

# Golpeteo estructural en la vulnerabilidad sísmica de edificios ubicados en suelos blandos

## Structural pounding in the seismic vulnerability of buildings located on soft soils

Mario González-Sandoval <sup>1</sup>, Mauro Niño-Lázaro <sup>2</sup>

### RESUMEN

Este trabajo analiza el efecto del fenómeno del golpeteo estructural sobre la respuesta dinámica no lineal de edificios ubicados en la zona de suelo blando de la Ciudad de México, cuando están sujetos a acciones sísmicas. Para ello, se identificaron las tipologías estructurales a estudiar, cuyo comportamiento se evaluó a través de análisis dinámicos incrementales, es decir, análisis no lineales paso a paso con incremento monótonico en la demanda sísmica. El estudio se llevó a cabo empleando el software OpenSees, donde el comportamiento no lineal por desplazamientos laterales se modeló mediante plasticidad concentrada en los elementos estructurales, utilizando los diagramas momento-curvatura y momento-rotación correspondientes. Para representar el fenómeno de golpeteo se empleó un modelo elástico lineal de fuerza de contacto que simula las colisiones entre las estructuras, asumiendo que el contacto ocurre entre los sistemas de piso de los edificios colindantes.

Los resultados obtenidos muestran que el golpeteo estructural tiene un impacto significativo en las edificaciones, ya que amplifica la respuesta sísmica y aumenta el cortante de entrepiso, lo que puede inducir el colapso de la estructura. La información generada en este estudio es valiosa para evaluar la vulnerabilidad estructural sísmica de las estructuras sometidas al fenómeno de golpeteo y, de ser posible, para implementar acciones preventivas que contribuyan a mitigar el riesgo asociado.

### ABSTRACT

This study analyzes the effect of structural pounding on the nonlinear dynamic response of buildings located in the soft soil zone of Mexico City when subjected to seismic actions. To this end, the structural typologies to be studied were identified, and their behavior was evaluated through incremental dynamic analyses—that is, nonlinear step-by-step analyses with a monotonic increase in seismic demand. The study was carried out using the OpenSees software, where nonlinear behavior due to lateral displacements was modeled using concentrated plasticity in the structural elements, employing the corresponding moment-curvature and moment-rotation diagrams. To represent the pounding phenomenon, a linear elastic contact-force model was used to simulate collisions between structures, assuming that contact occurs between the floor systems of adjacent buildings.

The results obtained show that structural pounding has a significant impact on buildings, as it amplifies the seismic response and increases the interstory shear, which can lead to structural collapse. The information generated in this study is valuable for assessing the seismic structural vulnerability of buildings subjected to pounding and, if possible, for implementing preventive actions that help mitigate the associated risk.

Recibido: Octubre 2024  
Aceptado: diciembre 2024  
Publicado: junio 2025

### Palabras Clave:

Golpeteo estructural, Vulnerabilidad sísmica, Suelos blandos, Análisis Dinámico Incremental (IDA)

### Keywords:

Structural pounding, Seismic vulnerability, Soft soils, Incremental Dynamic Analysis (IDA)

\*Autor para correspondencia. Mauro Niño-Lázaro  
Dirección de correo electrónico: [mninol@ingenieria.unam.edu](mailto:mninol@ingenieria.unam.edu)

1 Facultad de Ingeniería. Av. Universidad 3000, Ciudad de México, 04510, [mgonzalezs1309@gmail.com](mailto:mgonzalezs1309@gmail.com)  
2 Facultad de Ingeniería. Av. Universidad 3000, Ciudad de México, 04510, [mninol@ingenieria.unam.edu](mailto:mninol@ingenieria.unam.edu)

## 1. INTRODUCCIÓN

El golpeteo se refiere a la colisión entre dos o más estructuras causada por fuerzas dinámicas externas, generalmente sismos (Cole et al., 2010). Este fenómeno ocurre debido a que los edificios vibran fuera de fase, lo cual puede atribuirse a diferencias en sus rigideces o masas. Además, la insuficiente separación entre las estructuras puede contribuir a la acentuación de este efecto.

Cuando ocurre el golpeteo, las demandas de cortante en los elementos estructurales aumentan significativamente, lo que puede provocar fallas locales en estos y, en consecuencia, conllevar al colapso de la estructura. En la Ciudad de México, la alta demanda de suelo urbano fomenta la construcción de edificaciones con separaciones mínimas. Sin embargo, los efectos de las estructuras vecinas y las posibles medidas de mitigación del golpeteo suelen ser ignorados durante el diseño estructural.

Tras el sismo Mw 8.1 del 19 de septiembre de 1985, con epicentro en Michoacán, México, se observó que el 40% de las 330 estructuras dañadas presentaron evidencias de golpeteo, y el 15% de ellas colapsaron debido a este fenómeno (Rosenblueth y Meli, 1986). Un ejemplo representativo de esta situación se muestra en la Fotografía 1.



**Fotografía 1. Colapso del entrepiso de un edificio en la Ciudad de México producto del golpeteo durante el sismo del 19/09/85.**

A pesar de ser un fenómeno reconocido por su gran influencia en la respuesta dinámica de las estructuras, el golpeteo ha recibido escasa atención en investigaciones realizadas en el país. El primer trabajo de investigación que analizó los posibles daños debido a este

fenómeno fue llevado a cabo por Anagnostopoulos (1988). Por su parte, entre los trabajos más recientes destaca el de Hosseini et al. (2021), en el cual se evaluaron los efectos del golpeteo entre edificios a base de marcos de concreto reforzado, sujetos a sismos de campo lejano, en términos de índices de daño. Este estudio empleó análisis dinámicos incrementales, IDA, (Vamvatsikos y Cornell, 2002) en estructuras de 2, 4 y 8 niveles, considerando diferentes separaciones, todas proporcionales a la separación mínima reglamentaria. Los resultados permitieron observar la influencia de la separación en la respuesta estructural. Además, el estudio validó el modelo de contacto viscoelástico lineal, implementado en el software OpenSees (McKenna et al., 2015), al compararlo con un modelo experimental probado en una mesa vibradora.

### 1.1 Modelado del golpeteo estructural

El contacto entre edificios puede clasificarse en dos tipos: piso – piso (Figura 1a) o piso – columna (Figura 1b). El segundo tipo resulta más perjudicial, ya que los sistemas de piso poseen una rigidez mucho mayor en comparación con las columnas, lo que genera daños locales más severos en estas. Debido a esta misma razón, el contacto piso-columna resulta más complejo de modelar analíticamente y, por lo tanto, queda fuera de los alcances de esta investigación. Para modelar el fenómeno en cuestión considerando los impactos entre los sistemas de piso, se pueden emplear dos enfoques: la teoría clásica del impacto (Figura 2a) o un modelo de fuerza de contacto que describe las colisiones entre estructuras (Figura 2b).

La expresión general que tiene el modelo de fuerza generada por el golpeteo se presenta en la ecuación (1).

$$F(t) = k\delta(t) + c\dot{\delta}(t) \quad (1)$$

$$\delta(t) = x_1(t) - x_2(t) - d \quad (2)$$

donde  $F$  representa la fuerza generada por el impacto,  $k$  es la rigidez de contacto,  $\delta$  es la distancia variable entre las estructuras,  $c$  es el amortiguamiento de contacto y  $\dot{\delta}$  es la velocidad relativa entre las estructuras.

La distancia  $\delta$  se define como se muestra en la ecuación (2), donde  $x_i$  es el desplazamiento de las estructuras analizadas y  $d$  es la separación inicial entre ellas.

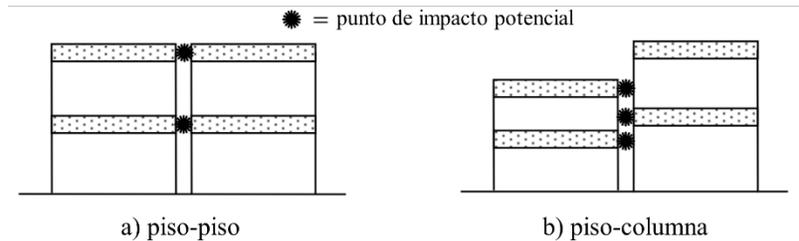


Figura 1. Tipos de golpeteo: a) piso-piso, b) piso-columna.

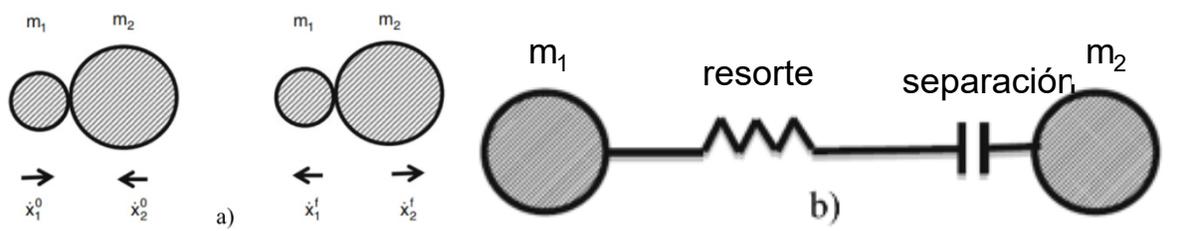


Figura 2. Teoría clásica del impacto (a) y modelo de fuerza de contacto (b).

### 1.1.1 Teoría clásica del impacto

La teoría clásica del impactado se basa en las leyes de conservación de energía y momentum. Sin embargo, no considera los esfuerzos ni las deformaciones en los elementos estructurales durante la colisión. Debido a que este enfoque no está basado en fuerzas, los efectos de las colisiones se registran únicamente mediante la actualización de las velocidades de los elementos estructurales, sin tomar en cuenta la respuesta estructural durante el impacto, como se ilustra en la Figura 2a.

Para determinar la velocidad posterior al impacto, se emplean coeficientes de restitución ( $e$ ), los cuales representan la disipación de energía registrada durante el impacto ocasionada por fenómenos como deformaciones plásticas, agrietamiento local o fricción.

Los coeficientes de restitución tienen valores que se encuentran entre 0 y 1, donde un valor de 0 indica un impacto completamente plástico y un valor de 1

representa un impacto completamente elástico. Según estudios experimentales, los valores típicos de este coeficiente en choques entre elementos estructurales de materiales de construcción varían entre 0.4 y 0.8 (Anagnostopoulos y Spiliopoulos, 1992).

### 1.1.2 Modelos de fuerza de contacto durante la colisión entre estructuras.

Este enfoque se basa en modelos basados en la fuerza para modelar directamente las fuerzas que provoca el golpeteo. Los estudios experimentales (véanse Goland et al., 1955; Goldsmith, 1960; Van Mier et al., 1991; Jankowski, 2015) muestran que la fuerza de impacto depende de varios factores, como: las masas de las estructuras, las propiedades estructurales de los materiales e inclusive las condiciones iniciales de los elementos, ya que de antemano pueden tener daño.

Estos modelos consisten en gaps (Figura 2b) que representan la separación entre las estructuras y están

conectados mediante un resorte que tiene la rigidez de contacto entre los edificios. El resorte se activa únicamente cuando la separación del gap es igual a 0, es decir, durante el contacto. Posteriormente, cuando la separación vuelve a ser mayor a 0 el resorte deja de generar fuerza. Además, algunos modelos, como el modelo viscoelástico lineal, incorporan un amortiguador en paralelo al resorte, como se muestra en la Figura 3, para simular el amortiguamiento provocado por el impacto. Los estudios experimentales han demostrado que, al cabo de varios golpes, se pueden comenzar a presentar desplazamientos plásticos, agrietamiento local o aplastamiento en los elementos estructurales.

Para determinar la rigidez de contacto de los edificios, en este caso entre los entrepisos, Agnostopoulos (1988) sugiere considerarla como proporcional a la ri-

gidez del entrepiso más rígido. Sin embargo, no existe un consenso generalizado entre autores sobre el valor adecuado de la constante de proporcionalidad.

Para calcular la respuesta de estructuras sometidas al golpeteo estructural, se modela cada edificio como un oscilador de múltiples grados de libertad traslacionales (uno por cada entrepiso), como se muestra en la Figura 4. La respuesta en el tiempo de la estructura se puede obtener resolviendo la ecuación (3).

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx + F = -M\ddot{x}_g(t) \quad (3)$$

donde  $M$  es la matriz de masas,  $C$  la matriz de amortiguamiento,  $K$  la matriz de rigideces,  $F$  es el vector de fuerzas de contacto,  $x$  es el desplazamiento,

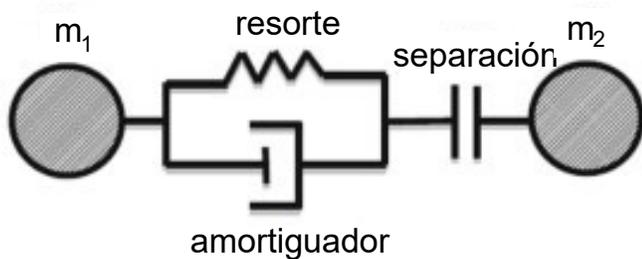


Figura 3. Modelo viscoelástico lineal.

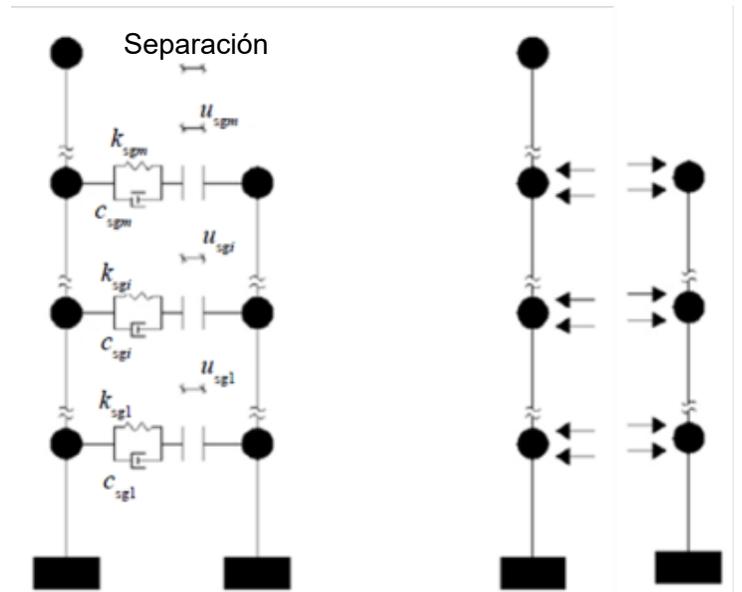


Figura 4. Osciladores de múltiples grados de libertad que representan las estructuras, con elementos gap en cada entrepiso y sus respectivos diagramas de cuerpo libre.

$\dot{x}$  es la velocidad,  $\ddot{x}$  es la aceleración y  $(x_g)''$  es la aceleración del suelo.

De acuerdo con lo expuesto anteriormente, este trabajo presenta el efecto del golpeteo estructural sobre edificaciones ubicadas en zonas de suelo blando de la Ciudad de México. Para ello se realizaron análisis dinámicos incrementales, es decir, análisis no lineales paso a paso con incremento monotónico de la demanda sísmica. En estos análisis se modeló la plasticidad de los elementos estructurales de manera concentrada, como articulaciones plásticas, utilizando diagramas momento-curvatura y momento-rotación. Los resultados obtenidos fueron procesados para generar las curvas de vulnerabilidad y así determinar el impacto que tiene el fenómeno estudiado sobre la vulnerabilidad sísmica estructural.

## 2 METODOLOGÍA

Para estudiar el efecto del golpeteo estructural sobre la vulnerabilidad de edificios situados en zonas de suelo blando, se siguió la metodología compuesta por los pasos que se describen a continuación.

### 2.1 Definición de la geometría de los edificios y características de los elementos estructurales.

Se partió de las características geométricas de las estructuras, así como de las dimensiones y propiedades mecánicas de los elementos estructurales y sus materiales. A partir de las secciones transversales, se determinaron los diagramas de momento – rotación y momento – curvatura, necesarios para evaluar la capacidad inelástica de la estructura, la cual se modeló usando el concepto de plasticidad concentrada.

### 2.2 Determinación de las propiedades dinámicas de las estructuras.

Se calcularon las rigideces y masas de los entrepisos de la estructura, a partir de los cuales se determinaron los periodos fundamentales de vibrar de las edificaciones analizadas.

### 2.3 Definición de la excitación sísmica

Se eligieron registros sísmicos para sitios en la zona de suelo blando de la Ciudad de México para caracterizar la amenaza sísmica a las cuales se vieron sometidas las estructuras.

### 2.4 Definición de los elementos gap.

Para definir los elementos gap, se propuso seguir el modelo de contacto elástico lineal, por lo cual, únicamente se determinó la rigidez de contacto y se propuso la separación entre las estructuras.

### 2.5 Revisión de los modelos.

Para validar el comportamiento adecuado de los modelos, se aplicaron análisis estáticos no lineales, del tipo Pushover. Adicionalmente, se aplicaron señales senoidales incrementales a los modelos con el mismo propósito.

### 2.6 Ejecución de los modelos.

Usando el software OpenSees (McKenna et al., 2015), se definieron los modelos de los edificios y se integraron en un modelo conjunto, donde se incluyeron los elementos gap para permitir el contacto entre los edificios. Esto permitió modelar el fenómeno de interés y así poder ejecutar los análisis dinámicos incrementales.

### 2.7 Procesamiento de la información.

A partir de la historia de desplazamientos de los edificios, se calcularon las distorsiones de entrepiso en cada instante. Luego se definió la distorsión máxima de entrepiso para cada estructura, la cual se empleará para el cálculo de las curvas de vulnerabilidad.

### 2.8 Elaboración de las curvas de vulnerabilidad.

Para determinar el nivel de daño asociado con cada uno de los registros, se empleó la ecuación (4) para calcular el daño esperado en función de las distorsiones máximas de entrepiso obtenidas de los análisis IDA.

## 3 CASO DE ESTUDIO

Para analizar el fenómeno del golpeteo, se retoma el trabajo realizado por Almaraz (2019), quien diseñó dos edificios de 5 y 7 niveles, con 2 y 3 crujías, respectivamente. Ambas edificaciones con sistema estructural de marcos de concreto reforzado y localizados en la Zona IIIa de la Ciudad de México, de acuerdo con lo que se indicaba en el Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal (RCDF) de 2004.

Para el diseño del edificio de 5 niveles, se siguieron las indicaciones del reglamento antes mencionado, resultando en vigas de 30x45 cm en todos los entrepisos

y columnas de 40x40 cm. En el caso del edificio de 7 niveles, se tomaron en cuenta las consideraciones del Reglamento de Construcciones de 1977, dando como resultado secciones de vigas de 30x45 cm y columnas de 35x35 cm. La resistencia a compresión del concreto de ambas estructuras se consideró de 250 kg/cm<sup>2</sup>.

La separación entre las estructuras se está definió de 2.5 cm, con el propósito de observar de manera más clara el fenómeno y determinar su influencia sobre el daño esperado en las edificaciones.

Tras realizar el análisis modal de las estructuras utilizando el software OpenSees (McKenna et al., 2015), se obtuvo que los periodos fundamentales de vibración de las estructuras fueron de 0.62 s para el edificio de 5 niveles y 0.91 s para el edificio de 7 niveles. Para los fines de este estudio, la diferencia entre

los periodos es lo suficientemente significativa para que las estructuras vibren fuera de fase y se presente golpeteo estructural.

En cuanto a la definición de los elementos gap en el modelo, también conocidos como elementos Zero-Length en OpenSees (McKenna et al., 2015), siguiendo lo propuesto por Naserkhaki (2011), para edificios de concreto reforzado, se expresó la rigidez de contacto como veinte veces la rigidez del sistema de entrepiso más rígido, los valores se pueden encontrar en la Tabla 1. Dada la incertidumbre en el cálculo del valor de la rigidez de contacto, para los fines de este trabajo, al considerar un factor de proporcionalidad igual a 20, se asume que la rigidez de las losas queda implícita en dicho cálculo.

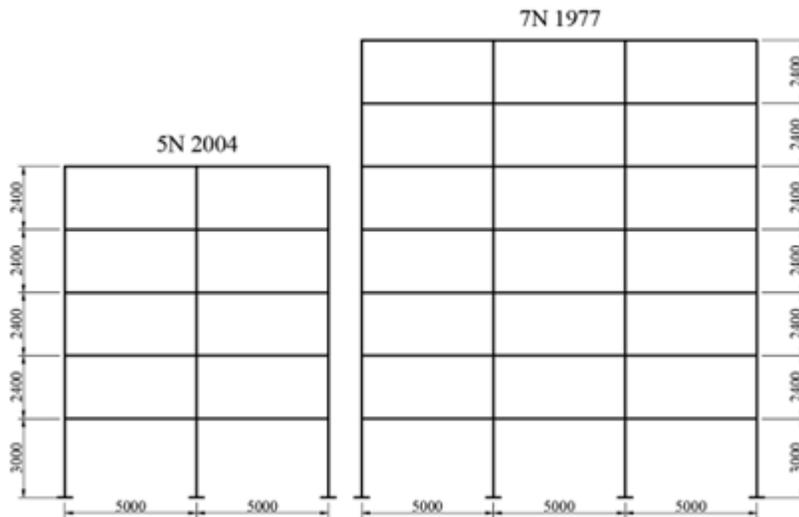


Figura 5. Geometría de los edificios analizados en este trabajo. Acotaciones en mm.

Tabla 1. Rigideces de contacto para cada uno de los entrepisos.

Entrepisos	Rigidez de contacto (kN/m)
1N	575,296
2N	1,056,219
3N	1,056,219
4N	1,056,219
5N	1,056,219

**Tabla 2. Estaciones y eventos sísmicos utilizados para evaluar el comportamiento sísmico.**

Estación	Clave de estación	Evento Sísmico	Estación	Clave de estación	Evento Sísmico
		25/04/89			25/04/89
		31/05/90			24/10/93
		24/10/93			25/02/96
		25/02/96	Liconsa	LI33	15/07/96
Culhuacán	CH84	15/07/96			11/01/97
		11/01/97			30/09/99
		22/05/97			25/04/89
		03/02/98			24/10/93
		30/09/99			14/03/94
Jardín de Niños Luz García Campillo	GC38	31/05/90	Miramontes	MI15	25/02/96
		11/01/97			15/07/96
		22/05/97			11/01/97
		30/09/99			30/09/99
		25/04/89			25/04/89
		31/05/90			25/02/96
Escuela Secundaria Técnica No. 95	IB22	15/05/93	San Simón	SI53	15/07/96
		24/10/93			11/01/97
		25/02/96			22/05/97
		15/07/96			30/09/99
		30/09/99			25/10/81
		25/04/89	Sismex		19/09/85
		31/05/90	Viveros	SXVI	21/09/85
		24/10/93			25/04/89
Parque Jardines de Coyoacán	JC54	15/07/96			
		11/01/97			
		03/02/98			
		30/09/99			

Para evaluar el comportamiento de las estructuras, se realizaron análisis dinámicos incrementales utilizando 50 registros sísmicos en sus dos componentes horizontales (EW y NS), es decir, 100 registros en total, como se muestra en la Tabla 2. Todos los registros provienen de estaciones ubicadas en zonas de suelo blando de la Ciudad de México.

En este caso de estudio, dado que se están modelando dos estructuras que están interactuando, no

resulta práctico definir el factor de escala en función de la pseudoaceleración, como comúnmente se hace, ya que este parámetro está asociado a una estructura. Por este motivo, para definir el factor de escala de los acelerogramas, se utilizó como referencia la aceleración máxima del suelo (PGA) registrada. Para llevar a cabo los análisis, se consideraron 10 intensidades asociadas a cada registro, variando desde 0.1g hasta

1.0g, teniendo un total de 1,000 análisis para dos casos: modelando y sin modelar el golpeteo.

En la actualidad existen diversos métodos o propuestas para obtener la curva de vulnerabilidad de una estructura con base en su comportamiento estructural y estimar así, el daño esperado, algunas de ellas incluyen el cálculo de un índice de daño (ej. Park y Ang, 1985; Terán y Jirsa, 2005). En este trabajo, se empleó la expresión propuesta por Ordaz et al. (2000). Esta fórmula calcula el daño en función de las distorsiones y un parámetro de vulnerabilidad, como se muestra en la ecuación (4).

$$E(\beta | \gamma_i) = 1 - \exp \left[ \ln 0.5 \left( \frac{\gamma_i}{\gamma_0} \right)^\epsilon \right] \quad (4)$$

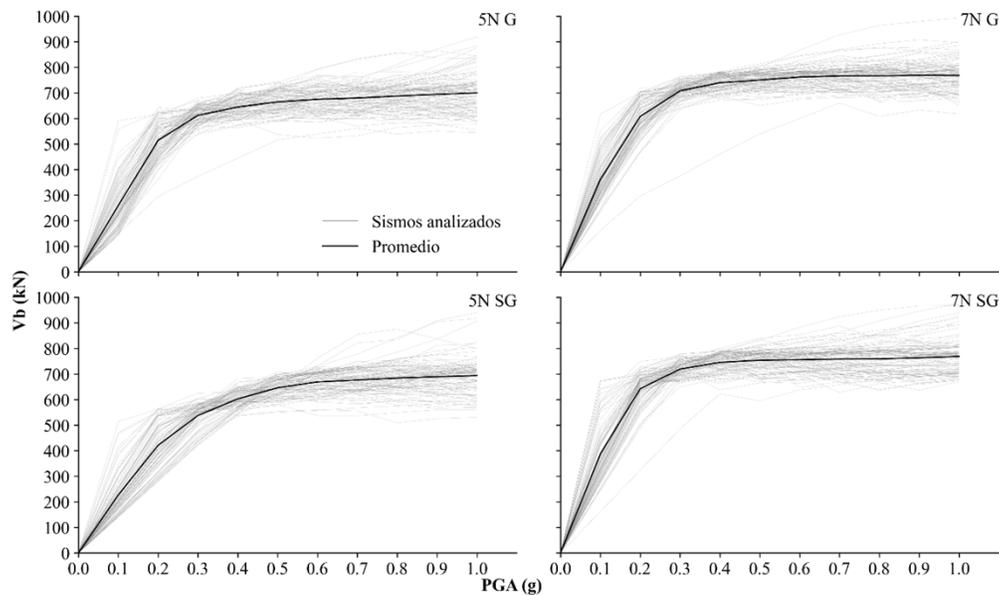
donde  $E(\beta | \gamma_i)$  es el daño esperado de una estructura dada una distorsión máxima de entrepiso,  $\beta$  es el daño,  $\gamma_i$  es la distorsión máxima de entrepiso,  $\gamma_0$  es

la distorsión asociada al 50% de daño en la estructura y  $\epsilon$  que es un parámetro de vulnerabilidad que depende del sistema estructural y la fecha de construcción (Ordaz et al., 2000).

## RESULTADOS

A partir de los análisis dinámicos incrementales realizados en OpenSees, se obtuvieron las curvas IDA, para cortante basal y desplazamientos, y curvas de capacidad dinámica. Con el procesamiento correspondiente, se generaron las curvas de vulnerabilidad para cada uno de los edificios (5N y 7N) y para cada caso, considerando y sin considerar el golpeteo.

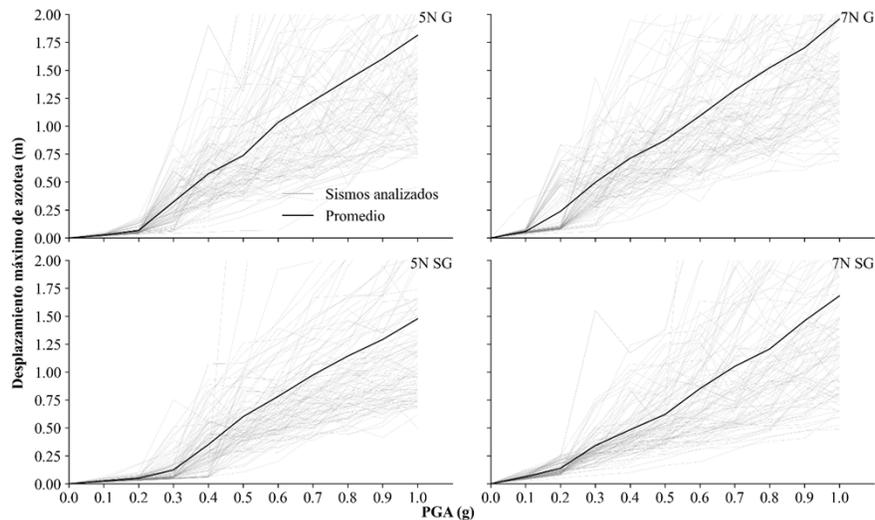
En la Figura 6, se presentan las curvas de cortante basal para los edificios de 5N con golpeteo (5N G) y sin golpeteo (5N SG) y 7N con golpeteo (7N G) y sin golpeteo (7N SG) entre las estructuras. Se presentan las curvas para los 1000 casos analizados, así como la curva promedio.



**Figura 6. Curvas IDA del cortante basal ( $V_b$ ) para los edificios de 5N (izq.) y el de 7N (der.) con fenómeno de golpeteo (arriba) y sin golpeteo (abajo).**

En la figura 7, se presentan las curvas IDA de desplazamientos máximos de azotea de la estructura, se puede observar claramente que no existe un comportamiento lineal de las curvas, debido a que la estructura entró al rango inelástico. Aunque algunas curvas superaron los desplazamientos de 2 m, estos despla-

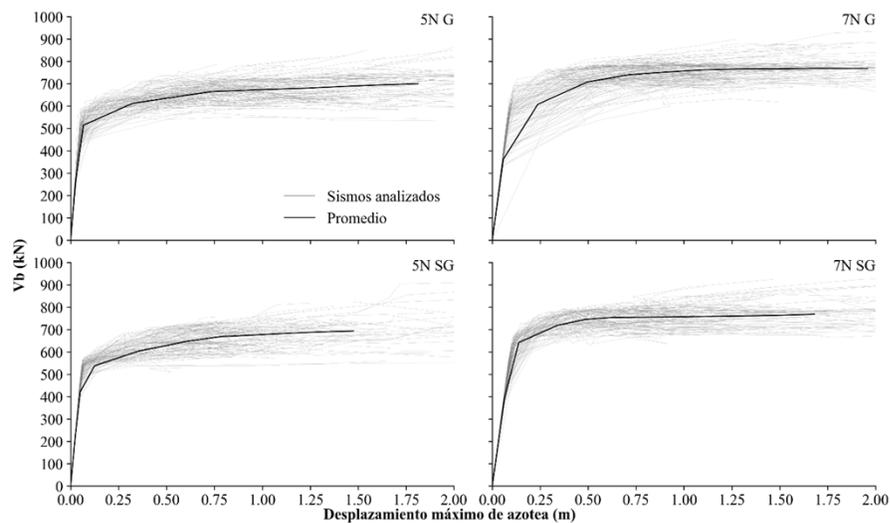
mientos no se consideran factibles para la estructura, por lo cual se desprecian. Al igual que en la figura 6, se usa el mismo código de nombres y se presentan las curvas para los 1000 casos analizados, así como la curva promedio.



**Figura 7. Curvas IDA del desplazamiento máximo de azotea para los edificios de 5N (izq.) y 7N (der.) con el fenómeno de golpeteo (arriba) y sin golpeteo (abajo).**

En la figura 8, se presentan las curvas de capacidad dinámica de las estructuras, que relacionan el cortante basal con el desplazamiento máximo de azotea, considerando y sin considerar el golpeteo. Dichas curvas están asociadas a cada uno de los 50 registros en sus

2 componentes horizontales y en sus 10 intensidades (1000 casos), así como también se presenta una curva de capacidad dinámica promedio de los registros para tener una mejor idea del comportamiento.

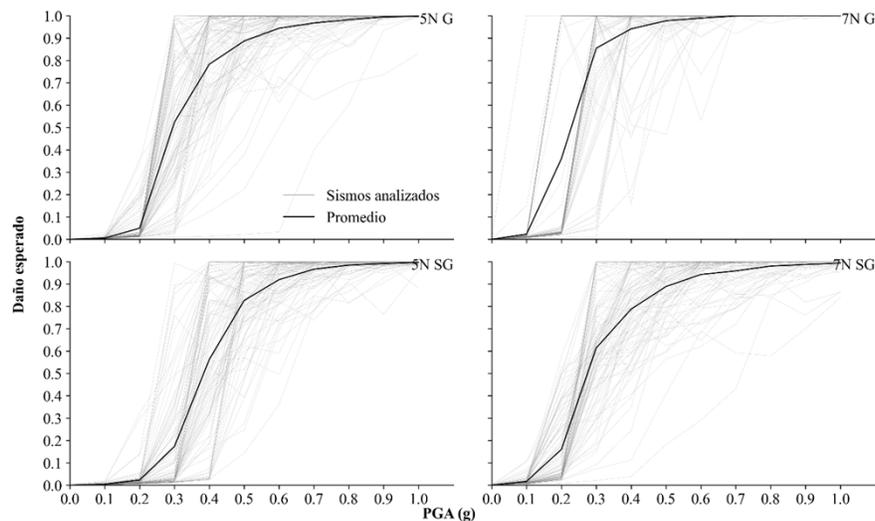


**Figura 8. Curvas de capacidad dinámica para las estructuras de 5N (izq.) y 7N (der.), con el fenómeno de golpeteo (arriba) y sin golpeteo (abajo).**

Para evaluar la vulnerabilidad de las estructuras, se determinaron los parámetros  $\epsilon$  y  $\gamma_0$ . El parámetro  $\gamma_0$  fue obtenido de manera cualitativa con base en los resultados obtenidos, para el edificio de 5 niveles se consideró  $\gamma_0=0.037$ , mientras que para el de 7 niveles,  $\gamma_0=0.0499$ . En ambos edificios, se consideró  $\epsilon=2$ .

Evaluando los valores de distorsión en la ecuación (4), se obtuvieron las curvas de vulnerabilidad pre-

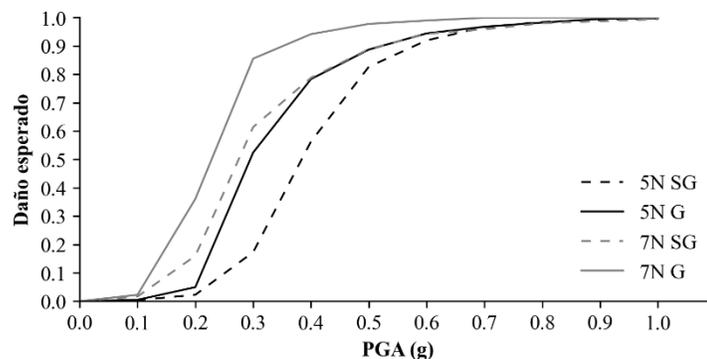
sentadas en la figura 9. En esta figura, se presentan las curvas de los 4 edificios considerados (5N G, 5N SG, 7N G y 7N SG). Para cada edificio se tienen 1000 casos analizados (50 registros sísmicos en sus 2 componentes horizontales para 10 intensidades), así como la curva de vulnerabilidad promedio que está presentada en línea negra, que permite tener una mejor idea del comportamiento de los datos.



**Figura 9. Curvas de vulnerabilidad para los edificios de 5N (izq.) y 7N (der.), considerando (arriba) y sin considerar (abajo) golpeteo.**

Para poder comparar directamente las curvas de vulnerabilidad promedio de los edificios estudiados, se presenta la Figura 10, en línea continua se tienen las

curvas asociadas al modelo que contempló el golpeteo, mientras que en línea discontinua están las curvas que desprecian la ocurrencia del fenómeno.



**Figura 10. Curva de vulnerabilidad promedio para los edificios de 5N y 7N.**

## 5 DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Con base en los resultados obtenidos, se puede observar que para la mayoría de los registros se entró en el rango inelástico debido a las altas demandas sísmicas. Adicionalmente, el fenómeno del golpeteo estructural incrementó la respuesta en términos de cortante basal y desplazamientos. Para las distorsiones máximas de entrepiso registradas en los edificios, en la mayoría de los casos, estas distorsiones eran las de la planta baja debido a que ambos edificios presentan el fenómeno de planta baja débil, donde la rigidez de entrepiso de la planta baja es casi la mitad de la rigidez del siguiente entrepiso, lo cual se considera aceptable ya que gran parte de los edificios ubicados en zona de suelo blando de la Ciudad de México presentan este problema.

En algunos casos, las respuestas para intensidades menores eran mayores que las de intensidades más grandes, esta inconsistencia se debe a que los métodos paso a paso usados para conocer la respuesta de la estructura empezaban a presentar problemas de convergencia, hasta el punto donde superaba la tolerancia de convergencia y se cerraba el análisis, por lo tanto, no se alcanzaba a correr el registro completo, esto sucedió principalmente en las intensidades mayores a 0.7g, así como en los registros de mayor duración y con mayor contenido de frecuencias, los cuales afectaban de manera más considerable la estructura.

De las curvas de vulnerabilidad, se puede concluir que el edificio de 7 niveles es más vulnerable que el edificio de 5 niveles, particularmente, si se modela el golpeteo. Para ambos edificios, la vulnerabilidad aumentó al considerar el fenómeno de golpeteo. Es decir, el edificio menos vulnerable fue 5N SG, mientras que el más vulnerable fue 7N G. Para PGA's mayores a 0.7g, se espera que los edificios tengan un daño cercano al 100%.

## 6 CONCLUSIONES

Como se pudo observar en los resultados obtenidos, el fenómeno del golpeteo estructural tiene un impacto significativo en la respuesta dinámica de las estructuras, especialmente en términos de fuerza cortante y desplazamientos. Este efecto no solo puede ocasionar daños en los elementos estructurales y no estructurales, sino también el colapso parcial o total de la estructura, lo que aumenta considerablemente la vulnerabilidad estructural de los edificios estudiados. Sin embargo, es importante destacar que el estudio asumió que los edificios presentan las propiedades

estructurales para las que fueron diseñados. Sin embargo, esta suposición no es necesariamente válida, ya que se pudieron presentar defectos en el procedimiento constructivo, así como daño acumulado debido a eventos sísmicos previos, o los efectos del intemperismo sobre los elementos estructurales por la falta del mantenimiento adecuado.

Es crucial profundizar la investigación de este fenómeno, considerando no solo el aumento de las demandas, sino el daño asociado a los impactos, lo cual puede provocar agrietamiento o inclusive aplastamiento de los materiales que componen el elemento estructural. Esto puede llevar a la pérdida de la capacidad original de la estructura. En el contexto de la Ciudad de México, se debe integrar el golpeteo con el análisis de la interacción suelo-estructura (ISE), ya a que estudios previos han encontrado que la ISE amplifica la respuesta de las estructuras y, por consiguiente, amplifica los efectos del golpeteo (Naserkhaki et al., 2012). Además, es importante reconocer que el fenómeno de golpeteo puede ocurrir no solo entre dos edificios, sino también entre una serie de edificios. Por lo tanto, resulta apropiado modelar y analizar el efecto del golpeteo en ambas colindancias del edificio.

Por otro lado, aunque en la normatividad vigente de la Ciudad de México establece que debe existir una separación mínima entre estructuras, esta puede resultar insuficiente para prevenir la presencia de este fenómeno, por ello se deberían contemplar otros métodos para prevenir la ocurrencia del golpeteo, como los propuestos por Soltysik et al. (2017), que sugieren la instalación de elementos diseñados para garantizar un comportamiento dinámico adecuado de las estructuras en caso de presentarse eventos sísmicos.

## REFERENCIAS

Anagnostopoulos, S. A. (1988). "Pounding of buildings in series during earthquakes", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 16, pp. 443–456.

Anagnostopoulos, S., Spiliopoulos, K. (1992) "An investigation of earthquake induced pounding

between adjacent buildings", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 21, pp. 289–302.

Almaraz, S. (2019) "Comportamiento sísmico de marcos de concreto reforzado con piso débil ante acciones de

eventos de subducción y falla normal”, Tesis licenciatura, Facultad de Ingeniería, UNAM.

Cole, G., Dhakal, R., Carr, A. y Bull, D. (2010) “Building pounding state of the art: Identifying structures vulnerable to pounding damage”, 2010 NZSEE Conference.

Goland, M., Wickersham, P. y Dengler, M. (1955) “Propagation of elastic impact in beams in bending”, *Journal of Applied Mechanics*, 22, pp. 1-7.

Goldsmith, W. (1960) “The Theory and Physical Behavior of Colliding Solides”, Arnold, London, UK.

Hosseini, S., Naderpur, H., Vahdani, R. y Jankowski, R. (2021) “Evaluation of pounding effects between reinforced concrete frames subjected to far-field earthquakes in terms of damage index”, *Bulletin of Earthquake Engineering*, 20, pp. 1219-1245.

Jankowski, R. y Mahmoud, S. (2015) “Earthquake-Induced Structural Pounding”, Ed. Springer Cham.

McKenna, F., Fenves, G. y Scott. M. (2015) “Open system for earthquake engineering simulation”, University of California.

Naserkhaki, S. (2011) “Pounding between adjacent buildings in consideration of soil structure interaction”, Tesis de maestría, Universidad de Malasia.

Naserkhaki, S., Aziz, F. y Pourmohammad, H. (2012) “Earthquake induced pounding between adjacent buildings considering soil-structure interaction”, *Earthquake Engineering and Engineering Vibration* 11, pp. 343-358.

Ordaz, M., Miranda, E., Reinoso, E. y Pérez-Rocha L. (2000) “Seismic loss estimation model for Mexico City”, 12 World Conference on Earthquake Engineering, 1902, pp. 1-8.

Park, Y., and Ang, A. (1985) “Mechanistic Seismic Damage Model for Reinforced Concrete”, *Journal of Structural Engineering*, 11 (4).

Rosenblueth, E. y Meli, R. (1986) “The 1985 earthquake: causes and effects in Mexico City”, *Concrete International*, 8, pp. 23-34.

Soltysik, B., Falborski, T. y Jankowski, R. (2017) “Preventing of earthquake-induced pounding between steel structures by using polymer elements – experimental study”, *Procedia Engineering*, 199, pp. 278-283.

Teran, G.A., Jirsa, J. (2005) A damage index for practical seismic design that accounts for low cyclefatigue. *Earthquake Spectra*, 21, 803-832.

Van Mier, J., Pruijssers, A., Reinhardt, H. y Monnier, T. (1991) “Load-time response of colliding concrete bodies”, *Journal of Structural Engineering*, 117 (2), pp. 354-374.

Vamvatsikos. D. y Cornell, C. (2002) “Incremental Dynamic Analysis” *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 31 (3), pp. 491-514.