

Aproximación del Tiempo de Recuperación de Edificios Dañados por Terremoto

Approximation of Recovery Time for Earthquake-Damaged Buildings

Gutiérrez Trejo, J.^{1*} , Bañuelos García, F.² , Ayala Milián, G.³  (*juan.gutierrez@uaz.edu.mx)

Recibido: 18-06-2024 Aceptado: 06-09-2024

RESUMEN

El tiempo que tarda una edificación en recuperar su funcionalidad cuando esta ha sido afectada por un evento sísmico es un aspecto que hoy en día no ha sido considerado por los despachos de ingeniería estructural. Recientes eventos catastróficos naturales han puesto en evidencia que la pérdida de funcionalidad de las edificaciones, además de afectar a la sociedad en general, también trae consigo cuantiosas pérdidas financieras que se estima recuperar incluso décadas después de haber ocurrido el evento catastrófico. En este trabajo de investigación se

presenta una metodología probabilista para cuantificar el tiempo de recuperación de instalaciones que son propensas a experimentar sismos de magnitud considerable durante su vida útil. Para ejemplificar la metodología se presenta la evaluación de un edificio de concreto reforzado en el que se consideran muros de relleno de mampostería no reforzada, localizado en la CDMX.

Palabras clave: resiliencia sísmica, tiempo de recuperación, pérdida de funcionalidad.

ABSTRACT

The time it takes for a building to recover its functionality when it has been affected by a seismic event is an aspect that nowadays has not been considered by structural engineering companies. Recent natural catastrophic events have shown that the loss of functionality in buildings, in addition to affecting society in general, also brings with it considerable financial losses that are estimated to be recovered even decades after the catastrophic event has occurred. This research work presents a probabilistic

methodology to quantify the recovery time of facilities that are exposed to earthquakes of considerable magnitude during their lifespan. To exemplify the methodology, the evaluation of a reinforced concrete building in which unreinforced masonry infill walls are considered, located in the CDMX, is presented.

Keywords: seismic resilience, recovery time, loss of functionality.

¹Programa de Ingeniería Civil, Universidad Autónoma de Zacatecas, Av. Ramón López Velarde Núm. 801, Col. Centro, Zacatecas, México, CP. 98000.

²Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma del Estado de México, Cerro de Coatepec S/N, Toluca de Lerdo, Estado de México, C.U., CP. 50110.

³Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, Circuito Escolar S/N, Ciudad Universitaria, Coyoacán, Ciudad de México, CP. 04510.



INTRODUCCIÓN

El daño que experimentan los elementos no estructurales a causa de un evento sísmico es la principal causa de la disrupción del funcionamiento de las edificaciones, incluso ante sismos frecuentes. Como consecuencia de la pérdida de funcionamiento durante el tiempo en que se efectúan los trabajos de reparación de la instalación afectada se generan las pérdidas financieras indirectas. Por ejemplo, a causa de los daños que originó el sismo de Kobe en Japón en el año 1995, el sector comercial sufrió pérdidas acumuladas durante 10 años, alcanzando los 125 billones de dólares [1]. Por otro lado, el sismo de Axi-chiapán del año 2017 de magnitud M_w 7.1 afectó de forma importante a infraestructura construida en la Ciudad de México (CDMX), provocando el colapso de 44 edificios [2], incluyendo 5,765 viviendas, y 973 escuelas, y se estimó que las pérdidas financieras indirectas junto con el costo de la reconstrucción de la infraestructura dañada serían de aproximadamente 3.4 mil millones de dólares [3].

De acuerdo a lo anterior, es evidente la necesidad de desarrollar metodologías que permitan evaluar el desempeño estructural y no estructural en edificios, ya sean nuevos o existentes, en términos de variables de decisión que sean intuitivas y de fácil interpretación para los inversionistas y tomadores de decisiones, como lo es el tiempo de recuperación.

En el presente trabajo se propone un procedimiento para obtener la distribución de probabilidad del tiempo de recuperación de edificios de concreto reforzado. La metodología está fundamentada en la Técnica de Revisión y Evaluación de Proyectos (PERT) y el Método de Simulación de Montecarlo (MSM). El procedimiento es consistente con la metodología de evaluación del desempeño del Centro de Investigación de Ingeniería Sísmica del Pacífico (PEER) y con la definición de resiliencia estructural propuesta por el Centro Multidisciplinario de Investigación de Ingeniería Sísmica (MCEER).

ANTECEDENTES

El MCEER definió a la resiliencia estructural como la capacidad que posee un sistema estructural para minimizar los impactos negativos que causan eventos potencialmente destructivos sobre la infraestructura construida y recuperarse en el menor tiempo posible [4]. La resiliencia está parametrizada mediante las siguientes variables de decisión: pérdida de funcionalidad, tiempo de recuperación, pérdidas financieras directas (debido a los daños materiales), pérdidas financieras indirectas (causadas por la pérdida de producción durante el tiempo que se realizan las reparaciones) y, pérdida de vidas humanas. En la Figura 1 se ilustra la pérdida y recuperación de la funcionalidad de una instalación [4]. El eje de las ordenadas indica el porcentaje de pérdida de funcionalidad $LQ(t)$ y el de las abscisas el tiempo de recuperación de su funcionalidad $RQ(t)$.

Por otro lado, el PEER [5] desarrolló una metodología para evaluar el desempeño sísmico de estructuras en términos de variables de decisión, DV , *e.g.*, costos de reparación y tiempo de recuperación. Esta metodología está compuesta por cuatro análisis probabilistas: análisis de peligro sísmico, análisis estructural, análisis de daño y, análisis de las consecuencias del daño en términos de variables de decisión. Las incertidumbres asociadas en cada análisis probabilista se combinan mediante el teorema de la probabilidad total, obteniéndose la tasa media anual de excedencia de la variable de decisión en estudio [5], la cual se obtiene mediante la Ec. (1):



Figura 1: *Esquema general que explica la resiliencia estructural [4].*

$$\lambda(DV > dv) = \int_{im} \int_{dm} \int_{edp} G(dv|dm) dG(dm|edp) dG(edp|im) |d\lambda(im)| \quad (1)$$

Posteriormente, la Agencia Federal de Gestión de Emergencias (FEMA, por sus siglas en inglés) adoptó y enriqueció el esquema de evaluación desarrollado por el PEER, creando la metodología de evaluación del desempeño sísmico denominada FEMA P-58-1 [6, 7]. Para estimar el tiempo de reparación de los elementos dañados propone dos esquemas, uno de reparación en serie y otro en paralelo. A este respecto, las funciones de fragilidad para estimar el tiempo de reparación de los componentes dañados que utiliza esta metodología fueron calibradas asumiendo que los trabajos de reparación son realizados por un solo trabajador [8]. Cuando se emplea el esquema de reparación en serie se acepta que existe un trabajador por componente dañado. Cuando se utiliza el esquema de reparación en paralelo se asume implícitamente que un solo trabajador repara todos los elementos dañados. Estas dos aproximaciones son inconsistentes con lo que ocurre en la realidad, que es organizar cuadrillas con un número específico de trabajadores. Por lo tanto, se concluye que el tiempo de reparación obtenido con el esquema de reparación en serie es muy conservador, y el obtenido con el esquema de reparación en paralelo es poco conservador. De igual manera, esta aproximación permite estimar únicamente el tiempo de reparación, es decir, hace omisión al retraso del inicio de los trabajos de reparación, etapa que contribuye de forma significativa al tiempo total de recuperación total, y por lo tanto a las pérdidas financieras causadas por interrupción de negocios.

En los últimos años en México se han llevado a cabo investigaciones novedosas en tema de optimización de diseño sísmico considerando la resiliencia de forma implícita. Por ejemplo, Santos-Santiago *et al* [9] presentan una metodología de diseño óptimo de edificios considerando demandas sísmicas y de viento, así como el daño acumulado durante el ciclo de vida del sistema estructural. En esta metodología se empleó el FEMA P-58-1 [7] para obtener el tiempo de inactividad de un edificio de 28 pisos diseñado con y sin amortiguadores viscosos y contravientos de acero. Como elemento no estructural se consideró la fachada de vidrio templado. Los resultados indicaron que las pérdidas anuales esperadas se incrementaron un 27.2 % cuando se toma en cuenta el daño acumulado por sismo, demostrando que éste tiene un impacto significativo en la toma de decisiones y por lo tanto en el diseño estructural. Asimismo, al considerar las pérdidas asociadas al tiempo de inactividad, se demostró que éstas fueron menores cuando

se incrementó el espesor del vidrio templado.

Rodríguez-Castellanos *et al* [10] realizaron un estudio de optimización de los costos de reparación, del número de heridos y de las emisiones de dióxido de carbono. Estas últimas dos variables se obtuvieron con la metodología FEMA P-58-1 [7]. El edificio que se optimizó tiene las mismas características que el estudiado por Santos-Santiago *et al* [9]. En este estudio se demuestra que el uso de amortiguadores viscosos permite reducir considerablemente las pérdidas económicas en términos de costos de reparación y de emisiones de dióxido de carbono, con un 65 % y 80 %, respectivamente, en comparación con el edificio que no cuenta con los dispositivos de disipación de energía.

Valenzuela-Beltrán *et al* [11] realizaron un estudio comparativo en el que se obtuvieron las pérdidas económicas derivadas de las reparaciones de un conjunto de edificios de concreto reforzado localizados en suelo firme y suelo blando, en la CDMX. Los edificios evaluados fueron diseñados de acuerdo con las NTC-DS del 2017 [12]. Las pérdidas económicas se estimaron empleando la metodología FEMA P-58-1 [7]. Los resultados de este estudio indicaron que la probabilidad de alcanzar o superar la pérdida total de las estructuras localizadas en suelo firme es prácticamente cero, es decir, estas estructuras son reparables incluso cuando las intensidades sísmicas son mayores a las usadas en su diseño contra colapso. Por el contrario, las estructuras desplantadas en suelo blando exhibieron probabilidades del 10 % de experimentar una pérdida total. Estos resultados demostraron que los edificios desplantados en suelo blando experimentaron mayores pérdidas económicas respecto a los que se encuentran desplantados en suelo firme.

González Calva *et al* [13] realizaron un estudio en el que evaluaron el tiempo de recuperación y pérdida de funcionalidad en términos de valores esperados para evaluar la resiliencia en escuelas públicas localizadas en Puebla, México. En este estudio se incluyó un análisis costo/beneficio, y con los resultados los autores identificaron las escuelas que presentan una resiliencia media, baja y alta. Los resultados indicaron que una cantidad importante de las escuelas evaluadas están poco preparadas en términos de resiliencia sísmica.

En general, se pueden identificar dos enfoques asociados a la resiliencia sísmica. El primero corresponde a mejorar la capacidad resiliente de las edificaciones, equipándolas mediante el uso de sistemas de control de su respuesta lateral, por ejemplo, utilizando amortiguadores viscoelásticos. De esta forma, en los estudios citados anteriormente y en muchos otros se demuestra mediante la metodología FEMA P-58-1 [7], que los costos, tiempos de recuperación y emisiones de dióxido de carbono disminuyen significativamente. El segundo enfoque corresponde a la mejora y/o propuestas alternas a la metodología FEMA P-58-1 [7] para estimar de forma más precisa los costos y tiempos de recuperación. Cabe destacar que hoy en día a nivel nacional son pocos los trabajos en los que se propone una metodología probabilista para estimar el tiempo de recuperación de edificaciones dañadas por sismo. Por esta razón, en este artículo se propone una metodología probabilista para estimar el tiempo de recuperación de la funcionalidad de edificios, ya sean nuevos o existentes, dañados por un terremoto. La metodología propuesta se basa en el método PERT. En esta aproximación se consideran aspectos fundamentales como la cantidad específica de cuadrillas y trabajadores, y la organización en flujo del tiempo que se requieren para reparar un determinado número de elementos. La metodología presentada puede considerarse una extensión de la metodología propuesta por el FEMA P-58-1 [7].

METODOLOGÍA

El tiempo de recuperación t_{rec} de una instalación que ha sido dañada por un evento sísmico puede discretizarse en dos intervalos denominados racionales e irracionales [14]. El primero corresponde al tiempo en que se realizan las reparaciones estructurales y no estructurales. El segundo está asociado a los eventos previos al inicio de las reparaciones: inspección post-sismo, revisión y/o rediseño estructural, planeación de las reparaciones, obtención del financiamiento y permisos gubernamentales para llevar a cabo las reparaciones y/o reforzamiento estructural. La cantidad de factores irracionales depende de la severidad del daño que experimentan los componentes de la instalación en estudio.

Tanto los factores racionales como irracionales involucran incertidumbres importantes; no obstante, evaluar numéricamente los primeros ha sido relativamente más sencillo debido a que en estos se encuentran involucrados procesos de índole ingenieril (*e.g.*, evaluación estructural), mientras que en los segundos intervienen procesos externos a la ingeniería (*e.g.*, obtención de permisos gubernamentales). En la Figura 2 se muestra la propuesta de un esquema simplificado que considera los factores que definen el proceso de recuperación de un edificio dañado por un terremoto.

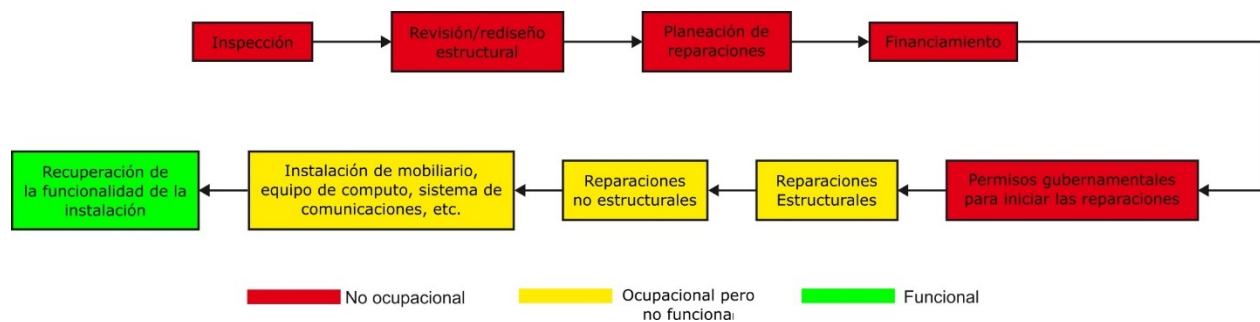


Figura 2: *Secuencia de eventos que se presentan en el proceso de reparación de un edificio dañado por un sismo, adaptado de Gutiérrez [15].*

Grupos de desempeño

Para estimar el tiempo que una edificación queda fuera de funcionamiento, es necesario definir inicialmente un inventario de los elementos estructurales, no estructurales y contenidos que son susceptibles a experimentar daño ante una demanda sísmica. En este estudio se consideran únicamente los elementos estructurales y no estructurales (arquitectónicos), ya que como se demuestra en Konstantinidis y El-Dakhakhi [16], las funciones de fragilidad que presenta el FEMA P-58-3 [17] correspondientes a los contenidos son muy conservadoras y tiene que realizarse un proceso independiente que queda fuera del alcance de este estudio.

Estados de daño de los grupos de desempeño

Existen dos formas prácticas para inferir el daño estructural y no estructural. La primera es recurrir al uso de funciones de fragilidad representativas del daño en términos discretos, *i.e.*, daño ligero, $DS1$, daño moderado, $DS2$, o daño severo, $DS3$. El daño discreto y su correspondiente probabilidad de ocurrir se encuentran en función de variables obtenidas del análisis estructural (parámetros ingenieriles de

demanda, EDP), *e.g.*, las distorsiones de entrepiso. La segunda forma de inferir el daño es similar a la primera, no obstante, es de carácter determinista y se obtiene únicamente el nivel de desempeño global de la estructura, *e.g.*, ocupación inmediata, IO , seguridad de vidas, LS , o prevención al colapso, CP [18]. La metodología propuesta en este estudio emplea funciones de fragilidad para inferir el daño, ya que en ellas se incluyen las incertidumbres inherentes al mismo.

Estimación del daño

Para estimar el estado de daño probable (DS) que desarrolla cada elemento en función de su respectiva respuesta estructural (EDP) se debe considerar la secuencia en la que se desarrollan los estados de daño, *i.e.*, si los estados de daño se presentan en forma secuencial, en forma simultánea o si los estados de daño son mutuamente excluyentes. En el estado de daño secuencial, el elemento debe experimentar primero el $DS1$, después el $DS2$, y así sucesivamente. En el estado de daño simultáneo, el elemento puede experimentar más de un estado de daño al mismo tiempo. En el estado de daño mutuamente excluyente, el elemento puede experimentar solo un estado de daño, sin importar el orden [19]. En Gutiérrez [15] pueden consultarse las ecuaciones paramétricas para estimar la probabilidad de que un elemento determinado presente un nivel de daño específico.

Para cuantificar el tiempo de reparación por elemento, se tiene que relacionar el daño probable que este experimenta con las actividades de reparación que se tienen que efectuar para devolverle su nivel de funcionamiento original, o mejor, si es posible.

Para ello, suponga que existe una función de distribución de probabilidad de tiempo de reparación por elemento $F_{TREP}(TREP \leq t_{rep} | NC, \overline{DS}, edp)$ mediante la cual es posible obtener la probabilidad de que el tiempo de reparación $TREP \leq t_{rep}$ dado un $EDP = edp$, y un estado de daño discreto $[\overline{DS}_{kl} = ds_i | NC, edp, im]$. Recurriendo al método de transformación inversa de una distribución de probabilidad es posible determinar el tiempo de reparación del componente k -ésimo como una variable aleatoria, T_{REP} , como se indica en la Ec. (2):

$$T_{REP} = F_{TREP}^{-1}(U|\theta) \quad (2)$$

donde U es una variable aleatoria distribuida uniformemente que toma valores entre 0 y 1, *i.e.*, $U \sim U(0,1)$, y θ es un vector que contiene los parámetros de la distribución de probabilidad del tiempo de reparación del componente k -ésimo. En este estudio se utilizarán las funciones de distribución de probabilidad del tiempo de reparación unitario para los grupos de desempeño recomendados por el FEMA P-58-3 [17] y que de forma sintetizada se pueden consultar en Gutiérrez [15]. El tiempo de reparación correspondiente al número de unidades u_k pertenecientes al elemento k -ésimo se estima mediante la Ec. (3):

$$\hat{T}_{REP} = T_{REP} \bullet Pr(\overline{DS}_{kl} = ds_i | NC, im) \bullet u_k \quad (3)$$

Aproximación del tiempo de recuperación utilizando el método PERT

En la realidad, los trabajos de reparación son realizados por cuadrillas de trabajo organizadas sistemáticamente con el fin de optimizar el tiempo de ejecución de las actividades involucradas. Optimizar este proceso depende principalmente de los recursos humanos y económicos disponibles y, en general, involucra grandes incertidumbres. En este trabajo se propone una metodología para aproximar el tiempo de reparación de un edificio dañado por sismos futuros. Dicha metodología está basada en la Técnica

de Revisión y Evaluación de Proyectos y el Método de Simulación de Montecarlo (PERT y MSM, respectivamente). El método PERT es una técnica recursiva utilizada para controlar y coordinar proyectos [20]. Para emplear esta técnica el proyecto debe ser dividido en eventos específicos cuya secuencia de ejecución queda terminada por actividades prescritas. Cada evento debe ser numerado de tal forma que las flechas siempre indiquen el evento precedente y el o los sucesores. Esta condición obliga a que todas las actividades precedentes a un evento sean completadas antes de que el evento inicie.

Condiciones para generar los eventos y actividades de reparación

Para optimizar el tiempo de reparación de cada grupo de desempeño se recurrirá al método PERT, descrito en la sección anterior. Para construir las actividades y eventos se proponen las siguientes reglas:

1. Proponer un número de cuadrillas y una cantidad realista de trabajadores dentro de cada cuadrilla para efectuar las reparaciones de cada grupo de desempeño según la severidad de un estado de daño en particular.
2. Asignar en la misma proporción la cantidad de elementos que se encuentran en el mismo estado de daño, n_{DS_k} , al número de cuadrillas asignadas para reparar los elementos en el estado de daño $DS = ds_k$.
3. Para definir las actividades considérese el siguiente evento. La cuadrilla c_k reparará la cantidad de elementos del conjunto $e = [e_1, e_2, \dots, e_n]$, de los cuales un subconjunto se localiza en la planta r y el resto de los elementos, m , en la planta q , donde $r < q$. Entonces, las actividades que realizará la cuadrilla c_k serán A_i^r y A_{i+1}^q , donde el subíndice indica el número de actividad y el superíndice el número de la planta del edificio. Estas actividades de reparación se deben realizar de forma secuencial por su cuadrilla correspondiente ya que la primera actividad contiene los primeros x elementos a reparar y la segunda los siguientes y elementos, correspondientes a las plantas q y r , respectivamente. Por lo tanto, las actividades que debe realizar la cuadrilla c_k pueden definirse mediante la Ec. (4):

$$A_i^j (PG_l, \overline{DS}_{kl} = ds_i, \mathbf{e}_i, FL_m, n_w | NC, im) \rightarrow c_k \quad (4)$$

4. Para todos los grupos de desempeño las reparaciones se iniciarán con las actividades cuyos elementos hayan desarrollado el estado de mayor daño. Una vez finalizadas estas actividades se prosigue a realizar las actividades cuyos elementos se encuentren en el estado de daño menor siguiente.
5. Es factible programar actividades en paralelo, ejecutadas por dos o más cuadrillas distintas, siempre y cuando dichas actividades estén definidas por reparaciones de elementos en el mismo estado de daño y correspondan al mismo grupo de desempeño.
6. Asimismo, como hipótesis se acepta que no existen interrupciones entre la reparación de elementos. En general, el tiempo de ejecución de la actividad A_i^j , dado que la estructura no colapsa ante una intensidad sísmica im y a que los elementos en estado de daño DS , pertenecientes a un grupo de desempeño específico PG , sean reparados por nw_{c_k} pertenecientes a la cuadrilla c_k , se obtiene mediante la Ec. (5):

$$\tilde{T}_{REP,c_k} = \frac{1}{nw_{c_k}} \sum_{\forall \mathbf{A}_i^j \in c_k} \hat{T}_{REP}(\mathbf{A}_i^j | NC, im, c_k) \quad (5)$$

El tiempo de inicio de algunas de las actividades depende de la finalización de una o más actividades predecesoras. En este caso, el tiempo de inicio de dicha actividad corresponde al tiempo de reparación máximo de las actividades predecesoras se calcula con la Ec. (6):

$$TI = \max \left(T_{\mathbf{A}_1^j, pred}, T_{\mathbf{A}_2^j, pred}, \dots, T_{\mathbf{A}_n^j, pred} \right) \quad (6)$$

El tiempo de finalización $TF_{\mathbf{A}_i^j}$ de la actividad $\mathbf{A}_i^j$ se calcula como la suma del tiempo inicial TI más el tiempo de reparación $\tilde{T}_{REP,c_k}$. El tiempo de reparación máximo de todo el proyecto de reparación corresponde al tiempo de finalización máximo, y se obtiene utilizando la Ec. (7):

$$T_{REP\max} = \max \left(TF_{\mathbf{A}_1^j}, TF_{\mathbf{A}_2^j}, \dots, TF_{\mathbf{A}_n^j} | NC, im \right) \quad (7)$$

Factores de retraso del inicio de las actividades de reparación

Como se mencionó anteriormente, existen eventos denominados factores irracionales que impiden el inicio de los trabajos de reparación. Comerio [14] identificó los factores irracionales de mayor relevancia: inspección post-sismo, revisión estructural, posible rediseño y reforzamiento estructural, gestión de financiamiento para pagar las reparaciones, proceso de licitación y, gestión de permisos gubernamentales para realizar las reparaciones.

En el presente estudio se emplean las distribuciones de probabilidad para evaluar el tiempo asociado a cada factor irracional propuestas en la Iniciativa de Diseño Antisísmico Basado en la Resiliencia para la Próxima Generación de Edificios (REDI™ Rating System [25]). Para determinar el tiempo asociado a cada factor irracional se realiza la transformada inversa de la distribución de probabilidad en cuestión. Los parámetros que definen la distribución de probabilidad de los factores irracionales se pueden consultar en [15 y 21]. Debido a que existen incertidumbres importantes en la secuencia en que se presentan los factores irracionales, en este artículo se utilizará la secuencia indicada en la Figura 2.

CASO DE ESTUDIO

En esta sección se presenta la evaluación del tiempo de recuperación de un edificio hipotético de concreto reforzado en el que se incluyen los muros de mampostería de relleno no reforzada. El uso del edificio es de oficinas, y está conformado por siete niveles y tres claros en cada dirección perpendicular. La altura de cada entrepiso es de 4 m, la dimensión de los claros es de 6,5 m. Para evaluar la resiliencia del edificio se consideraron siete grupos de desempeño: columnas, conexiones columna-trabe, muros de relleno de mampostería no reforzada en los marcos de la periferia, muros divisorios de Tablaroca, situados del segundo al último nivel, ventanas exteriores instaladas en toda la fachada del edificio, plafones y aspersores. En la Figura 3 se indican los ejes principales de la estructura. En Gutiérrez [15] se pueden consultar los parámetros empleados en el diseño estructural, descripción genérica del daño, actividades de reparación de los grupos de desempeño, parámetros que caracterizan las distribuciones de probabilidad de

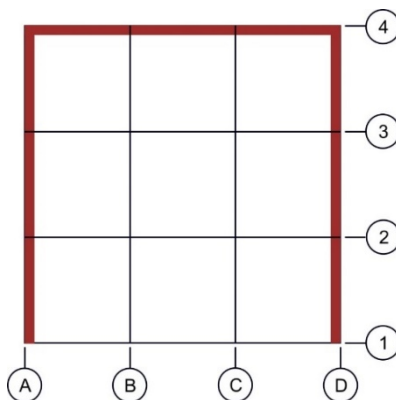


Figura 3: Vista en planta del edificio en estudio.

los estados de daño cada PG y del tiempo de reparación unitario, así como la distribución de probabilidad asociada a los factores que impiden el inicio de las reparaciones.

En años recientes (2017, 2020 y 2023) se han publicado varias actualizaciones de las Normas Técnicas Complementarias de Diseño por Sismo. No obstante, seguramente hoy en día se ha diseñado un porcentaje de edificios mucho mayor empleando las Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo del 2004 [22]. Por esta razón se evaluará el tiempo de recuperación de un edificio hipotético diseñado con la versión del 2004 de las NTC-DS [22]. Se consideró que el edificio se encuentra desplantado en la estación SCT de la CDMX (Zona IIIb, suelo blando). De acuerdo con la estructuración del edificio se determinó que a esta le corresponde un factor de comportamiento sísmico de $Q = 2$. Se empleó una distorsión de 0.002 para limitar daños en elementos no estructurales, y una de 0.015 para el estado límite de prevención al colapso. Con el diseño estructural propuesto el periodo fundamental del edificio es de 0,61 s.

En la implementación y validación de la metodología propuesta se utilizaron tres niveles de peligro sísmico cuyo periodo de retorno corresponde a los 125, 500 y 1500 años. Debido a que en este estudio se realizaron análisis dinámicos no lineales de un modelo estructural tridimensional la demanda computacional resulta bastante excesiva, motivo por el cual se emplearon un conjunto de 20 pares de acelerogramas sintéticos asociados a cada nivel de peligro sísmico.

Para generar los registros sísmicos sintéticos se utilizó el modelo de Kohrs-Sansorny *et al.* [23], el cual está basado en la Función Empírica de Green, y a diferencia de los modelos propuestos por Joyner and Boore [24], Wennerberg [25] y Ordaz *et al.* [26], permite generar sismos artificiales tomando en cuenta el proceso de liberación de energía, propagación de la ruptura de la falla tectónica, variación del contenido de frecuencia, duración del temblor en función de la magnitud del momento sísmico y caída de esfuerzos. Esto permite tomar en cuenta el daño por fatiga en los elementos estructurales debido a los ciclos de carga adicionales causados por el incremento de contenido de frecuencia en los registros sísmicos generados por sismos de magnitudes importantes.

El análisis dinámico no lineal se realizó en el programa de código abierto OpenSees [27]. El modelado de las columnas y trabes se efectuó utilizando un modelo de fibras junto con el modelo constitutivo de Chang y Mander [28] para el concreto, y el de Giuffrè-Menegotto-Pinto [29] para el acero de refuerzo. La

rigidez de los muros de mampostería de relleno no reforzada se modeló con elementos barra dispuestos en diagonal y su comportamiento inelástico con la metodología propuesta por Kadysiewski y Mosalam [30].

Análisis de los resultados

Por cuestiones de longitud máxima de este artículo a continuación se describen los resultados del análisis de evaluación de la resiliencia asociada al nivel de peligro sísmico de 1,500 años de periodo de retorno. En la Figura 4 se presentan en color gris las distorsiones de entrepiso correspondientes a cada uno de los veinte sismos sintéticos considerados en este nivel de peligro sísmico, y en color negro se presentan las distorsiones promedio de entrepiso. La línea de color verde corresponde a la distorsión máxima de entrepiso para el estado límite de servicio (0.002), mientras que la línea de color rojo indica la distorsión máxima de entrepiso para el estado límite de prevención al colapso (0.015).

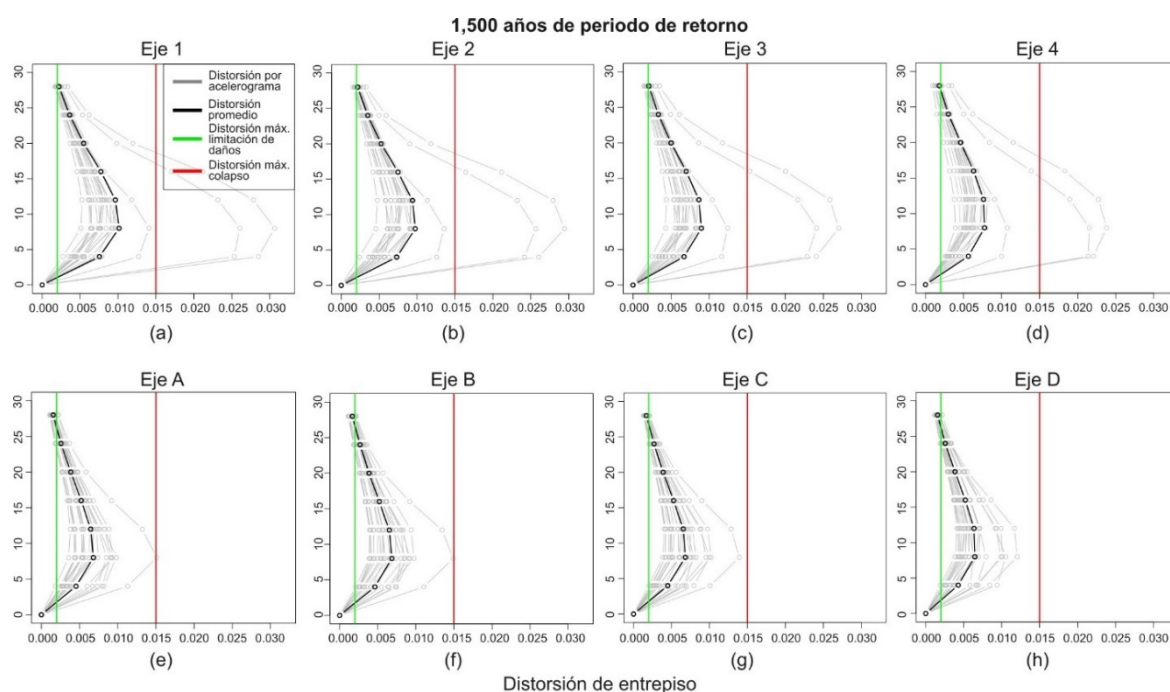


Figura 4: *Distorsiones de entrepiso que experimentan los ejes para los registros sísmicos asociados a una intensidad sísmica de 1,500 años de periodo de retorno.*

En la Figura 5 se ilustra el daño desarrollado y su correspondiente probabilidad para todos los grupos de desempeño.

Haciendo referencia a la Figura 4 se observa que la distorsión promedio se encuentra por debajo de la máxima admisible para el estado límite de prevención al colapso de 0.015. No obstante, algunas realizaciones sísmicas sí ocasionan que se supere la distorsión asociada a la de prevención al colapso. Para este caso las columnas no experimentaron daños, sin embargo, las conexiones en los primeros tres pisos desarrollaron daños ligeros, con probabilidades de 0.5 a 0.75. El estado de daño ligero en las conexiones corresponde al agrietamiento sin desconchamiento del elemento. El acero de refuerzo tampoco presenta daño. Este estado de daño se repara mediante el reemplazo del recubrimiento de concreto. En la Figu-

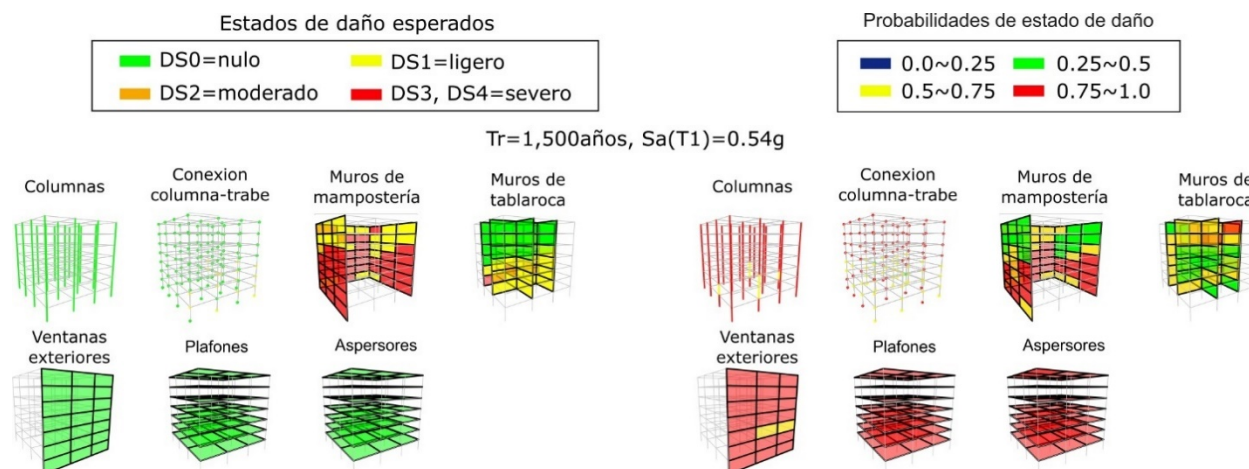


Figura 5: Estados de daño y sus respectivas probabilidades asociadas a intensidades sísmicas de 1,500 años de periodo de retorno.

ra 5 se observa que una cantidad importante de conexiones que se localizan en la parte frontal derecha experimenta estado de daño ligero. Esto indica que el edificio experimenta torsión en planta.

Respecto a los elementos no estructurales, los que experimentaron daños fueron los muros de mampostería y los muros de Tablaroca. Los primeros experimentaron daños severos en los primeros cuatro pisos con una probabilidad de 0.75 a 1.0. En los últimos dos pisos desarrollaron daños ligeros con una probabilidad de 0.5 a 0.75. El estado de daño en estos componentes está asociado con el desarrollo de grietas diagonales de ancho considerable, aplastamiento y desprendimiento de material en las esquinas de los muros. Las actividades de reparación asociadas a este nivel de daño corresponden a la sustitución de los componentes. Los muros de Tablaroca localizados del segundo al cuarto piso experimentaron daños ligeros con una probabilidad de 0.5 a 0.75, y algunos elementos desarrollaron daño severo con una probabilidad de 0.75-1.0. El daño en este tipo de elemento corresponde al agrietamiento junto con aplastamiento ligero en sus esquinas. Las reparaciones de este nivel de daño están asociadas con la reparación de las grietas y aplicación de pintura al elemento. El estado de daño severo corresponde al pandeo de los tornillos de conexión y desarrollo de deformaciones importantes en las guías del panel. Cuando se presenta este estado de daño se deben de reemplazar los elementos.

La simulación de la reparación de los grupos de desempeños que integran al edificio se realizó optimizando el tiempo de reparación y los recursos humanos mediante el método PERT, de acuerdo con la metodología planteada anteriormente. Como ya se mencionó, es necesario cuantificar el tiempo asociado a los factores irracionales. En la Figura 2 se presenta una propuesta del orden genérico en que se deben presentar estos eventos.

En la Figura 6 se ilustra la distribución de probabilidades del tiempo correspondiente a los factores irracionales, la del tiempo de reparación y tiempo de recuperación total, para los tres niveles de peligro sísmico considerados. Para un nivel de confianza del 90 % y para el nivel de peligro sísmico de 125 años de periodo de retorno el tiempo de recuperación es de 14 días. Las actividades de recuperación consisten en la inspección post-sísmica del edificio y de la ejecución de las reparaciones. Debido a que no se

presentaron daños importantes en los elementos estructurales y no estructurales se aceptó que se puede despreciar el tiempo correspondiente al rediseño/reforzamiento estructural, obtención de financiamiento económico y de permisos gubernamentales. En relación con los niveles de peligro sísmico de 500 y 1,500 años se consideran todos los eventos de la Figura 2. El tiempo de recuperación total para estas intensidades es de 122 y 523 días respectivamente.

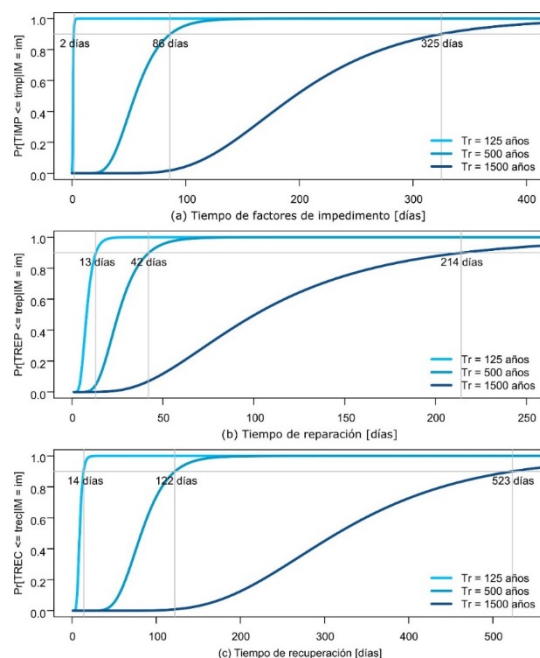


Figura 6: Distribuciones de probabilidad asociadas al tiempo de (a) retraso, (b) reparación, y (c) recuperación total.

El impacto que tienen los factores irracionales sobre el tiempo de recuperación total es de principal importancia. Para el análisis asociado a los 125 años de periodo de retorno, el tiempo de retraso consume un 13 % (2 días) del tiempo de recuperación total, un 67 % (86 días) y 60 % (325 días) para los niveles de peligro sísmico de 500 y 1,500 años. Es evidente que la contribución de los factores irracionales contribuye de forma importante a las pérdidas financieras indirectas. Una alternativa para reducir su impacto podría ser equipar a la estructura mediante un sistema de control de la respuesta sísmica, por ejemplo, contravientos restringidos al pandeo, aisladores de base, etc.

Finalmente, cabe destacar que el edificio fue diseñado empleando las NTC-DS del 2004 [26], en donde se recomiendan distorsiones de entrepiso límite de 0.002 y 0.015 para el estado límite de servicio y prevención al colapso, respectivamente. En la versión más reciente de las NTC-DS del año 2023 [?], también se recomiendan dichos valores, no obstante, las ordenadas espectrales para el estado límite de prevención al colapso son del orden del 90 % mayores (para el periodo fundamental de la estructural de 0.61s). Es decir, si se diseñara el edificio con las NTC-DS del 2023 [31], lo más probable es que los daños tanto en los elementos estructurales como no estructurales se reduzcan considerablemente ante intensidades sísmicas superiores a los 500 años de periodo de retorno.

CONCLUSIONES

En este trabajo se presentó una metodología para estimar la distribución de probabilidades del tiempo de recuperación que tardaría un edificio que ha experimentado daños estructurales y no estructurales a causa de un evento sísmico. Dicha metodología es consistente con la definición que propone el MCEER de resiliencia estructural y con el esquema de evaluación del desempeño estructural que propone el PEER. En general se tienen las siguientes conclusiones particulares:

- La metodología propuesta puede considerarse una extensión de la metodología del FEMA P-58-1 [9], la cual propone dos esquemas de reparación, uno en serie y otro en paralelo; no obstante, ninguna de las dos aproximaciones considera el tiempo de impedimento del inicio de las reparaciones.
- La metodología propuesta está basada en un esquema recursivo, en el que se incluye la cantidad de personal para realizar las reparaciones. Esto permite cuantificar de una manera más realista el tiempo de reparación. Asimismo, con esta propuesta se eliminan las inconsistencias de los esquemas de reparación en serie y en paralelo del FEMA P-58-1 [9].
- Reducir el tiempo de recuperación mediante el mejoramiento del desempeño estructural conduce a reducir de forma implícita el riesgo asociado a la pérdida de vidas humanas, pérdida de funcionalidad y pérdidas económicas directas e indirectas.
- De acuerdo con el ejemplo presentado, mientras la instalación experimente mayor cantidad de daño estructural y no estructural, el tiempo que impide el inicio de las reparaciones tendrá un mayor impacto en el tiempo total de recuperación, y por lo tanto en las pérdidas económicas indirectas.
- Por otro lado, la evaluación del tiempo de recuperación puede ser utilizada para definir la prima pura que se debe pagar a las aseguradoras tomando en cuenta las pérdidas financieras indirectas que se dan en este lapso de tiempo.

Las limitantes que tiene el presente trabajo son las siguientes:

- Los modelos no lineales consumen una cantidad importante de tiempo, principalmente cuando la estructura incursiona de forma significativa en el rango no lineal. Por esta razón se presentó la evaluación del tiempo de recuperación de una sola edificación. No obstante, empleando modelos estructurales simplificados es posible evaluar el tiempo de recuperación de un inventario de edificios. Esto permitiría conocer el tiempo de recuperación en términos probabilistas de una comunidad o ciudad.
- Las funciones de distribución de probabilidad para estimar tanto el tiempo de reparación unitario y la cantidad de trabajadores por cuadrilla para reparar los distintos niveles de daño discreto que experimentan tanto los elementos estructurales como no estructurales corresponden a parámetros calibrados con valores obtenidos en Estados Unidos. Por lo tanto, es conveniente que se desarrollen

funciones de fragilidad para estimar el daño tanto en elementos estructurales como no estructurales, distribuciones de probabilidad de costos y tiempos de recuperación, cantidad de trabajadores y número de cuadrillas para reparar elementos dañados, con parámetros y criterios mexicanos.

- La metodología presentada en este documento no permite calcular las pérdidas económicas derivadas del impacto al medio ambiente producto de la reparación de la instalación, por lo que en investigaciones posteriores tendrá que tomarse en cuenta, ya que como se describió en la sección de antecedentes, dicha variable genera costos adicionales que no pueden ser despreciados.

AGRADECIMIENTOS

El primer autor de este artículo agradece al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías por la beca otorgada para realizar sus estudios de doctorado. El primer y tercer autor agradecen el apoyo económico brindado por el proyecto titulado “Optimización del procedimiento de evaluación y diseño sísmico basado en control de daño y variables de decisión de la resiliencia” patrocinado por El Instituto Para la Seguridad de las Construcciones en la Ciudad de México.

DECLARACIÓN DE CONTRIBUCIÓN DE AUTORES Y COLABORADORES

Juan Gutiérrez: Conceptualización, metodología y preparación del borrador original. Francisco Bañuelos: Conceptualización, validación y edición. Gustavo Ayala: Conceptualización, supervisión y redacción.

REFERENCIAS

- [1] T. Toyoda. Economic impacts of Kobe earthquake: A quantitative evaluation after 13 years. In *Memorias de la 5th International Information System for Crisis Response and Management (ISCRAM) Conference*, ISCRAM, Washington, DC, EUA, 2008.
- [2] F. Galvis, E. Miranda, P. Heresi, H. Dávalos, and J. Silos. Preliminary statistics of collapsed buildings in Mexico City in the September 19, 2017 Puebla-Morelos Earthquake. Reporte Técnico, Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental John A. Blume, Universidad de Stanford, Stanford, CA, USA, 2017.
- [3] GCDMX and 100RC. Aprender del sismo para ser más resilientes. Colaboración entre el Gobierno de la Ciudad de México y el Programa 100 Ciudades Resilientes de la Fundación Rockefeller, 2018.
- [4] M. Bruneau, S. E. Chang, R. T. Eguchi, G. C. Lee, T. D. O’Rourke, A. M. Reinhorn, M. Shinozuka, K. Tierney, W. A. Wallace, and D. von Winterfeldt. A framework to quantitatively assess and enhance the resilience of communities. *Earthquake Spectra*, vol. 19, no. 4, pp. 733–752, 2003. DOI: 10.1193/1.1623497.
- [5] A. Cornell and H. Krawinkler. Progress and challenges in seismic performance assessment. *PEER Center News*, Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, Berkeley, CA, USA, 2000.

-
- [6] FEMA. Seismic performance assessment of buildings, Volume 1-Methodology (FEMA P-58-1). Federal Emergency Management Agency, Washington, DC, USA, 2012a.
- [7] FEMA. Seismic performance assessment of buildings, Volume 1-Methodology (FEMA P-58-1). Federal Emergency Management Agency, Washington, DC, USA, 2018a.
- [8] D. Y. Yoo. Repair time model for different building sizes Considering the earthquake hazard. Tesis de maestría, California State University, Long Beach, CA, USA, 2016.
- [9] M. A. Santos-Santiago, S. E. Ruiz, and L. Cruz-Reyes. Optimal design of buildings under wind and earthquake, considering cumulative damage. *Journal of Building Engineering*, vol. 56, 2022. DOI: 10.1016/j.jobbe.2022.104760.
- [10] A. Rodríguez-Castellanos, M. Niño-Lázaro, S. E. Ruiz, and M. A. Santos-Santiago. Diseño sísmico sustentable de estructuras equipadas con disipadores viscosos. *Revista de Ingeniería Sísmica*, no. 112, pp. 72–100, 2024. DOI: 10.18867/ris.112.638.
- [11] F. Valenzuela-Beltrán, J. R. Gaxiola-Camacho, M. D. Llanes-Tizoc, V. Baca, J. M. Leal-Graciano, and A. Reyes-Salazar. Seismic loss assessment of code-compliant moment-resisting RC buildings located on different soil conditions of Mexico City. *Engineering Structures*, vol. 300, 2024. DOI: 10.1016/j.engstruct.2023.117195.
- [12] GCDMX. Normas técnicas complementarias para el diseño por sismo. Núm. 220 Bis, Gaceta Oficial de la Ciudad de México, MX, 2017.
- [13] C. González Calva, M. Niño-Lázaro, and G. Ayala Milián. Definición de tiempos de recuperación y pérdida de funcionalidad esperada para la evaluación de la resiliencia sísmica en escuelas públicas de México. *Revista de Ingeniería Sísmica*, no. 112, pp. 28–54, 2024. DOI: 10.18867/ris.112.636.
- [14] M. C. Comerio. Estimating downtime in loss modeling. *Earthquake Spectra*, vol. 22, no. 2, pp. 349–365, 2006. DOI: 10.1193/1.2191017.
- [15] J. Gutiérrez. Seismic resilience assessment of urban buildings. Tesis de Doctorado, Universidad Nacional Autónoma de México, MEX, 2021.
- [16] D. A. Konstantinidis and W. El-Dakhakni. Evaluation of ASCE 43-05 seismic design criteria for rocking objects in nuclear facilities. *Journal of Structural Engineering*, vol. 11, no. 142, pp. 04016110–1–04016110–13, 2016. DOI: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001581.
- [17] FEMA. Seismic performance assessment of buildings, Volume 3-Supporting Electronic Materials and Background Documentation (FEMA P-58-3). Federal Emergency Management Agency, Washington, DC, USA, 2018b.
- [18] ASCE. Seismic evaluation and retrofit of existing buildings (ASCE 41-13). American Society of Civil Engineers, Reston, VA, USA, 2013.

-
- [19] K. A. Porter. Assembly-based vulnerability of buildings and its uses in seismic performance evaluation and risk-management decision-making. Tesis de Doctorado, Universidad de Stanford, Stanford, CA, USA, 2000.
- [20] S. B. Richmond. Operations research for management decisions. Editorial John Wiley and Sons, Englewood, NJ, USA, 1969.
- [21] I. Almulfti and M. Willford. Resilience-based earthquake design initiative for the next generation of buildings: REDiTM Rating System. ARUP, San Francisco, CA, EUA, 2013.
- [22] GCDMX. Normas técnicas complementarias para diseño por sismo. Tomo I, No. 103-BIS, Gaceta Oficial del Distrito Federal, MX, 2004.
- [23] C. Kohrs-Sansorny, F. Couboulex, M. Bour, and A. Deschamps. A two-stage method for ground-motion simulation using stochastic summation of small earthquakes. *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 95, no. 4, pp. 1387–1400, 2005. DOI: 10.1785/0120040211.
- [24] W. Joyner and D. Boore. On simulating large earthquakes by Green's function addition of smaller earthquakes. *Earthquake Source Mechanics*, vol. 37, pp. 269–274, 1986. DOI: 10.1029/GM037p0269.
- [25] L. Wennerberg. Stochastic summation of empirical Green's functions. *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 80, pp. 1418–1432.
- [26] M. Ordaz, J. Arboleda, and S. Singh. A scheme of random summation of an empirical Green's function to estimate ground motions from future large earthquakes. *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 85, no. 6, pp. 1635–1647.
- [27] S. Mazzoni, F. McKenna, M. H. Scott, G. L. Fenves, et al. Open system for earthquake simulation (OpenSees). Pacific Earthquake Engineering Research Center, Universidad de California, Berkeley, CA, USA, 2007.
- [28] G. A. Chang and J. B. Mander. Seismic energy-based fatigue damage analysis of bridge columns: Part 1-Evaluation of seismic capacity. Informe Técnico, NCEER-94-0006, Universidad Estatal de Nueva York, Búfalo, NY, USA, 1994.
- [29] A. Giuffrè and P. E. Pinto. Il comportamento del cemento armato per sollecitazioni cicliche di forte intensità. *Giornale del Genio Civile*, Roma, ITA, 1970.
- [30] S. Kadysiewski and K. M. Mosalam. Modeling of unreinforced masonry infill walls considering in-plane and out-of-plane interaction. Reporte Técnico, Núm. 2008/102, Pacific Earthquake Engineering Research, Universidad de California, Berkeley, CA, USA, 2009.
- [31] GCDMX. Norma técnica complementaria para el diseño por sismo. No. 1229, Gaceta Oficial de la Ciudad de México, MX, 2023.