, en términos de costos de reparación y emisiones de carbono, en comparación con la estructura sin sistema de disipación de energía (E-00). Asimismo, existe una reducción importante respecto al número de heridos; sin embargo, la pérdida anual esperada en ambos casos es mínima.
- En general, las edificaciones con sistema de amortiguamiento viscoso (E-01 a E-10) tienen mejor desempeño sísmico que aquella edificación que no cuenta con un sistema de disipación de energía (E-00). En ese sentido, el exponente α , relacionado con la no linealidad del amortiguador, tiene una influencia significativa sobre el desempeño de los casos analizados. Al respecto, las estructuras con los mayores índices de desempeño están relacionadas con valores de α entre 0.1 y 0.3 (*i.e.*, E-01 a E-03). Sin embargo, esta conclusión corresponde a una edificación alta (28 niveles) y características dinámicas de un sitio particular (Acapulco, Gro.); por lo tanto, hace falta analizar estructuras de distintas alturas y constatar si, en efecto, tales valores de α producen el mejor desempeño.
- Las emisiones de carbono están fuertemente relacionadas con las acciones de reparación (*i.e.*, costos de reparación) y, a menudo, cuanto mayores son los costos de reparación, mayor es el impacto ambiental. Sin embargo, el impacto ambiental que se produce en una estructura con pérdidas por costos de reparación mayores al de otra edificación, puede ser menor debido a que la respuesta de las edificaciones es distinta. Por lo tanto, los componentes estructurales y no estructurales susceptibles a ser dañados también son distintos y, consecuentemente, el resarcimiento de tales componentes puede generar una mayor o menor cantidad de emisiones al ambiente. Por otro lado, México cuenta con una base de datos escasa para realizar ACV, por lo tanto, para evaluar el impacto ambiental relacionado con el sector de la construcción se utilizaron inventarios de ciclo de vida de países desarrollados. Al respecto, tal como señalan otras investigaciones, se requiere de una base de datos nacional que representen los materiales y procesos locales y, de esta manera, caracterizar el impacto ambiental con mayor certeza.
- Por último, las pérdidas esperadas asociadas con el número de heridos son menores para las edificaciones que cuentan con un sistema de amortiguamiento suplementario (E-01 a E-10) respecto

a la edificación que no incluye un sistema de disipación de energía (E-00). No obstante, las pérdidas esperadas relacionadas con el número de heridos son mínimas para ambos sistemas. Ciertamente, los lineamientos actuales para el diseño sísmico de edificaciones tienen como prioridad la seguridad de vida, por lo tanto, desde este punto de vista, tales normativas cumplen su objetivo.

AGRADECIMIENTOS

El segundo autor agradece el apoyo brindado por el CONACYT por el patrocinio del proyecto A1-S-35223 “Definición de demandas sísmicas para el diseño de estructuras basado en riesgo y resiliencia”.

REFERENCIAS

- American Society of Civil Engineers (ASCE) (2017a), “Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures (ASCE/SEI 7-16)”, American Society of Civil Engineers: Reston, VA, USA. <https://doi.org/10.1061/9780784414248>
- American Society of Civil Engineers (ASCE) (2017b). “Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings, (ASCE/SEI 41-17)”, American Society of Civil Engineers: Reston, VA, USA. <https://doi.org/10.1061/9780784414859>
- Applied Technology Council (ATC) (1996), “Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Building (ATC-40)”. Applied Technology Council: Redwood City, CA, USA.
- Architecture 2030. 2013. “Why the building sector?”, Recuperado 05 Enero, 2023 de http://architecture2030.org/buildings_problem_why/
- Baker, J W (2015), “Efficient analytical fragility function fitting using dynamic structural analysis”, Earthquake Spectra, Vol. 31, No 1, pp. 579-599. <https://doi.org/10.1193/021113EQS025M>
- Baker, J W y CA Cornell (2006), “Spectral shape, epsilon and record selection”, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 35, No. 9, pp. 1077-1095. <https://doi.org/10.1002/eqe.571>
- Banazadeh, M, A Ghanbari y R Ghanbari (2017). “Seismic performance assessment of steel moment-resisting frames equipped with linear and nonlinear fluid viscous dampers with the same damping ratio”. Journal of Constructional Steel Research, Vol. 136, pp. 215-228. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2017.05.022>
- Bianchini, M, P P Diotallevi y J W Baker (2009), “Prediction of Inelastic Structural Response Using an Average of Spectral Accelerations”, In: Proceedings of the 10th International Conference on Structural Safety and Reliability (ICOSSAR09), Osaka, Japon.
- Carnegie Mellon University Green Design Institute (CMU GDI) (2008). “Economic Input-Output Life Cycle Assessment (EIO-LCA)”, US 1997 Industry Benchmark model, Recuperado 22 Noviembre, 2023 de <http://www.eiolca.net>
- Carr, A J (2010), “RUAUMOKO Manual: User Manual for the 3 Dimensional Version Ruaumoko 3D”, University of Canterbury, Christchurch, NZ. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.4755.8567>
- Carrillo-Bueno, C A (2016), “Influencia del deterioro por corrosión en la confiabilidad de edificios de concreto reforzado”. Tesis de maestría, Universidad Nacional Autónoma de México, UNAM.
- Comision Federal de Electricidad (CFE) (2015). “Manual de Diseño de Obras Civiles Diseño por Sismo”, Instituto de Investigaciones Eléctricas, Comisión Federal de Electricidad, Ciudad de Mexico, Mexico.
- Colín, I F (2020). “Aplicacion de Analisis de Ciclo Vida para un Edificio Residencial con Criterios de Sustentabilidad”, Tesis Doctoral, Instituto Politécnico Nacional, Ciudad de Mexico, Mexico, p.117. <http://tesis.ipn.mx/handle/123456789/28847>
- Comber, M V, C Poland y M Sinclair (2012), “Environmental Impact Seismic Assessment: Application of Performance-Based Earthquake Engineering Methodologies to Optimize Environmental Performance”, In: Proceedings of the Structures Congress ASCE, Chicago, IL, USA, pp. 910-921. <https://doi.org/10.1061/9780784412367.081>

- Computers and Structures Inc. (CSI) (2018). Structural Software for Building Analysis and Design, ETABS
- Contreras-Jiménez, J C, F Morales-Mendoza, R Corona-Armenta, O Montaña-Arango y J Medina-Marín (2017), “Evaluación económica y ambiental de diseños estructurales de edificaciones mediante análisis de ciclo de vida basado en entradas y salidas”, *Dyna (Spain)*, Vol. 92, No. 6, 626-631. <https://doi.org/10.6036/8177>
- Cornell, C A y H Krawinkler (2000), “Progress and Challenges in Seismic Performance Assessment”, *PEER Center News*, Vol. 3, No. 2, pp. 1-4.
- Del Gobbo, G M, A Blakeborough y M S Williams (2018), “Improving total-building seismic performance using linear fluid viscous dampers”, *Bulletin of Earthquake Engineering*, Vol. 16, No 9, pp. 4249-4272. <https://doi.org/10.1007/s10518-018-0338-4>
- Deierlein, G y V Victorsson (2009), “Fragility Curves for Components of Steel SMF Systems”. Background document: FEMA P-58/BD-3.8.3. Washington, DC, USA
- Dong, Y y D M Frangopol (2016), “Performance-based seismic assessment of conventional and base-isolated steel buildings including environmental impact and resilience”, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 45, No. 5, 739-756. <https://doi.org/10.1002/eqe.2682>
- Eads, L, E Miranda y D G Lignos (2015), “Average spectral acceleration as an intensity measure for collapse risk assessment”, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 44, No. 12, 2057-2073. <https://doi.org/10.1002/eqe.2575>
- Feese, C, Y Li y W M Bulleit (2015), “Assessment of Seismic Damage of Buildings and Related Environmental Impacts”, *Journal of Performance of Constructed Facilities*, Vol. 29, No. 4, pp. 1-10. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)cf.1943-5509.0000584](https://doi.org/10.1061/(asce)cf.1943-5509.0000584)
- Federal Emergency Management Agency (FEMA) (1997), “NEHRP guidelines for the seismic rehabilitation of buildings”, Rep. No. FEMA-273, Washington, DC, USA.
- Federal Emergency Management Agency (FEMA) (2007) “Interim Testing Protocols for Determining the Seismic Performance Characteristics of Structural and Nonstructural Components”, Rep. No. FEMA P-58-3, Washington, DC, USA.
- Federal Emergency Management Agency (FEMA) (2018a) “Seismic performance assessment of buildings”, volume1-methodology, Rep. No. FEMA 461, Washington, DC, USA.
- Federal Emergency Management Agency (FEMA) (2018b) “Seismic performance assessment of buildings”, volume 3- Supporting Materials and Background Documentation, Rep. No. FEMA P-58-3, Washington, DC, USA.
- Gámez-García, D C, H Saldaña-Márquez, J M Gómez-Soberón, S P Arredondo-Rea, M C Gómez-Soberón y R Corral-Higuera (2019), “Environmental challenges in the residential sector: Life cycle assessment of Mexican social housing”, *Energies*, Vol.12, No. 14. <https://doi.org/10.3390/en12142837>
- Gencturk, B, K Hossain y S Lahourpour (2016), “Life cycle sustainability assessment of RC buildings in seismic regions”, *Engineering Structures*, Vol. 110, No. 1, pp. 347-362. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2015.11.037>
- Ghobarah, A (2001), “Performance-based design in earthquake engineering: State of development”, *Engineering Structures*, Vol. 23, No. 8, pp. 878-884. [https://doi.org/10.1016/S0141-0296\(01\)00036-0](https://doi.org/10.1016/S0141-0296(01)00036-0)
- Güereca, L P, R O Sosa, H E Gilbert y N S Reynaga (2015), “Life cycle assessment in Mexico: overview of development and implementation”, *International Journal of Life Cycle Assessment*, Vol. 20, No. 3, pp. 311-317. <https://doi.org/10.1007/s11367-014-0844-9>
- 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. <https://doi.org/10.1080/13632469.2013.787377>
- Hossain, K A y B Gencturk (2016), “Life-Cycle Environmental Impact Assessment of Reinforced Concrete Buildings Subjected to Natural Hazards”, *Journal of Architectural Engineering*, Vol. 22, No. 4. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)ae.1943-5568.0000153](https://doi.org/10.1061/(asce)ae.1943-5568.0000153)
- Moehle, J y G G Deierlein (2004), “A framework methodology for performance-based earthquake engineering”, In: *Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering*, No. 679,

- Vancouver, BC, Canada. <https://www.researchgate.net/publication/228706335>
- Kazantzi, A K y D Vamvatsikos (2015), “Intensity measure selection for vulnerability studies of building classes”, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 44, No. 15, pp. 2677-2694. <https://doi.org/10.1002/eqe.2603>
- Kohrangi, M, S R Kotha, y P Bazzurro (2018), “Ground-motion models for average spectral acceleration in a period range: Direct and indirect methods”. *Bulletin of Earthquake Engineering*, Vol. 16, No. 1, pp. 45-65. <https://doi.org/10.1007/s10518-017-0216-5>
- Lin, W H and A K Chopra (2002), “Earthquake response of elastic SDF systems with non-linear fluid viscous dampers”, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 31, No. 9, pp. 1623-1642. <https://doi.org/10.1002/eqe.179>
- Lowes, L y J Li (2009), “Fragility Functions for Reinforced Concrete Moment Frames”, Background document: FEMA P-58/BD-3.8.6, Washington, DC, USA
- Menna, C, D Asprone, F Jalayer, A Prota y G Manfredi (2013), “Assessment of ecological sustainability of a building subjected to potential seismic events during its lifetime”, *International Journal of Life Cycle Assessment*, Vol. 18, No. 2, pp. 504-515. <https://doi.org/10.1007/s11367-012-0477-9>
- Gobierno de la Ciudad de México (GCDMX) (2020). “Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo (NTCDS)”, Gobierno de la Ciudad de México: CDMX, México.
- Orozco Hernández, D A (2019), “Pentahélice: Programa Estratégico Nacional de Tecnología e Innovación Abierta (PENTA)”. División de ingenierías Civil y Geomática, UNAM. Recuperado 07 Diciembre, 2023 de <http://dicyg.fi-c.unam.mx:8080/Site/licenciatura/Convocatoria2019.pdf>
- Park, H S, J W Hwang y B K Oh (2018), “Integrated analysis model for assessing CO2 emissions, seismic performance, and costs of buildings through performance-based optimal seismic design with sustainability”, *Energy and Buildings*, Vol. 158, No. 1, pp. 761-775. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.10.070>
- Passoni, C, A Marini, A Belleri y C Menna (2021), “Redefining the concept of sustainable renovation of buildings: State of the art and an LCT-based design framework”, *Sustainable Cities and Society*, Vol. 64, No.102519. pp. 1-24. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102519>
- Porter, K, K Farokhnia, D Vamvatsikos y I Cho (2015), “Guidelines for component- based analytical vulnerability assessment of buildings and nonstructural elements”, GEM technical report 2014-13, version 1.0.0. Pavia: Global Earthquake Model.
- Quispe, I, I Vázquez-Rowe, R Kahhat, A P Arena y N Suppen (2017), “Preface: Life Cycle Assessment: A Tool for Innovation in Latin America”, *International Journal of Life Cycle Assessment*, Vol. 22, No. 4, pp. 469-478. <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1178-6>
- Ramberg, W y W R Osgood (1943), “Description of stress-strain curves by three parameters”, Technical Note No. 902, National Advisory Committee on Aeronautics, Washington, DC, USA.
- Ramirez, O M, M Constantinou, C A Kircher, A Whittaker, M Johnson, J D Gomez y C Chrysostomou (2001), “Development and Evaluation of simplified procedures for analysis and design of buildings with passive energy dissipation systems”. Technical Rep. No. MCEER-00-0010, Revision, 1.
- Salgado, R A, D Apul y S Guner (2020), “Life cycle assessment of seismic retrofit alternatives for reinforced concrete frame buildings”, *Journal of Building Engineering*, Vol. 28, No. 101064, pp. 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2019.101064>
- Salgado, R A y S Guner (2021), “A structural performance-based environmental impact assessment framework for natural hazard loads”, *Journal of Building Engineering*, Vol. 43, No.102908, pp. 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102908>
- Santos Santiago, M A, S E Ruiz, A Santos Santiago y F Valenzuela Beltran (2017), “Comparación de Dos Métodos Simplificados para el Diseño Sísmico de Edificios con Amortiguadores Viscosos No Lineales”, Procedente del XXI Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Jalisco, GDL, México.
- Santos-Santiago, M A, S E Ruiz y F Valenzuela-Beltrán (2022), “Influence of Higher Modes of Vibration on the Seismic Response of Buildings with Linear and Nonlinear Viscous Dampers”, *Journal of Earthquake Engineering*, Vol. 26, No. 8, pp. 3914-3937.

- <https://doi.org/10.1080/13632469.2020.1822223>
- Santos-Santiago, M A, S E Ruiz y L Cruz-Reyes (2022), “Optimal design of buildings under wind and earthquake, considering cumulative damage”, *Journal of Building Engineering*, Vol. 56, No. 104760. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.104760>
- Seligson, H A (2008), “Casualty Consequence Function and Building Population Model Development”, Background document: FEMA P-58/BD-3.7.8, Washington, DC, USA
- Servicio Sismológico Nacional (SSN). Mapas de sismicidad anual. Recuperado 04 Febrero, 2023 de <http://www.ssn.unam.mx/sismicidad/mapas-de-sismicidad-anual/>
- Silva, A, J M Castro y R Monteiro (2020), “A rational approach to the conversion of FEMA P-58 seismic repair costs to Europe”, *Earthquake Spectra*, Vol. 36, No. 3, pp. 1607-1618. <https://doi.org/10.1177/8755293019899964>
- Simonen, K, M Huang, C Aicher y P Morris (2018). “Embodied carbon as a proxy for the environmental impact of earthquake damage repair”, *Energy and Buildings*, Vol. 164, No. 1, pp. 131-139. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.12.065>
- Reynaga, N, J Aguillón Robles y G J Arista González (2013), “Análisis de Ciclo de Vida y Ecodiseño para la Construcción en México”, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, México.
- Takeda, T, M A Sozen y N N Nielsen (1970), “Reinforced Concrete Response to Simulated Earthquakes”, *Journal of the Structural Division*, Vol. 96, No. 12, pp. 2557-2573. <https://doi.org/10.1061/JSDEAG.0002765>
- Tsantaki, S, C Jäger y C Adam (2012), “Improved seismic collapse prediction of inelastic simple systems vulnerable to the P-delta effect based on average spectral acceleration”, In: *Proceedings of the 15th World Conference on Earthquake Engineering*, Lisbon, Portugal. http://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/WCEE2012_0287.pdf
- Turner and Townsend (2021). *International construction market survey*, Turner and Townsend, p. 69.
- United States Government (USG) (2022), “CPI Inflation Calculator”, U.S. Bureau of Labor Statistics. Recuperado 10 Enero, 2023 de https://www.bls.gov/data/inflation_calculator.htm
- Vamvatsikos, D y A Cornell (2001), “Incremental dynamic analysis”, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 31, No. 3, pp. 491-514. <https://doi.org/10.1002/eqe.141>
- Wei, H H, M J Skibniewski, I M Shohet y X Yao (2016). “Lifecycle Environmental Performance of Natural-Hazard Mitigation for Buildings”, *Journal of Performance of Constructed Facilities*, Vol. 30, No. 3, pp. 1-13. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)cf.1943-5509.0000803](https://doi.org/10.1061/(asce)cf.1943-5509.0000803)
- 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. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9445\(2009\)135:10\(1146\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9445(2009)135:10(1146))
- Yang, Y, W W Ingwersen, T R Hawkins, M Srocka y D E Meyer (2017), “USEEIO: A new and transparent United States environmentally-extended input-output model”, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 158, No. 1, pp. 308-318. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.04.150>