

INFLUENCIA DE LA CONFIGURACIÓN DE MUROS DE CORTE EN LA FRAGILIDAD SÍSMICA DE EDIFICIOS CON SISTEMA DUAL DE CONCRETO REFORZADO

Fernando Velarde⁽¹⁾, Juan Bojórquez⁽¹⁾, Edén Bojórquez⁽¹⁾, Henry Reyes⁽²⁾, Robespierre Chávez⁽¹⁾, Mario D Llanes⁽¹⁾, Federico Valenzuela⁽¹⁾, Víctor Baca⁽¹⁾, Juan Acosta⁽¹⁾

RESUMEN

Los muros de corte, integrados en sistemas convencionales de marcos resistentes a momento de concreto reforzado, han demostrado ser efectivos como elementos de protección sísmica al mejorar la estabilidad lateral y reducir la fragilidad estructural de las edificaciones. No obstante, el impacto de diferentes configuraciones en la respuesta sísmica ha sido poco explorado utilizando modelos tridimensionales avanzados. Este estudio adopta un enfoque probabilístico para analizar la fragilidad sísmica de cinco edificios de ocho niveles con variaciones en la disposición de muros de corte en planta utilizando modelos en 3D. Para lograr los objetivos del presente trabajo, en primer lugar, se evalúa la capacidad estructural de las edificaciones mediante Análisis Dinámicos Incrementales (ADI). Para los análisis sísmicos se consideraron registros sísmicos representativos del suelo blando de la Ciudad de México, los cuales fueron escalados para distintos niveles de intensidad. En segundo lugar, se obtienen las curvas de fragilidad sísmica para todos los edificios considerando las diferentes configuraciones en planta de los muros de corte. Finalmente, a partir del análisis de los resultados se observa que la disposición simétrica de los muros en el exterior de la edificación reduce significativamente la fragilidad sísmica al minimizar efectos de torsión, especialmente en las columnas exteriores. En contraste, la ubicación de muros de corte en el centro, aunque común para alojar elevadores o instalaciones, resulta menos eficiente desde el punto de vista estructural, exigiendo mayores secciones en los marcos para alcanzar un comportamiento comparable con las otras configuraciones en términos de fragilidad. Por lo tanto, es de gran relevancia que exista una planificación estratégica en el diseño de sistemas duales.

Palabras clave: fragilidad sísmica; muros de corte; sistema dual; análisis dinámico incremental

INFLUENCE OF SHEAR WALL CONFIGURATION ON SEISMIC FRAGILITY OF BUILDINGS WITH DUAL REINFORCED CONCRETE SYSTEM

ABSTRACT

Shear walls, integrated into conventional reinforced concrete moment-resisting frame systems, have proven to be effective seismic protection elements by enhancing lateral stability and reducing the

Artículo recibido el 22 de julio de 2024 y aprobado para su publicación el 27 de febrero de 2025. Se aceptarán comentarios y/o discusiones hasta cinco meses después de su publicación.

⁽¹⁾ Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Sinaloa. Calzada de las Américas y Boulevard Universitarios S/N, Ciudad Universitaria, Culiacán, Sinaloa, México, C.P. 80040. fvelarde.fic@uas.edu.mx; juanbm@uas.edu.mx; eden@uas.edu.mx; robspierre@uas.edu.mx; mariollanes@uas.edu.mx; fvalenzuelab@uas.edu.mx; victorbaca@uas.edu.mx; juan_fran-ac@hotmail.com

⁽²⁾ Departamento de Física, Matemáticas e Ingeniería, Universidad de Sonora, Lázaro Cárdenas del Río 100, Francisco Villa, Navojoa, Sonora, México, C.P. 85880. henry.reyes@unison.mx

structural fragility of buildings. However, the impact of different configurations on seismic response has been insufficiently explored using advanced three-dimensional models. This study adopts a probabilistic approach to analyze the seismic fragility of five eight-story buildings with variations in the in-plane distribution of shear walls using 3D models. To achieve the objectives of this work, the structural capacity of the buildings was first assessed through Incremental Dynamic Analysis (IDA). Seismic analyses considered representative ground motion records from the soft soils of Mexico City, which were scaled to different intensity levels. Subsequently, fragility curves were developed for all the buildings, taking into account the varying in-plane configurations of the shear walls. The results reveal that a symmetrical arrangement of shear walls along the building's exterior significantly reduces seismic fragility by minimizing torsional effects, particularly in exterior columns. Conversely, placing shear walls at the center of the building, a common practice for accommodating elevators or utility installations, proves less efficient structurally, requiring larger frame sections to achieve comparable fragility levels. Consequently, strategic planning in the design of dual systems is crucial to optimizing seismic performance.

Keywords: seismic fragility; shear walls; dual system; incremental dynamic analysis

INTRODUCCIÓN

En la siempre evolutiva ingeniería estructural, la búsqueda de alternativas que mejoren la seguridad y la resistencia ante eventos sísmicos continúa siendo un objetivo primordial. La Ciudad de México, como una metrópoli densamente poblada y con una historia sísmica notable, enfrenta desafíos significativos en términos de la vulnerabilidad estructural ante eventos sísmicos. En este sentido, es fundamental comprender el efecto de los terremotos en las estructuras para continuar mejorando su comportamiento sísmico y disminuir la fragilidad sísmica. Para abordar este desafío, se han empleado diversos sistemas de disipación de energía que se incorporan al sistema tradicional de marcos resistentes a momento para mejorar, o restaurar la capacidad de los edificios para resistir eventos sísmicos, como lo son los contravientos restringidos al pandeo (Ruiz Gómez *et al.*, 2020), aisladores de base (Bhandari *et al.*, 2019), amortiguadores de masa sintonizada (Wong y Harris, 2012), entre otros; sin embargo, hacen falta más estudios enfocados a los elementos de protección sísmica que brindan estabilidad lateral, como los outriggers (Sthapit *et al.*, 2023) y muros de concreto reforzado (Wiyono *et al.*, 2020).

El sistema dual de concreto reforzado (CR) es una estrategia de diseño que ha surgido como respuesta integral a este desafío de disminuir la fragilidad sísmica de los edificios de mediana y gran altura, (Elhegazy *et al.*, 2020). Este enfoque de criterio estructural combina dos sistemas: marcos resistentes a momentos y muros de CR. Estos últimos son diseñados específicamente para resistir la fuerza cortante generada por un terremoto, y se utilizan ampliamente en edificios de mediana y gran altura para aumentar la rigidez y la resistencia contra cargas laterales (Phadnis, 2021). Por lo tanto, los muros colaboran con los marcos para superar las deficiencias presentes en los sistemas convencionales, mejorando la capacidad global de los edificios para resistir terremotos de manera más efectiva; además, logrando disminuir de manera importante los desplazamientos laterales.

En el ámbito de la investigación reciente, se ha observado un marcado aumento en los esfuerzos por comprender y mejorar los sistemas duales de CR, donde ya se han encontrado mejoras significativas en la vulnerabilidad frente a sistemas tradicionales a base de marcos rígidos (Pitilakis y Petridis, 2022). Existen estudios como el de Mibang y Choundhury (2021) que han explorado la interacción entre los diferentes elementos estructurales que componen a este tipo de estructuración y la de Ahkam Dwi *et al.* (2022) que analizaron la eficacia de enfoques de diseño particulares para mejorar la respuesta estructural de sistemas

de CR; sin embargo, es importante mencionar que se ha observado que para evaluar con mayor precisión la fragilidad sísmica de los edificios con muros de corte se necesita realizar análisis sofisticados y modelos analíticos más complejos (Mibang y Choudhury, 2021). Nótese que la mayoría de los casos de estudio en la actualidad utilizan modelos simplificados en 2 dimensiones como el desarrollado por Eisa y Eisa (2020) o bien, se utilizan modelos complejos en tres dimensiones, pero con ausencia de modelos constitutivos específicos para el CR en muros de corte que consideren aspectos importantes como el concreto confinado y no confinado en los elementos de borde (Ismael y Ahmed, 2023). Por otro lado, aunque se ha estudiado la fragilidad sísmica de sistema duales con análisis más refinados (Gwalani *et al.*, 2020) no se ha estudiado el efecto que puede ocasionar las distintas configuraciones de muros en la fragilidad sísmica.

En el contexto de esta evolución, con el propósito de reducir la fragilidad sísmica en las estructuras, este estudio se centra en evaluar mediante un enfoque probabilístico cómo la configuración de muros de concreto afecta en la respuesta estructural en sistemas duales de CR. Para lo anterior, se realiza una comparación de cinco edificios de ocho niveles de CR diseñados con estructuración dual y posteriormente sometidos a ADI considerando una familia de doce registros sísmicos; manteniendo la misma configuración geométrica, tanto en planta como en altura, pero variando la ubicación en planta de los muros de corte. Estos edificios han sido diseñados conforme a las Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo (NTC-DS-23) y las Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Concreto (NTC-DCEC-23) del Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal; posteriormente se emplean análisis no lineales ejecutados mediante modelos tridimensionales usando OpenSees (McCkenna *et al.*, 2010) para evaluar aspectos de fragilidad sísmica. La metodología incluye el proceso de diseño y la realización de ADI utilizando una familia de acelerogramas representativos del suelo blando de la Ciudad de México. Este enfoque permite obtener una mejor comprensión de cómo la ubicación estratégica de los muros de corte influye en la capacidad de los edificios para resistir eventos sísmicos, contribuyendo así al desarrollo de estrategias de diseño más efectivas y seguras en áreas sísmicamente activas.

METODOLOGÍA

Selección y diseño de los modelos de estudio

La metodología se ilustra mediante la evaluación de la fragilidad sísmica de un edificio de ocho niveles estructurado con un sistema dual de CR, variando la disposición de los muros de corte en planta. Las edificaciones están caracterizadas por una disposición de 4 crujías en la dirección X, cada una con una longitud de 6 metros, y 3 crujías en la dirección Y, cada una con una longitud de 7 metros. En todos los casos, la altura de entrepiso se ha mantenido constante en 3.5 metros, empleándose un sistema de piso con losa maciza reforzada en dos direcciones. Se consideró uso de oficinas para la edificación. La geometría en planta definida para todos los edificios y su correspondiente elevación típica se muestra en la Fig. 1.

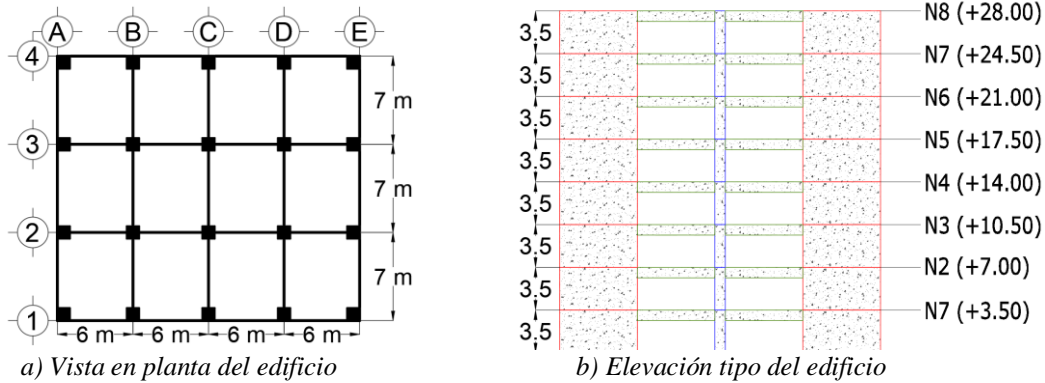


Figura 1. Geometría de los edificios (acotaciones en metros).

Se realizó el diseño de cinco edificios de CR, en cada modelo se incorporaron los muros de cortante ubicados en diferentes posiciones. Las cinco variantes resultantes fueron denominadas para efectos de estudio como Modelo (i), donde i representa el número de las cinco configuraciones planteadas, como se ilustra en la Fig. 2. Se establecieron restricciones para la evaluación de la distorsión máxima de entrepiso (DME) ante sismos con un periodo de recurrencia igual o mayor a 475 años, con un valor de $d/h = 0.01$, donde "d" representa el desplazamiento relativo entre los pisos y "h" la altura del entrepiso; esto de acuerdo con la normativa considerada en el presente estudio.

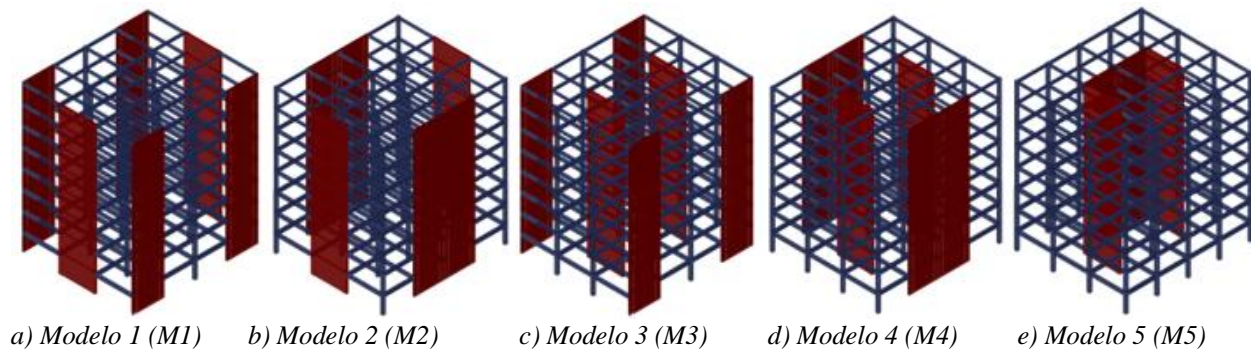


Figura 2. Modelos tridimensionales realizados en software comercial para cada uno de los edificios en estudio.

Para el análisis y diseño de las cinco configuraciones estructurales se consideraron los métodos establecidos en los capítulos 2 y 6 de las NTC-DCEC-23. La Fig. 3 ilustra los espectros obtenidos directamente del Sistema de Información de la Amenaza Sísmica de la Ciudad de México (SASID) para realizar las revisiones correspondientes. Se consideró el efecto de agrietamiento en los elementos estructurales y se llevaron a cabo las verificaciones de los límites de resistencia y servicio de acuerdo con las regulaciones establecidas en la reglamentación. Se consideraron los efectos bidireccionales del sismo, tal como se indican las normas de diseño.

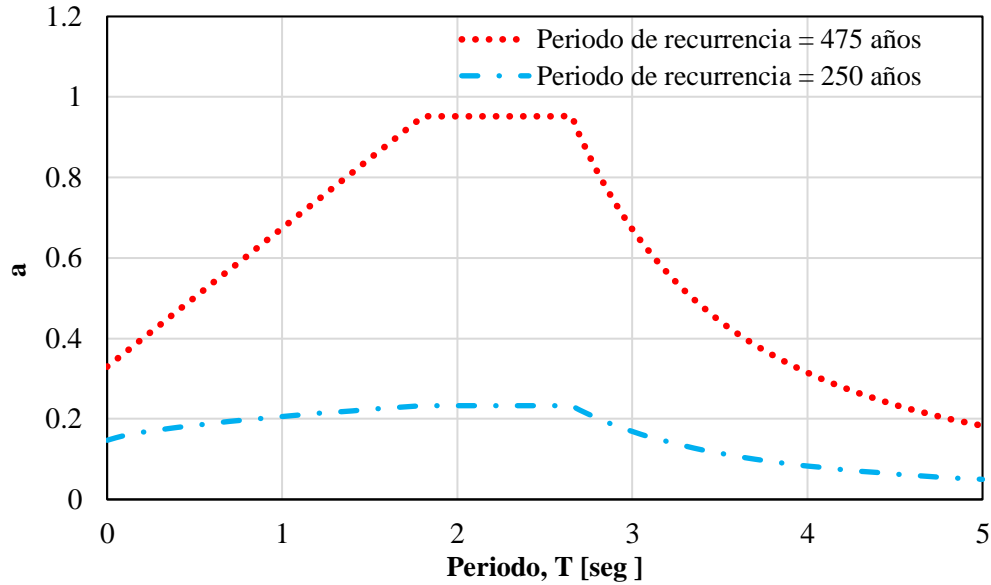


Figura 3. Espectros para la revisión y el diseño de los modelos estructurales

Registros sísmicos

Los registros de aceleración, también conocidos como registros sísmicos, son mediciones de la aceleración experimentada por el suelo durante un terremoto. Estos registros se obtienen mediante instrumentos llamados acelerógrafos, que registran las vibraciones del suelo en respuesta al movimiento telúrico. La aceleración registrada se representa en función del tiempo y proporciona información sobre la intensidad y la duración del movimiento del suelo durante un sismo (Chopra, 2007). Estos registros se utilizan para calibrar y validar modelos estructurales en ADI. Al incorporar los registros de aceleración en el análisis, se puede simular de manera más precisa el comportamiento estructural, lo que permite evaluar su respuesta ante diferentes niveles de intensidad sísmica.

La selección de registros sísmicos para los ADI se realizó considerando los lineamientos de las NTC-DS-2023 y el RCDF, asegurando su representatividad para las condiciones sísmicas del suelo blando de la Ciudad de México (Zona IIIb). Los registros seleccionados siguieron la forma espectral del espectro de peligro uniforme (EPU) con dispersiones mínimas en los periodos fundamentales de vibración de cada una de las estructuras, siendo estos del tipo de subducción que se caracterizan por tener una amplificación cercana al periodo del suelo $T_s \approx 2$ segundos debido a los suelos blandos. Adicionalmente, se consideró que tuvieran una magnitud momento, M_w , iguales o superiores a 6.9 y que fueran de diferentes épocas para considerar la rigidización del suelo y los cambios en pseudoaceleración y periodo predominante del suelo a través de los años. En total, se seleccionaron doce sismos que cumplen con estas condiciones, garantizando la consistencia y precisión en los análisis. Los detalles más relevantes de estos eventos sísmicos se resumen en la Tabla 1.

Tabla 1. Características de los eventos sísmicos

Sismo	Fecha del sismo	Coordenadas del epicentro	Magnitud	Estación
S1	97-01-11	17.910 N; 103.04 W	6.9	Valle Gómez
S2	95-09-14	16.31 N; 98.88 W	7.4	Tlatelolco
S3	95-10-09	18.74 N; 104.67 W	7.3	Garibaldi
S4	89-04-25	16.603 N; 99.4 W	6.9	Alameda
S5	95-10-09	18.74 N; 104.67 W	7.3	Liverpool

Influencia de la configuración de muros de corte en la fragilidad sísmica de edificios con sistema dual de concreto reforzado

Sismo	Fecha del sismo	Coordenadas del epicentro	Magnitud	Estación
S6	97-01-11	17.9 N; 103 W	6.9	Cordoba
S7	89-04-25	16.603 N; 99.4 W	6.9	C.U. Juarez
S8	95-09-14	16.31 N; 98.88 W	7.2	Cujp
S9	85-09-19	18.08 N; 102.942 W	8.1	SCT B-1
S10	95-10-09	18.74 N; 104.67 W	7.3	sector popular
S11	17-09-19	19.394 N; 99.148 W	7.1	SCT B-2
S12	17-09-19	19.449 N; 99.137 W	7.1	Tlatelolco

En la Fig. 4 se muestran los espectros de respuesta elásticos (pseudoaceleración) obtenidos a partir de los registros, considerando un coeficiente de amortiguamiento del 5% del amortiguamiento crítico ($\zeta=5\%$). En los análisis dinámicos, se incluyeron de manera simultánea ambas componentes horizontales de los registros sísmicos, garantizando una representación precisa de los efectos multidireccionales de la acción sísmica. La intensidad de estas componentes se combinó utilizando la media cuadrática, según la siguiente expresión:

$$Sa_{(g)} = \sqrt{\frac{Sa^2_{EW}(T) + Sa^2_{NS}(T)}{2}} \quad (1)$$

Donde: $Sa_{EW(T)}$ es la aceleración espectral de la componente Este-Oeste del registro para el periodo de la estructura, y $Sa_{NS(T)}$ representa la aceleración espectral para la componente Norte-Sur.

Los espectros de respuesta de pseudoaceleración, ajustados para considerar ambas componentes horizontales y escalados a la intensidad del EPU del sitio, se ilustran en la Figura 5. En esta figura, se señala con una línea punteada el periodo fundamental de vibración de cada modelo, destacándose que los modelos M1 y M2 comparten el mismo periodo, al igual que los modelos M3 y M4, resultando en tres conjuntos diferenciados de espectros de respuesta. Para los ADI, los registros sísmicos fueron escalados en un rango de valores de $Sa(T_1)$ desde 0.1g hasta 1.5g, o hasta que la estructura alcanzó el estado de colapso.

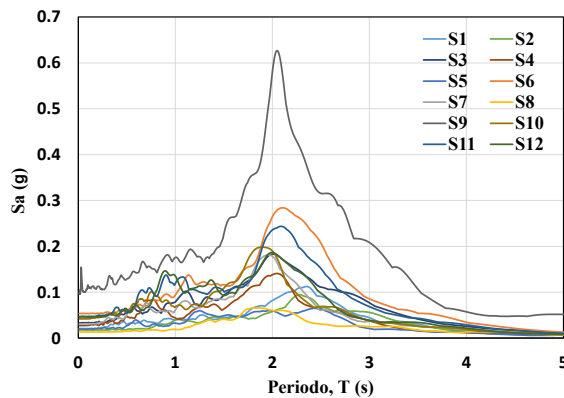


Figura 4. Espectros de respuesta elásticos ($\zeta=5\%$)

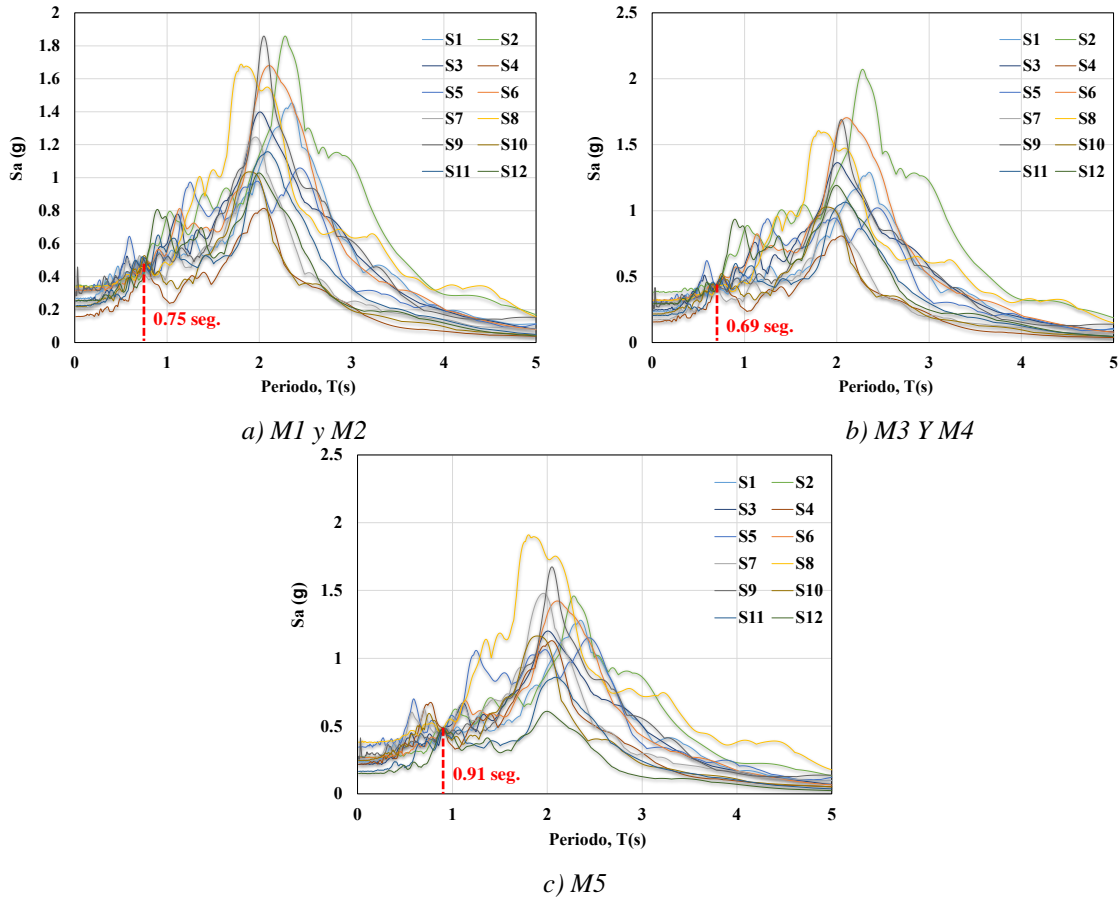


Figura 5. Espectros elásticos de respuesta escalados al periodo fundamental de cada estructura

Análisis sísmico

En el presente estudio se emplearon ADI para estimar la curva de capacidad estructurales de los edificios. Este método se destaca por su eficacia en la evaluación del comportamiento estructural ante distintos niveles de actividad sísmica. Este enfoque, como señalan Vamvatsikos y Cornell (2001), proporciona datos específicos que con otros tipos de análisis no pudieran obtenerse y que son esenciales para interpretar con mayor precisión el comportamiento de una estructura ante terremotos. La adopción del ADI por parte de organizaciones como el FEMA subraya su importancia en la evaluación del desempeño sísmico y la capacidad resistente al colapso de las estructuras (FEMA-356, 2000).

El ADI se implementa mediante análisis no lineales "paso a paso", utilizando registros de aceleración escalados para varias intensidades sísmicas. Estos análisis generan curvas ADI que relacionan índices de desempeño, como las DME, con niveles de intensidad, como las pseudoaceleraciones espectrales. Estas curvas proporcionan una visión detallada de la capacidad máxima de la estructura en el estado límite de interés, desde la etapa elástica hasta las etapas elasto-plásticas y el colapso final. Este conjunto de información, tal como lo señala (Chen *et al.* (2021), es fundamental para orientar las decisiones en el diseño y la evaluación del riesgo sísmico.

Para llevar a cabo los análisis estructurales no lineales, se desarrollaron modelos tridimensionales desarrollados en OpenSees, donde se optó por representar las vigas y columnas mediante un enfoque de tipo fibra, utilizando el método de plasticidad distribuida. En este método, cada fibra subdividida (Kostic *et al.*,

2011) está asociada a un comando “UniaxialMaterial” que se implementa en el software para caracterizar las relaciones tensión-deformación uniaxiales para el concreto, tanto confinado como no confinado, definido por Concrete02 (Mohd Yassin, 1994), así como para el acero de refuerzo, empleado mediante Steel02 (Filippou et al., 1983). Para los muros de concreto se siguieron las directrices establecidas por Kolozvari *et al.* (2021), considerando la interacción flexión-corte mediante el uso de elementos SFI-MVLEM-3D. Estos elementos definen el comportamiento del concreto confinado y no confinado a través de ConcreteCM, un modelo constitutivo histórico uniaxial, y del acero de refuerzo mediante SteelMPF, según lo propuesto por Kolozvari *et al.* (2015).

La Fig. 6 muestra el conjunto de las curvas de capacidad obtenida del ADI para el Modelo M1.

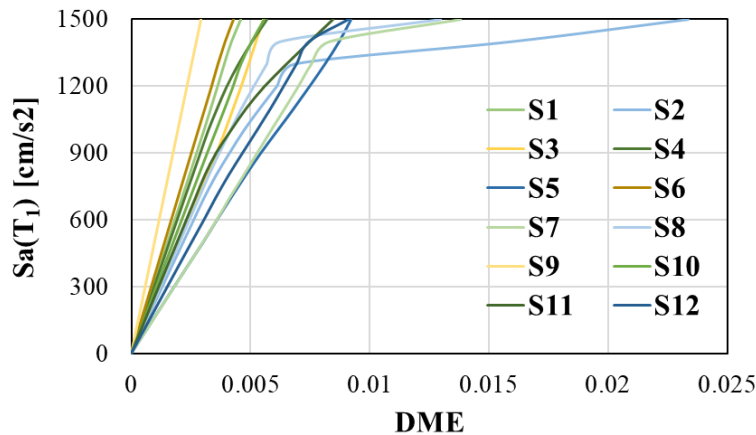


Figura 6. Conjunto de curvas ADI obtenidas para el Edificio 1

Las Fig. 7 y 8 muestran los esquemas de discretización para los muros de 6 y 7 metros, respectivamente.

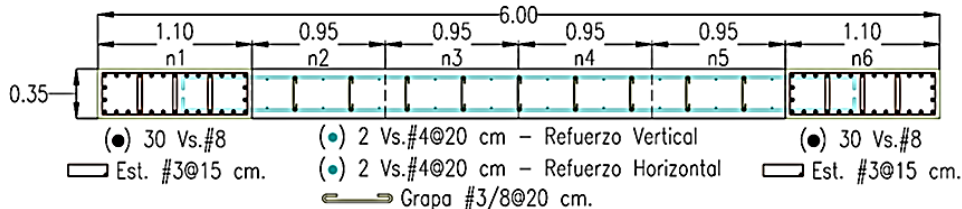


Figura 7. Modelo de discretización para el muro de concreto de 6 metros (acotaciones en metros)

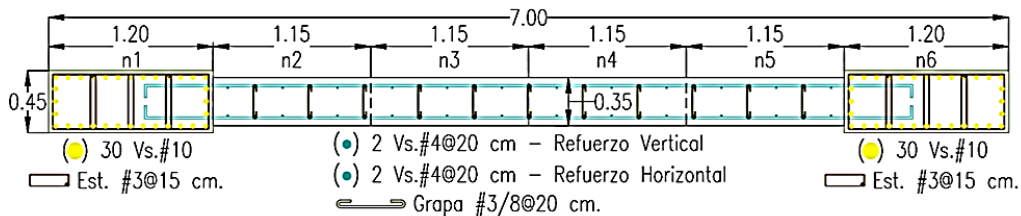


Figura 8. Modelo de discretización para el muro de concreto de 7 metros (acotaciones en metros)

Análisis de la fragilidad sísmica

Las curvas fragilidad son funciones que describen la probabilidad de que una estructura alcance o exceda un cierto estado de daño dado un nivel específico de demanda estructural, como puede ser la DME. Para el

presente estudio, estas curvas de obtuvieron utilizando la ecuación 2. Al adoptar una distribución log-normal, como proponen Shome (1999) y Bojórquez et al. (2011) para evaluar la probabilidad condicional $P(DME > d|S_a)$, se puede calcular la probabilidad de que la distorsión, DME , supere el valor específico, d , dado una S_a . Esto se representa de la siguiente manera:

$$P(DME > d|S_a) = \text{Probabilidad de excedencia} = 1 - \Phi\left(\frac{\ln(d) - \hat{D}_{\ln D|S_a}}{\sigma_{\ln D|S_a}}\right) \quad (2)$$

En la ecuación 2, los términos $\hat{D}_{\ln D|S_a}$ y $\sigma_{\ln D|S_a}$ denotan la media y la desviación estándar del $\ln D$, mientras que Φ representa la función de distribución acumulativa. La Fig. 9 muestra la curva de fragilidad para el Modelo M1 asociada a cuatro estados de daño diferentes, expresados en términos de la DME (0.002, 0.005, 0.01 y 0.02).

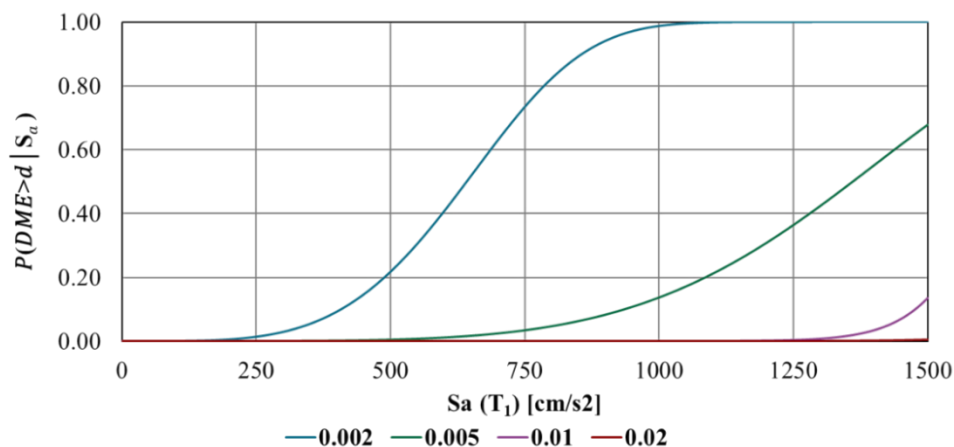


Figura 9. Curvas de fragilidad sísmica del Modelo M1 para cuatro estados de daño

RESULTADOS NUMÉRICOS

Diseño estructural

Considerando que los muros de corte tienen un papel fundamental en la absorción de la energía lateral generada por los terremotos en este tipo específico de sistema estructural, el diseño de los marcos se centró prácticamente en la resistencia ante cargas gravitacionales para todos los casos de estudio, excepto el Modelo M5 donde las secciones requeridas en columnas y vigas para cumplir con las solicitudes de diseño se incrementaron; sin embargo, para fines de comparación en la fragilidad sísmica y cumplir con el objetivo de realizar un cotejo imparcial entre la fragilidad sísmica, se mantuvieron las mismas secciones y disposición de acero de refuerzo en todos los modelos. Los detalles del diseño para cada elemento estructural se encuentran en la Tabla 2.

Tabla 2. Columnas y vigas diseñadas por nivel para los cinco modelos

Nivel	Sección de la columna (cm)	Área de refuerzo (cm ²)	Sección de la viga; base x altura (cm)	Área de refuerzo (cm ²)	
				Lecho Sup.	Lecho Inf.
1 al 3	55x55	34.2	35x65	14.25	14.25
4 al 6	55x55	34.2	30x60	14.25	14.25
7 al 8	50x50	34.2	30x60	11.40	11.40

El acero de refuerzo en el alma del muro y los elementos de borde, y sus correspondientes dimensiones se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3. Muros diseñados para las crujiás de 7 y 6 metros

Muro	Elemento de borde (cm)	Área de refuerzo (cm ²)	Espesor del alma (cm)	Cuantía de refuerzo en el alma
7 metros	45x120	238.2	35	0.0036
6 metros	35x120	152.4	35	0.0036

En la Tabla 4 se concentran los valores de los periodos estructurales para cada modelo.

Tabla 4. Periodos fundamentales de vibración de cada uno de los modelos

M1	M2	M3	M4	M5
0.75 seg.	0.75 seg.	0.69 seg.	0.69 seg.	0.91 seg.

Análisis dinámico incremental

Se llevó a cabo una comparación detallada entre las medias obtenidas para cada uno de los análisis dinámicos incrementales realizados en relación con cada modelo estructural. Estos resultados se muestran en la Fig. 10, lo que permite visualizar de manera clara las diferencias en el comportamiento de los edificios analizados. Por ejemplo, si se considera un nivel de deformación del 0.5% se tiene que para el modelo M5 corresponde una pseudoaceleración espectral de 750 gals mientras que para el resto de los modelos le corresponde una pseudoaceleración entre 1200 gals a 1500 gals, siendo el M2 al que se le asocia la mayor pseudoaceleración de 1500. Lo anterior refleja que el Modelo 2 experimenta un nivel de daño relativamente menor a altos niveles de S_a y por ende se obtiene una menor fragilidad sísmica en comparación con los otros modelos evaluados; mientras que el Modelo 5, como se observará en la siguiente sección será la que mayor fragilidad sísmica presente.

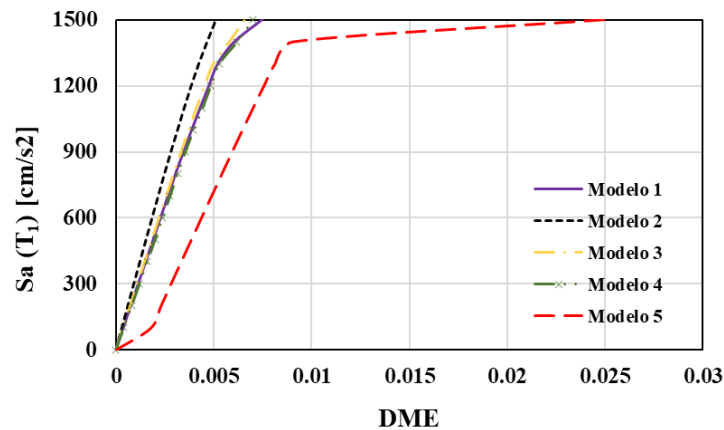


Figura 10. Comparativa entre las medias obtenidas de las curvas ADI de cada uno de los modelos.

Fragilidad sísmica

La Fig. 11 presenta de manera gráfica las curvas de fragilidad sísmica para los cinco edificios analizados. Estas curvas han sido calculadas considerando una distorsión de 0.01, valor asociado a eventos con periodo de recurrencia mayor o igual a 475 años según las NTC-DS-23 para sistemas duales, lo cual facilita la

identificación de áreas de mejora del diseño estructural conceptual de este tipo de estructuras. Como se puede observar en la figura, en general, ningún modelo del grupo de estudio presenta probabilidades superiores al 10% de exceder una DME de 0.01 para el caso de estudio evaluado (suelo blando de la Ciudad de México), lo que confirma la influencia significativa que tiene un sistema dual en la disminución de la fragilidad sísmica de los edificios.

Es importante notar que, si consideramos la probabilidad condicional de excedencia para el mismo DME asociado a una intensidad de 1500 gals (cm/s²) se obtiene que, el M5 es el que presenta la probabilidad de excedencia más alta con un valor de 36.5%, mientras que el resto de los modelos M1, M2, M3 Y M4, presentan valores de 13.5%, 1.5%, 10.9% y 16.9%, respectivamente.

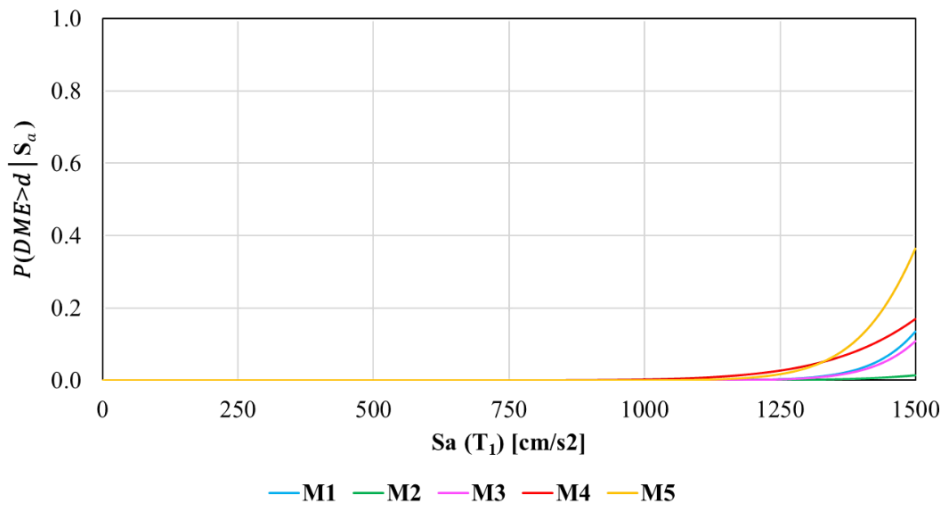


Figura 11. Curvas de fragilidad sísmica para una distorsión máxima de entrepiso de 0.01

CONCLUSIONES

En este trabajo se analizaron cinco estructuras de mediana altura ubicadas en terrenos blandos en la Ciudad de México. Estas edificaciones se modelaron utilizando un sistema dual de CR conformado por marco-muro. Se propusieron diferentes configuraciones de los muros de corte en planta, con el objetivo de evaluar su capacidad estructural y la fragilidad sísmica entre las cinco variantes considerando modelos tridimensionales. De los resultados del estudio, se pueden obtener las siguientes conclusiones:

- Desde una perspectiva de diseño sísmico, tras un análisis modal espectral dinámico, se observó que las diferencias en dimensiones y armados de las secciones del sistema de marcos son relativamente mínimas, ya que el diseño está principalmente influenciado por cargas gravitacionales, a excepción del Modelo 5 en el cual se presentaron efectos de torsión importante en columnas exteriores aumentando, en un porcentaje considerable tanto las dimensiones en columnas y vigas, como la cantidad de acero requerido para resistir las fuerzas cortantes y de torsión. En el presente estudio se mantuvieron las mismas secciones en los elementos estructurales y su correspondiente acero de refuerzo para fines de comparación, lo que ocasionó que el modelo M5 presentara un comportamiento rotacional en su primer periodo de vibrar.
- De las curvas de capacidad estructural se concluye que la inclusión de muros de corte a un sistema de marcos provee de una muy buena capacidad de limitar las DME, permitiendo bajos niveles de

deformación y manteniendo a la estructura en un rango elástico a altos valores de S_a . Sin embargo, una observación importante es el comportamiento del Modelo M5, el cual, si bien permanece en un rango lineal a altos valores de S_a , una vez que el edificio incursiona en el rango no lineal, este presenta altos valores de distorsiones a muy bajos incrementos de la intensidad sísmica.

- Se encontró que el Modelo M2 exhibió una menor fragilidad estructural, logrando una disminución notoria en la probabilidad de excedencia para los estados de daño evaluados (0.002, 0.005, 0.01 y 0.02), y para los niveles de intensidad a los que escaló el conjunto de acelerogramas. Los modelos M1 y M3 son los siguientes que presentan la menor fragilidad sísmica. Por último, los modelos M4 y M5, siendo este último el que mayor fragilidad sísmica presentó. Por lo tanto, se concluye que la disposición más favorable de estos muros para disminuir la fragilidad sísmica en edificios regulares de ocho niveles es colocarlos en el exterior de la edificación (manteniendo la simetría en planta para evitar efectos de torsión significativos).
- Finalmente, una observación importante es el tener especial cuidado cuando se decide colocar los muros de corte en el centro de la edificación. Esta es una práctica común para destinarlos a uso de elevadores y/o paso de instalaciones, y el disponer de estos elementos en esta posición, no resulta ser la opción más favorable desde el punto de vista estructural, ya que, para lograr una misma fragilidad sísmica, comparado con colocar los muros simétricamente y en el exterior de la edificación, se tienen que aumentar las secciones del sistema de marcos.

Este análisis se centró exclusivamente en edificaciones emplazadas en terrenos blandos de la Ciudad de México, lo que limita su alcance a este tipo de suelo. Es altamente recomendable realizar estudios adicionales en otros tipos de suelos, como la zona de suelo firme y/o de transición, para evaluar cómo las características del terreno influyen en la interacción dinámica del sistema dual y proporcionar recomendaciones más generales para el diseño sísmico en distintas regiones.

AGRADECIMIENTOS

Queremos expresar nuestro agradecimiento al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnología (CONAHCYT) por su invaluable apoyo durante los estudios Posgrado del primer autor. Asimismo, los autores segundo y tercero desean agradecer al CONAHCYT por el respaldo otorgado a través del proyecto Ciencia de Frontera CF-2023-G-1636. Además, extendemos nuestro agradecimiento a la Universidad Autónoma de Sinaloa por su apoyo en el marco del proyecto PROFAPI.

REFERENCIAS

- Ahkam Dwi, N. I., Teguh, M., y Saleh, F. (2022). Seismic behavior of structural models of dual system building and flat slab-drop panel strengthened with shear-wall. *AIP Conference Proceedings*, 2489(1). <https://doi.org/10.1063/5.0094416>
- Bhandari, M., Bharti, S. D., Shrimali, M. K., y Datta, T. K. (2019). Seismic Fragility Analysis of Base-Isolated Building Frames Excited by Near- and Far-Field Earthquakes. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 33(3), 04019029. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)cf.1943-5509.0001298](https://doi.org/10.1061/(asce)cf.1943-5509.0001298)
- Bojórquez E., Terán-Gilmore A, Ruiz SE, Reyes-Salazar A. (2011). Evaluation of Structural Reliability of Steel Frames: Interstory Drift versus Plastic Hysteretic Energy. *Earthquake Spectra*, 27, 661-682. <https://doi.org/10.1193/1.3609856>

- Chen , Y., Dong, Y.-R., Bai, G.-L., y Wang, Y.-Y. (2021). IDA-based seismic fragility of high-rise frame-core tube structure subjected to multi-dimensional long-period ground motions. *Journal of Building Engineering*, 43(102917). <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102917>
- Chopra, A. K. (2015). Dynamics of structures. Global Edition. Pearson Higher Ed.
- De Anda, J., Ruiz, S. E., Bojórquez Mora, E., Salbitano, G., Silva-González, F. L., y Bojórquez Mora, J. (2024). Análisis de la influencia del daño acumulado en la fragilidad estructural de torres de aerogeneradores de mediana altura. *Revista Ingeniería y Tecnología UAS*, 7, 6-20. <https://revistas.uas.edu.mx/index.php/RITUAS/article/view/946>
- Elhegazy , H., Ebid, A. M., Mahdi , I. M., Haggag, S. A., y Rashid, I. A. (2020). Selecting optimum structural system for R.C. multi-story buildings considering direct cost. *Structures*, 24, 296-303. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.01.039>
- FEMA-356. (2000). Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings. Washington DC, USA: Federal Emergency Management Agency.
- Filippou, F. C., Popov, E. P., y Bertero, V. V. (1983). Effects of bond deterioration on hysteretic behavior of reinforced concrete joints. *Earthquake Engineering Research Center*, 137-147. <https://nehrpsearch.nist.gov/article/PB84-192020/XAB>
- Gwalani, P., Singh, Y., y Varum, H. (2020). SEISMIC PERFORMANCE OF RC DUAL SYSTEM BUILDINGS FOR INDIAN CODE. *The 17th World Conference on Earthquake Engineering*. Senadi, Japan. <https://wcee.nicee.org/wcee/article/17WCEE/2b-0008.pdf>
- Ismael, S. S., y Ahmed, F. R. (2023). Seismic Fragility Curves for Reinforced Concrete Dual System Buildings. *ARO-THE SCIENTIFIC JOURNAL OF KOYA UNIVERSITY*, 11(1), 149-156. <https://doi.org/https://doi.org/10.14500/aro.11172>
- Kolozvari, K., Kalbasi, K., Orackal, K., y Wallace, J. (2021). Three-dimensional shear-flexure interaction model for analysis of non-planar reinforced concrete walls. *Journal of Building Engineering*, 44. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102946>
- Kolozvari, K., Orackal, K., y Wallace, J. W. (2015). Shear-Flexure Interaction Modeling of reinforced Concrete Structural Walls and Columns under Reversed Cyclic Loading. University of California, Berkeley: Pacific Earthquake Engineering Research Center. https://apps.peer.berkeley.edu/publications/peer_reports/reports_2015/webPEER-2015-12-kolozvari.pdf
- Kostic, S. M., Filippou, F. C., y Lee, C.-L. (2011). An efficient beam-column element for nonlinear 3D frame analysis. Corfu, Greece: In ECCOMAS Thematic Conference-COMPDYN. http://congress.cimne.com/eccomas/proceedings/compdyn2011/compdyn2011_full/238.pdf
- MccKenna, F., Fenves, G., Filippou, F., Mazzoni, S., Scott, M., Elgamal, A., y McKenzie, P. (2010). OpenSees. University of California, Berkeley. <https://opensees.berkeley.edu/>
- Mibang, D., y Choudhury, S. (2021). Effect of damage limit states on the seismic fragility of reinforced concrete frame-shear wall buildings. *Disaster Advances*, 14(9), 57-68. <https://doi.org/10.25303/149da5768>
- Mibang, D., y Choudhury, S. (2021). Performance-Based Design of RC Dual. https://doi.org/10.1007/978-981-15-4577-1_27
- Mohammad Eisa, H., y Mohammad Eisa, H. (2020). The necessity of transverse steel reinforcement for confinement in structural reinforced concrete walls using nonlinear static and dynamic analysis method. *Facta universitatis-series: Architecture and Civil Engineering*, 18(2), 161-175. <https://doi.org/10.2298/FUACE200817012M>
- Mohd Yassin, M. H. (1994). Nonlinear analysis of prestressed concrete structures under monotonic and cyclic loads. Berkeley: University of California. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=5691682>
- NTC-DCEC-23. (2023). Normas Técnicas Complementarias para el Diseño y Construcción de Estructuras de Concreto. Gaceta Oficial de la Ciudad de México. <https://smie.com.mx/smie-2022/informacion-tecnica/normas-tecnicas-complementarias.php>

- NTC-DS-23. (2023). Normas Técnicas Complementarias sobre Diseño por Sismo. Gaceta Oficial de la Ciudad de México. <https://smie.com.mx/smie-2022/informacion-tecnica/normas-tecnicas-complementarias.php>
- Phadnis, P. P. (2021). Fragility Analysis for frame with RC and steel-composite shear wall. *Resilient Infrastructure*, 202, 143-159. https://doi.org/10.1007/978-981-16-6978-1_11
- Pitilakis, D., y Petridis, C. (2022). Fragility curves for existing reinforced concrete buildings, including soil-structure interaction and site amplification effects. *Engineering Structures*, 269, 114733. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.114733>
- Ruiz Gómez, S. E., Jiménez Jordán, R., Santos Santiago, M. A., y Orellana Ojeda, M. A. (2020). Evaluación de la fragilidad de dos soluciones de rehabilitación para un edificio con planta baja débil dañado durante el sismo 19/s17. *Ingeniería sísmica*(102), 1-25. <https://doi.org/10.18867/ris.102.513>
- Shome, N., y Cornell, C. A. (1999). Probabilistic seismic demand analysis of nonlinear structures. <https://dl.acm.org/citation.cfm?id=928965>
- Shome, N., y Cornell, C. A. (1999). Probabilistic seismic demand analysis of nonlinear structures. <https://dl.acm.org/citation.cfm?id=928965>
- Sthapit, N., Shrestha, R. K., y Paudel, S. (2023). Seismic Response Analysis of High-Rise Reinforced Concrete Buildings Using Outrigger System. *Journal of The Institution of Engineers*, 104(4), 943-952. <https://doi.org/10.1007/s40030-023-00758-1>
- Vamvatsikos, D., y Cornell, C. A. (2001). Incremental dynamic analysis. *Earthquake engineering & structural dynamics*, 31(3), 491-514. <https://doi.org/10.1002/eqe.141>
- Wiyono, D. R., Milyardi, R., y Lesmana, C. (2020). Distribution of Story Shear and Reinforcement in Dual System. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 852(1), 012061. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/852/1/012061>
- Wong, K. K., y Harris, J. L. (2012). Seismic damage and fragility analysis of structures with tuned mass dampers based on plastic energy. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 21(4), 296-310. <https://doi.org/10.1002/tal.604>