



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Análisis del daño en edificios de la
Ciudad de México con golpeteo
sísmico mediante análisis
paramétricos**

TESIS

Que para obtener el título de

Ingeniero Civil

P R E S E N T A

Oscar Daniel Ortiz Martínez

DIRECTOR DE TESIS

Dr. Eduardo Reinoso Angulo



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2025



**PROTESTA UNIVERSITARIA DE INTEGRIDAD Y
HONESTIDAD ACADÉMICA Y PROFESIONAL
(Titulación con trabajo escrito)**



De conformidad con lo dispuesto en los artículos 87, fracción V, del Estatuto General, 68, primer párrafo, del Reglamento General de Estudios Universitarios y 26, fracción I, y 35 del Reglamento General de Exámenes, me comprometo en todo tiempo a honrar a la institución y a cumplir con los principios establecidos en el Código de Ética de la Universidad Nacional Autónoma de México, especialmente con los de integridad y honestidad académica.

De acuerdo con lo anterior, manifiesto que el trabajo escrito titulado ANALISIS DEL DAÑO EN EDIFICIOS DE LA CIUDAD DE MEXICO CON GOLPETEO SISMICO MEDIANTE ANALISIS PARAMETRICOS que presenté para obtener el título de INGENIERO CIVIL es original, de mi autoría y lo realicé con el rigor metodológico exigido por mi Entidad Académica, citando las fuentes de ideas, textos, imágenes, gráficos u otro tipo de obras empleadas para su desarrollo.

En consecuencia, acepto que la falta de cumplimiento de las disposiciones reglamentarias y normativas de la Universidad, en particular las ya referidas en el Código de Ética, llevará a la nulidad de los actos de carácter académico administrativo del proceso de titulación.



OSCAR DANIEL ORTIZ MARTINEZ
Número de cuenta: 317077870

A mis padres, Angélica y Benito
A mi hermano Gabriel y a Miche
A Vico

Agradecimientos

Agradezco profundamente al Dr. Eduardo Reinoso Angulo, mi asesor de tesis, por su conocimiento y dedicación a lo largo de este proceso. También expreso mi gratitud al Dr. José Giovanni Cruz Vargas, al Dr. Eric Espinosa Cazarín y al Mtro. Abel Díaz Martínez por su compromiso y valiosas observaciones durante el desarrollo de este trabajo.

A la Universidad Nacional Autónoma de México y a la Facultad de Ingeniería, por su papel fundamental en mi formación académica y profesional. Al Instituto de Ingeniería, por abrirme las puertas desde la realización de mi servicio social y brindarme el apoyo económico y material necesario para desarrollar esta tesis.

A todos los profesores con los que tuve la oportunidad de coincidir durante la carrera, en especial a mis sinodales el M.I. Marco Tulio Mendoza Rosas, el Dr. Jaime de Jesús Paredes Camacho, el M.I. Sebastián Hernández Caire y la Ing. Ximena Penélope Amezcua Pastrana, quienes me enseñaron que iba por el camino correcto. Docentes que inspiran, con vocación y entrega, representado el tipo de académicos que México necesita.

Finalmente, agradezco de manera especial a mis padres por su confianza, tiempo y por guiarme con el ejemplo de esfuerzo y resiliencia que me impulsaron para concluir la licenciatura en Ingeniería Civil. Y a mis amigos Diego, Jonathan, Maximiliano y Jesús por su compañía y ánimo en los momentos más exigentes de este camino.

Resumen

El golpeteo sísmico es un fenómeno que ocurre cuando dos estructuras adyacentes se impactan entre sí durante un evento sísmico, provocado por la falta de una separación adecuada entre ellas. Estos impactos pueden generar daños severos entre los edificios involucrados, incrementando el riesgo de fallas estructurales o incluso el colapso total. El estudio de este fenómeno es especialmente importante en ciudades como la Ciudad de México, donde la actividad sísmica y la aglomeración urbana favorecen su aparición. Este trabajo analiza las estadísticas de daños documentados del sismo del 19 de septiembre de 2017, identificando parámetros estructurales que influyen en la ocurrencia y severidad del daño por golpeteo. A partir de esta información, se plantean modelos simplificados que permiten representar la interacción entre los edificios, además aplicando un índice de daño se encuentra la influencia de dichos parámetros estructurales en el nivel de daño final en los edificios, facilitando la evaluación de la vulnerabilidad y calificando qué tan probable es que una estructura colapse ante los daños por golpeteo durante eventos sísmicos. Los resultados obtenidos permiten identificar los parámetros más significativos que incrementan el riesgo de daño. Esta información resulta relevante para mejorar los criterios de diseño y reforzamiento estructural en zonas urbanas, así como para implementar estrategias de mitigación del riesgo por golpeteo de edificios existentes en eventos futuros.

Abstract

Seismic pounding is a phenomenon that occurs when two adjacent structures collide with each other during an earthquake, caused by the lack of adequate separation between them. These impacts can result in severe damage to the buildings involved, increasing the risk of structural failure or even total collapse. The study of this phenomenon is especially important in cities like Mexico City, where seismic activity and urban density increase the likelihood of its occurrence.

This work analyzes the documented damage statistics from the September 19, 2017 earthquake, identifying structural parameters that influence the occurrence and severity of pounding-related damage. Based on this information, simplified models are developed to represent the interaction between buildings. By applying a damage index, the influence of these structural parameters on the final level of damage is assessed, facilitating the evaluation of vulnerability and estimating the likelihood that a structure will collapse due to pounding during seismic events.

The results obtained help identify the most significant parameters that increase the risk of damage. This information is valuable for improving design and retrofitting criteria in urban areas, as well as for implementing risk mitigation strategies for existing buildings in future earthquakes.

Contenido

INTRODUCCIÓN.....	7
1. MARCO TEÓRICO.....	8
1.1 ¿QUÉ ES EL GOLPETEO?	8
1.2 CARACTERÍSTICAS	8
1.3 REVISIÓN DE ESTUDIOS PREVIOS	9
1.4 OBJETIVOS	11
1.4.1 Objetivo Principal.....	11
1.4.2 Objetivos secundarios	11
1.5 JUSTIFICACIÓN.....	11
1.6 ALCANCES Y LIMITACIONES.....	11
2. ESTADÍSTICAS DEL GOLPETEO EN MÉXICO	13
2.1 DATOS HISTÓRICOS	13
2.2 IMPACTO DE LOS SISMOS DE 1985 Y 2017	14
2.2.1 Sismo de 19 de septiembre de 1985	14
2.2.2 Sismo de 19 de septiembre de 2017	15
2.3 REVISIÓN DE CASOS ESPECÍFICOS	17
2.3.1 Diferencia de niveles	20
2.3.2 Diferencia de rigidez.....	21
2.3.3 Diferencia de edad	22
2.3.4 Edificio de esquina	25
2.3.5 Diferencia de altura en conjunto con asimetría de esquina	26
3. PARÁMETROS DE MODELADO.....	28
3.1 CALIBRACIÓN DE MODELADO.....	28
4. ANÁLISIS PARAMÉTRICO Y EVALUACIÓN DEL DAÑO	36
4.1 DIFERENCIA DE NIVELES.....	36
4.1.1 Edificios con un piso de diferencia	36
4.1.2 Edificios con cuatro pisos de diferencia.....	39
4.2 DIFERENCIA DE RIGIDECES	42
4.3 ÍNDICE DE DAÑO	47
4.3.1 Fundamentos y metodología para calcular el índice de daño.....	47
4.3.2 Aplicación del índice de daño a los casos analizados	48
5. CONCLUSIONES.....	52
REFERENCIAS	54

Introducción

El golpeteo sísmico entre edificios de la Ciudad de México ha generado daños que van desde los graves hasta los colapsos totales, durante eventos sísmicos como los del 19 de septiembre de 1985 y 2017. Por medio de una metodología que combina el análisis estadístico de los casos reales con simulaciones numéricas, se busca comprender la influencia de diferentes parámetros estructurales en el daño de edificios. Si bien, se reconoce la importancia de considerar una separación mínima entre estructuras, otros parámetros como la diferencia de alturas y la rigidez estructural también juegan un papel importante en la generación o agravamiento de los daños, aunque su estudio ha sido limitado.

En este contexto, la presente tesis se enfoca en analizar de manera paramétrica los principales factores estructurales que influyen en el daño causado por golpeteo sísmico, utilizando modelos estructurales simplificados desarrollados en el software ETABS además del uso de un índice de daño cuantitativo propuesto por Jeng y Tzeng (2000), el cual permite comparar los efectos de diferentes configuraciones y evaluar cómo varía el daño conforme cambian los parámetros analizados.

El capítulo 1 presenta el concepto y las características del golpeteo sísmico, así como una revisión de la bibliografía existente sobre el tema. En esta sección también se definen los objetivos generales y específicos del estudio junto con sus alcances y limitaciones.

En el capítulo 2 analizan las estadísticas de casos de golpeteo documentados durante los sismos del 19 de septiembre de 1985 y 2017, se presenta un resumen de los daños observados durante dichos eventos. Posteriormente se identifican los principales parámetros que influyen en la ocurrencia y severidad del golpeteo en los edificios registrados con daños por este fenómeno.

El capítulo 3 detalla el procedimiento seguido para llevar a cabo la calibración de los modelos estructurales en el software ETABS, utilizando como referencia el artículo publicado por Polycarpou *et al.* (2013).

En el capítulo 4 se estudian los modelos ya calibrados para evaluar el efecto de parámetros clave como la diferencia de niveles, la variación de rigidez estructural y la separación entre edificios. Se presentan los resultados obtenidos mediante gráficas de desplazamientos y fuerzas cortantes, así como los índices de daño correspondientes a cada escenario analizado. Esta sección permite contrastar los efectos observados en los modelos con los patrones identificados en casos reales.

Finalmente, el trabajo concluye con un apartado de conclusiones y recomendaciones, donde se sintetizan los principales hallazgos, además se proponen líneas futuras para la profundización de la investigación

1. Marco teórico

1.1 ¿Qué es el golpeteo?

El golpeteo estructural se refiere a las colisiones que ocurren entre estructuras adyacentes durante los sismos. Estos impactos se deben a la falta de separación entre las estructuras adyacentes y sus modos de vibración (Miari *et al.*, 2019). Estas colisiones pueden generar daños estructurales inducidos por el impulso transferido entre las edificaciones y la fuerza de impacto resultante puede provocar daños graves o incluso el colapso instantáneo (Jeng y Tzeng, 2000).

1.2 Características

El golpeteo sísmico se intensifica cuando las vibraciones de las estructuras adyacentes están desfasadas debido a la diferencia en sus periodos, lo cual es común en la mayoría de los casos, ya que los edificios suelen tener distintas propiedades dinámicas (Miari *et al.*, 2019). En Figura 1.1 se muestra cómo este desfase en las vibraciones de las estructuras genera los puntos de impacto.

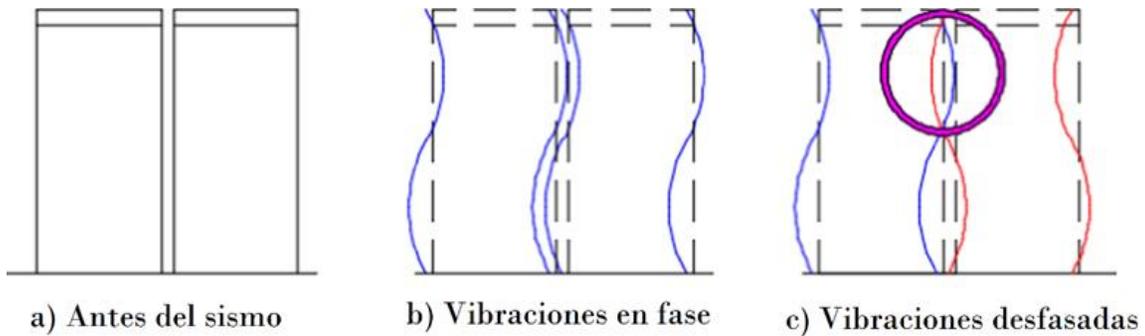


Figura 1.1 Comportamiento sísmico en edificios adyacentes (Miari *et al.*, 2019).

En la Figura 1.2 se muestran los escenarios de golpeteo sísmico según Miari *et al.* (2019). El primero es una colisión piso-piso, que ocurre cuando los edificios tienen la misma altura de entrepiso. El segundo tipo es una colisión piso-columna, donde los edificios tienen distintas alturas de entrepiso. Este último escenario es el más crítico debido a los esfuerzos cortantes desarrollados en las columnas que sufren daños.

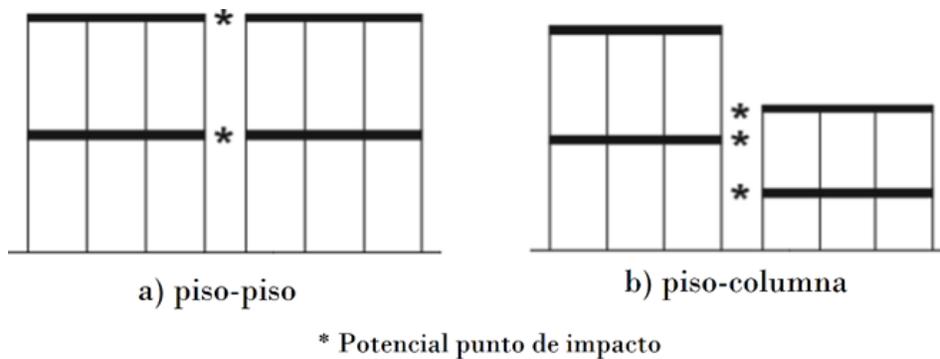


Figura 1.2 Escenarios de golpeteo sísmico (Miari *et al.*, 2019)

En la Figura 1.3 se presenta otra clasificación de golpeteo sísmico, la cual, de acuerdo con Jeng y Tzeng (2000), se divide en cinco tipos de daños:

- a) Golpeteo a mitad de la columna: Ocurre cuando los pisos de los edificios adyacentes están a diferentes alturas, lo que provoca que los pisos de un edificio impacten contra las columnas de otro, causando el colapso de las columnas afectadas
- b) Golpeteo entre edificios adyacentes con diferente peso: Los edificios adyacentes con diferencias significativas en la masa de sus pisos sufren un impacto desigual, donde el edificio más ligero experimenta un mayor movimiento lateral al ser golpeado por el más pesado.
- c) Golpeteo entre edificios adyacentes con diferente altura: Cuando los edificios involucrados tienen alturas diferentes, el balanceo del edificio más alto se ve restringido por el más bajo, generando un corte en los pisos superiores.
- d) Golpeteo excéntrico: Ocurre cuando un edificio es golpeado en una esquina por el edificio que se encuentre a un lado, lo que induce un movimiento torsional en el edificio afectado y puede causar la falla de la columna que se encuentre en la esquina.
- e) Golpeteo en edificios de cabecera o edificios finales: En edificios en serie, los que se encuentran en los extremos experimentan grandes daños debido al efecto de péndulo, ya que reciben el impacto de la masa acumulada de todos los demás edificios en la fila.

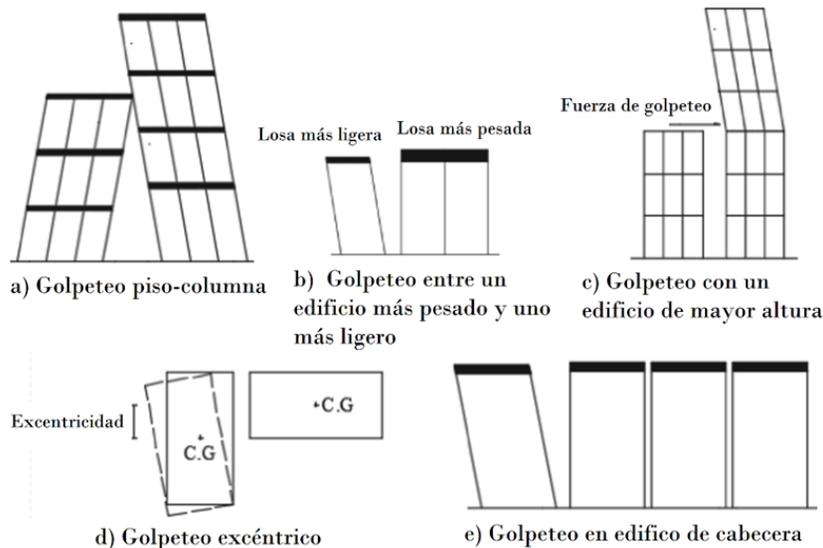


Figura 1.3 Configuraciones del golpeteo sísmico (Miari *et al.*, 2019).

1.3 Revisión de estudios previos

En México, las investigaciones por golpeteo en general siguen siendo muy escasas, algunas de las pocas que se pueden mencionar son los trabajos como el “Estudio del fenómeno de golpeteo en edificaciones afectadas en la colonia Roma de la Ciudad de México por el sismo 19S-2017.” (Márquez, 2022), el artículo titulado “Golpeteo piso-columna inducido por sismo en edificios de concreto reforzado considerando interacción suelo-columna” (Zamora *et al.*, 2022) y el trabajo titulado “Uso de bandas de goma como medida de mitigación del daño por golpeteo sísmico en la Ciudad de México” (Díaz, 2023).

En particular, esto es muy relevante para la Ciudad de México, que sufre la aglomeración urbana más grande del país teniendo una superficie urbana de más de 235 mil hectáreas (ONU-Habitad, 2018), además de estar en una de las zonas con mayor actividad sísmica, registrando más de 90 sismos por año con una magnitud mayor a 4 grados en la escala de Richter (Reinoso *et al.*, 2018)

Un estudio realizado por Jeng y Tzeng (2000) en la ciudad de Taipéi en Taiwán, analizó los riesgos asociados al golpeteo sísmico en edificios. Esta ciudad se encuentra sobre una zona lacustre, con condiciones de suelo blando, similar al caso de la Ciudad de México. Estas condiciones generan un aumento en la vulnerabilidad de los edificios durante los sismos.

Durante el estudio, se examinaron un total de 2359 edificios durante un sismo de gran magnitud, se identificó que 403 edificios están en riesgo de sufrir daños por golpeteo sísmico. De estos, 46 tienen riesgo de colapso, mientras que 76 pueden sufrir daños graves, 102 daños moderados y 179 daños menores.

Además, el estudio destaca que aproximadamente el 30% (708) de los edificios inspeccionados no cumplen con la separación mínima requerida en el Reglamento Técnico de la Construcción de Taiwán de 1982, el cual establece que debería ser del 1.5% de la altura del edificio. En particular, se detectó que 306 edificios no tienen separación alguna.

De acuerdo con la clasificación de daños por golpeteo de Jeng y Tzeng (2000), como se muestra en la Figura 1.4, de los 708 edificios, se identificó que 111 de ellos (14%) sufrieron daños por golpeteo a mitad de la columna. Además, 57 edificios (8%) experimentaron daños por golpeteo entre edificios más pesados, aunque el 92% tiene una masa de piso similar al de sus adyacentes. Un 60% de los edificios (422) sufrió golpeteo entre edificios con alturas significativamente distintas. El 14% de los edificios con golpeteo experimentó daños por golpeteo de cabecera y finalmente, se consideró que los edificios con daños por golpeteo excéntrico fueron muy pocos.

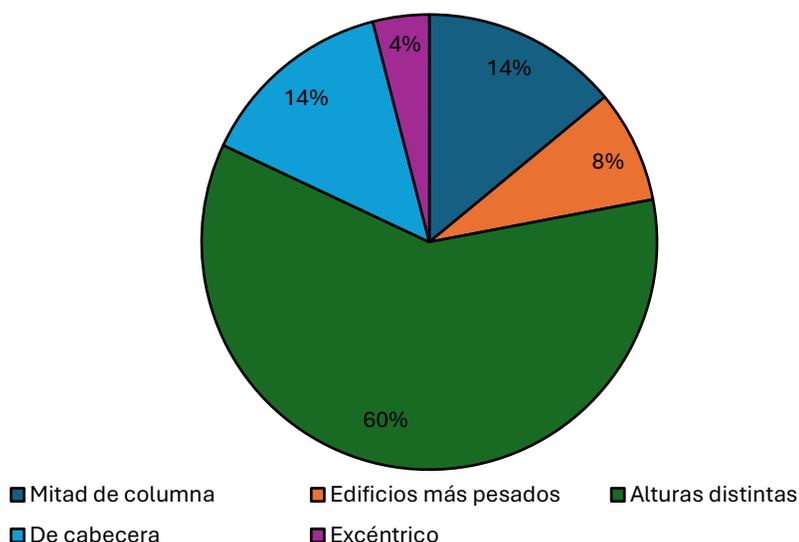


Figura 1.4 Daños por tipo de golpeteo en los edificios de la ciudad de Taipéi

A partir de estos resultados, se observa que el golpeteo a mitad de columna y entre edificios adyacentes con alturas distintas son los tipos de daños más probables en la ciudad de Taipéi durante sismos severos. Estos hallazgos son particularmente relevantes para otras ciudades ubicadas en zonas sísmicas con condiciones de suelo blando como la Ciudad de México, donde la densidad urbana y proximidad entre edificios agravan los riesgos de golpes estructurales que pueden conducir a daños estructurales graves e incluso inducir el colapso de las estructuras (Manoukas y Karayannis, 2024).

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo Principal

Realizar un análisis paramétrico, utilizando modelos numéricos simplificados, de los factores estructurales que influyen en el golpeteo sísmico y su influencia en el índice de daño en edificios de la Ciudad de México.

1.4.2 Objetivos secundarios

- Identificar y cuantificar el impacto de la diferencia de niveles entre dos edificios durante eventos sísmicos.
- Analizar la relación entre la rigidez estructural y el índice de daño en edificios sometidos al golpeteo sísmico.
- Desarrollar modelos simplificados que permitan predecir la variación del índice de daño en función de los factores estructurales identificados.

1.5 Justificación

Investigaciones como la presentada en esta tesis pueden ayudar a entender mejor el comportamiento de las estructuras ante golpeteo dadas sus características particulares de geometría o sistema estructural, los cuales son parámetros poco estudiados en investigaciones formales y cuya influencia en el golpeteo actualmente sigue en etapas tempranas de análisis, debido a la naturaleza compleja del fenómeno y a que se suele asumir que la distancia de separación es el parámetro más importante y, con frecuencia, el único que se considera para identificar casos de golpeteo.

Identificar estas características es el primer paso para estudiar de manera aislada aquellas propiedades que pudieran ser relevantes para el daño por este mecanismo. Además, el revisar características independientes de las estructuras interactuando entre sí, puede ayudar a mejorar la precisión, por ejemplo, de métodos que evalúan la vulnerabilidad ante golpeteo a través de formatos de evaluación visuales rápidas, donde, utilizando características de fácil obtención de los edificios, es posible calificar qué tan probable es que una estructura colapse ante daños agravados por golpeteo en eventos sísmicos futuros.

1.6 Alcances

El presente trabajo tiene como alcance el análisis paramétrico del fenómeno de golpeteo sísmico, evaluando su influencia en el índice de daño estructural bajo distintas condiciones. Para ello, se desarrollaron modelos representativos en ETABS y se aplicó el índice de daño propuesto por Jeng y Tzeng (2000) para cuantificar los efectos observados.

En el estudio se utilizan modelos bidimensionales simplificados de las estructuras, solamente en el rango elástico lineal, con un solo registro sísmico sin la inclusión de efectos como la interacción suelo-estructura o el comportamiento de elementos no estructurales. Además, las propiedades de los materiales se consideraron ideales y constantes por lo que los resultados obtenidos son representativos de las condiciones modeladas sin pretender generalizar todos los posibles casos.

Cabe mencionar que, si bien las Normas Técnicas Complementarias establecen criterios de separación entre edificios para evitar el contacto durante un evento sísmico, estos no fueron considerados explícitamente en el presente estudio debido a que los modelos no corresponden a casos reales específicos y no se realizó un análisis normativo integral. A pesar de ello, los resultados permiten identificar tendencias claras y aportar una evaluación a las edificaciones expuestas al golpeteo sísmico.

2. Estadísticas del golpeteo en México

2.1 Datos históricos

En una investigación realizada por el Instituto de Ingeniería de la UNAM (Reinoso *et al.*, 2018) se recabó información sobre los daños registrados durante los sismos más importantes que azotaron a la Ciudad de México. Estos eventos ocurrieron en las siguientes fechas: 28 de julio 1957, 14 de marzo de 1979, 19 de septiembre de 1985 y 19 de septiembre de 2017, cuyos epicentros se muestran en la Figura 2.1. Los datos recopilados incluyen 74 registros de daños asociados al sismo de 1957, 36 registros del sismo de 1979, 344 registros del sismo de 1985 y 2232 registros relacionados con el sismo de 2017.

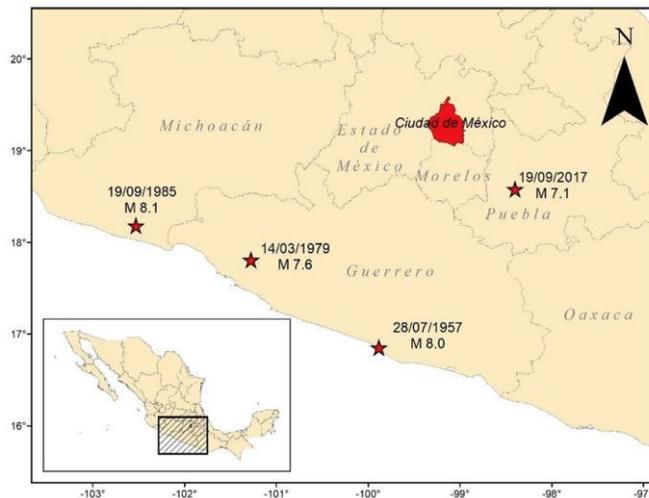


Figura 2.1 Localización de los epicentros de los sismos más importantes en el país (Reinoso *et al.*, 2018).

En la Figura 2.2 se observa un mapa con la localización de los inmuebles dañados durante los sismos mencionados, de esta información se puede destacar que la mayor concentración de daños se ubica en la zona de lago, principalmente en la alcaldía Cuauhtémoc. Para estos mismos sismos, como se muestra en la Figura 2.3, se identificó que el 38 % de los daños en acabados no estructurales que no comprometen la integridad estructural de los edificios; el 25 % correspondió a grietas pequeñas en muros, trabes y columnas; el 18 % de los daños se clasificó como grietas grandes en este mismo tipo de elementos estructurales; finalmente, el 5.5% de los daños corresponde a colapsos (parciales y totales), lo que representa al menos 150 estructuras gravemente afectadas (Reinoso *et al.*, 2018).

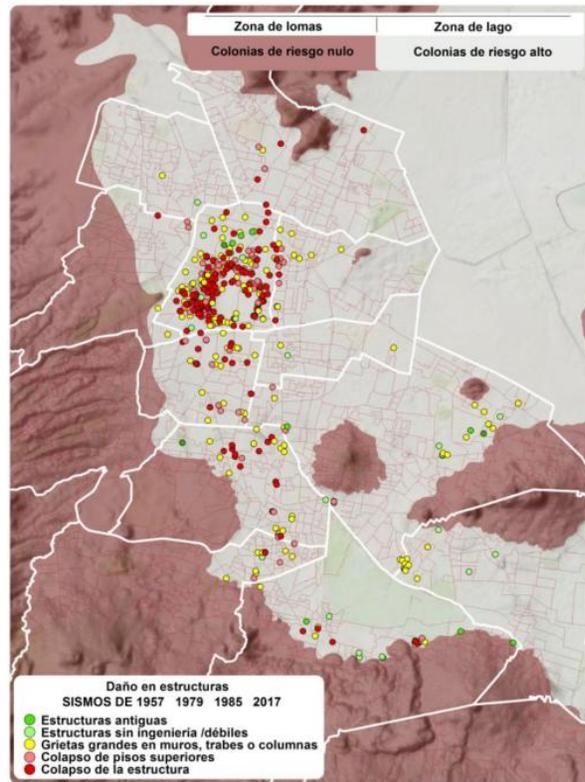


Figura 2.2 Evidencia de daños causados en la Ciudad de México a causa de los sismos de 1957, 1979, 1985 y 2017 (Reinoso *et al.*, 2018)

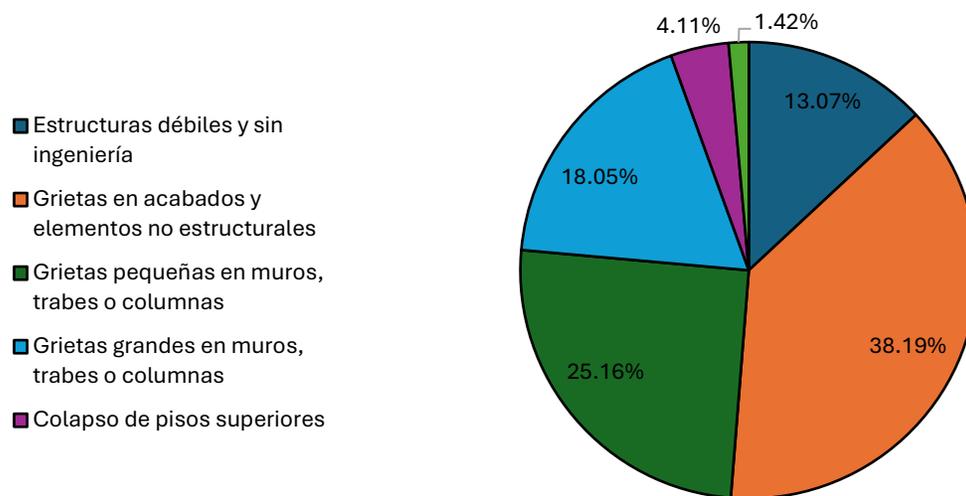


Figura 2.3 Distribución de daños durante los sismos estudiados (Reinoso *et al.*, 2018)

2.2 Impacto de los sismos de 1985 y 2017

2.2.1 Sismo de 19 de septiembre de 1985

El sismo del 19 de septiembre en México ocurrió a las 7:17 horas, con una magnitud de 8.1 con epicentro en Michoacán (SSN, 2024), los estados afectados fueron la Ciudad de México, Jalisco, Estado de

México, Guerrero, Colima, Morelos y Michoacán, dejando un saldo de más de 10,000 muertos y 40,000 lesionados (Miranda y Ramos, 2021). Según registros de Fundación ICA (1988), se documentaron 133 colapsos totales, 353 colapsos parciales y 271 estructuras con daños severos en un estudio realizado para 53,000 edificios.

Este sismo es de gran interés para el estudio del golpeo sísmico, ya que, según Meli *et al.* (2019), al menos 330 edificaciones sufrieron daños graves o totales durante este evento, de las cuales el 15% presentaron daños relacionados con la patología de estudio tal como se muestra en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1 Porcentajes de casos en los que se observaron ciertas patologías (Meli *et al.*, 2019)

Patología	Porcentaje (%)
Asimetría notable de rigidez	15
Edificio de esquina	42
Primer piso flexible (planta baja débil)	8
Columna corta	4
Sobrecarga excesiva	9
Hundimientos diferenciales previos	2
Problemas de cimentación	13
Choque con edificios cercanos (golpeteo)	15
Daños previos por sismo	5
Punzonamiento de losas reticulares	4
Falla en pisos superiores	38
Falla en pisos intermedios	40

2.2.2 Sismo de 19 de septiembre de 2017

El 19 de septiembre de 2017 a las 13:14 horas se registró uno de los sismos más fuertes que ha sacudido a México, con una magnitud de 7.1 y una profundidad de 57 km (SSN, 2017), el epicentro se localizó entre los estados de Puebla y Morelos, a 120 km de la ciudad de México como se muestra en la Figura 2.4.



Figura 2.4 Epicentro del sismo del 19 de septiembre de 2017 (SSN, 2017).

Después de los sismos de septiembre de 2017 en la Ciudad de México, se presentaron más de 6,600 estructuras con riesgo, de las cuales 38 colapsaron totalmente, como se muestra en la Tabla 2.2. Además, hubo 228 personas fallecidas y 69 rescatadas con vida (Ahued, 2018). De acuerdo con la base de datos del Instituto de Ingeniería de la UNAM (IINGEN), hasta 2022 se tenían registrados 12,466 inmuebles dañados por este sismo, de los cuales 11,189 eran de uso habitacional (Reinoso *et al.*, 2022). En la Figura 2.5 se muestra un mapa de estos inmuebles (Reinoso *et al.*, 2022), así como las acciones realizadas a ellos.

Tabla 2.2 Inmuebles afectados por alcaldía en la Ciudad de México, septiembre 2017 (Reinoso *et al.*, 2022)

Alcaldía	Riesgo bajo	Riesgo medio	Riesgo Alto	Alto riesgo de colapso	Derrumbes
Álvaro Obregón	65	30	2	1	1
Azcapotzalco	35	17	10	2	0
Benito Juárez	353	179	112	66	12
Coyoacán	132	79	62	30	5
Cuajimalpa	4	0	2	2	0
Cuauhtémoc	462	320	215	136	10
Gustavo A. Madero	125	104	38	14	2
Iztacalco	30	496	28	3	0
Iztapalapa	145	638	173	108	2
Magdalena Contreras	16	3	7	2	0
Miguel Hidalgo	80	25	19	6	0
Milpa Alta	1	2	1	1	0
Tláhuac	648	445	353	136	4
Tlalpan	69	21	19	18	0
Venustiano Carranza	78	76	49	20	0
Xochimilco	103	32	126	40	2

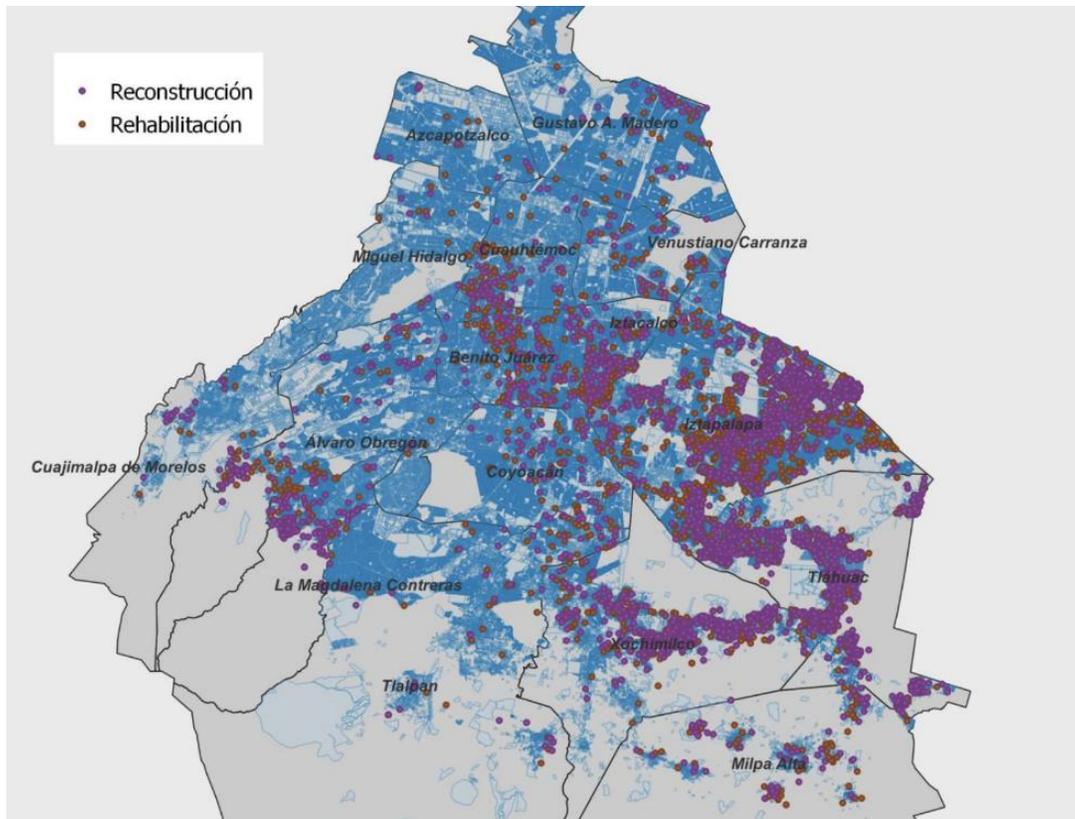


Figura 2.5 Inmuebles dañados por el sismo del 19 de septiembre de 2017 (Reinoso *et al.*, 2022).

2.3 Revisión de casos específicos

Para el sismo del 19 de septiembre de 2017 se identificaron 234 casos de golpeteo sísmico en la Ciudad de México, en la Figura 2.6 se muestra el conteo de casos por alcaldía (Reinoso *et al.*, 2023), observando que la delegación Cuauhtémoc es presentó la mayor cantidad de casos (94). A partir de esta información, el estudio se centró a una zona que abarca las colonias Roma Norte y Sur, así como una parte de la colonia Hipódromo Condesa, donde se contabilizaron 1923 edificios, de los cuales 167 presentaron algún nivel de daño de acuerdo con la Tabla 2.3. De esta muestra, en 22 casos se identificó la presencia de golpeteo sísmico, lo que representa un 13.1%. De estos, 17 casos ocurrieron entre dos edificios y 5 entre tres edificios. El análisis se enfoca solo en los casos que involucran dos edificios, ya que esto permite una clasificación más precisa de las estructuras involucradas (Reinoso *et al.*, 2023).

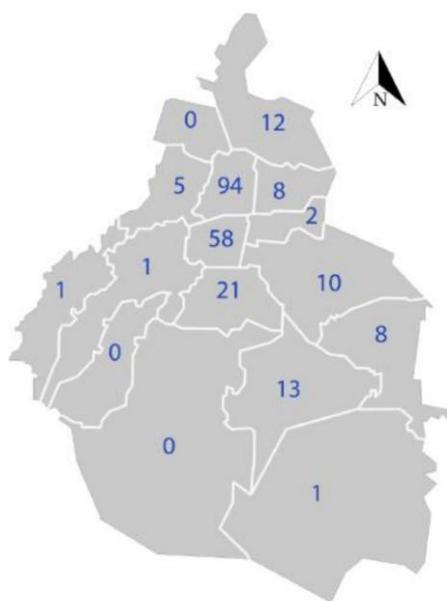


Figura 2.6 Casos de golpeteo por alcaldía (Reinoso *et al.*, 2023)

Tabla 2.3 Clasificación del daño en los edificios (Reinoso *et al.*, 2019).

Nivel de daño	Características
Nulo	La estructura no presenta ningún tipo de daño, no se ven afectados elementos estructurales ni elementos no estructurales.
Menor	Corresponde a daños ligeros que no afectan a la integridad de la estructura, se ven reflejados en muros no estructurales, acabados, recubrimientos, instalaciones y vidrios.
Intermedio	Además de los daños descritos en el punto anterior, se presentan grietas pequeñas en elementos estructurales como bigas columnas o muros diafragma, que evidencian la presencia de daño estructural.
Grave	Grietas mayores y deformaciones importantes en elementos estructurales, se observa exposición del acero de refuerzo. Este tipo de daño compromete la estabilidad de la estructura.
Total	Colapso de la estructura durante el sismo o se requiere la demolición debido al daño presente.

La Figura 2.7 muestra los 17 casos analizados que registraron daños por golpeteo sísmico entre dos edificios en la Ciudad de México durante el sismo del 19 de septiembre de 2017, presentando el daño global de cada caso. En la Figura 2.8 se detalla el daño real de los edificios de manera individual, clasificando el daño de acuerdo con la Tabla 2.3 (Reinoso *et al.*, 2019).

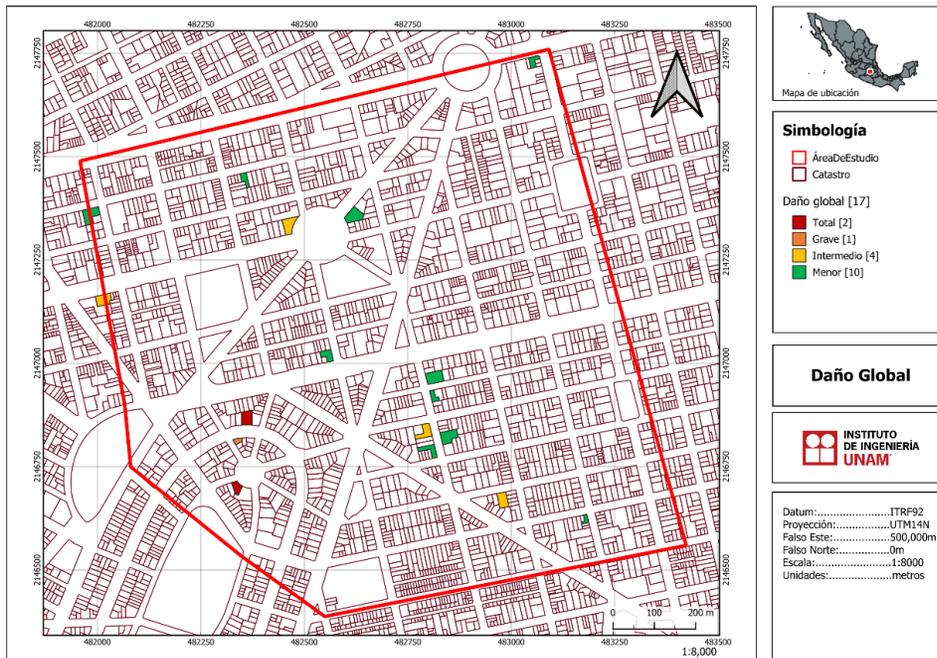


Figura 2.7 Daños globales por caso (Reinoso *et al.*, 2023)

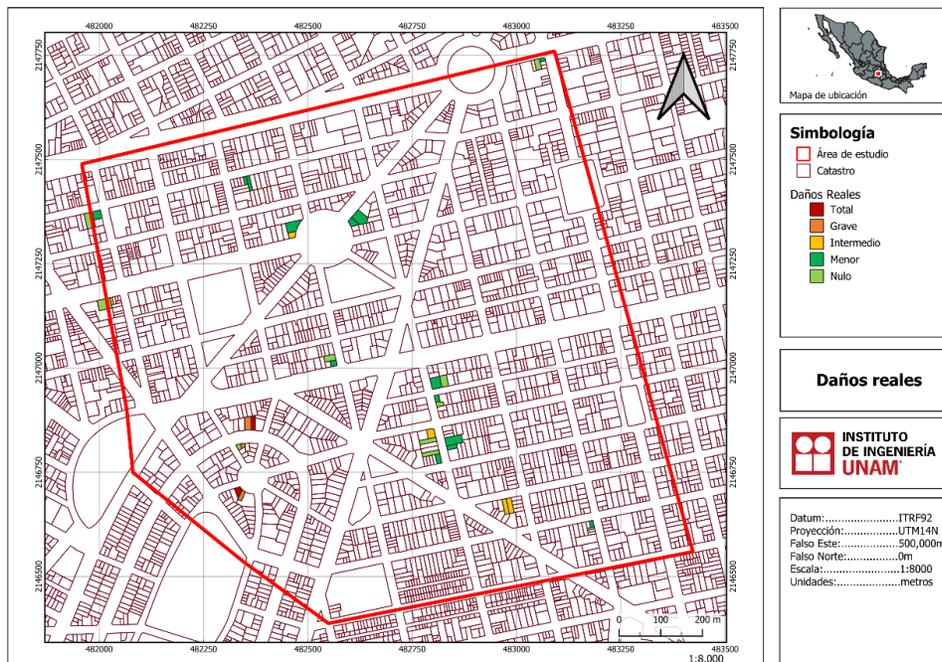


Figura 2.8 Daños reales presentados por los edificios (Reinoso *et al.*, 2023)

El análisis de estos 17 casos revela diversas tendencias relacionadas con factores como la diferencia de niveles, la antigüedad de las estructuras, la variación en la rigidez estructural y la asimetría de esquina entre los edificios afectados. Estos factores influyen directamente en la magnitud y distribución del daño por golpeo, ofreciendo información importante sobre los tipos de interacciones estructurales que

agravan los impactos durante eventos sísmicos. La identificación y análisis detallado de estos aspectos permitirá una mejor comprensión del comportamiento estructural ante el golpeteo sísmico.

2.3.1 Diferencia de niveles

La diferencia de niveles entre edificios adyacentes es un factor determinante en la magnitud del daño causado por el golpeteo sísmico. Para el análisis, se considera una variación de hasta dos niveles entre las estructuras como el umbral para categorizar los casos de estudio. En la Tabla 2.4 y Figura 2.9 se muestran los casos donde la diferencia de niveles es menor o igual a dos. En estos escenarios, el daño estructural promedio es relativamente bajo, con un valor de 4.6% (Figura 2.10).

Tabla 2.4 Edificios con menos de dos niveles de diferencia.

Valor asociado	Nivel de daño	Contador	Porcentaje
0.000	Sin Daño	0	0%
0.025	Menor	6	86%
0.175	Intermedio	1	14%
0.450	Grave	0	0%
0.950	Total	0	0%
		7	

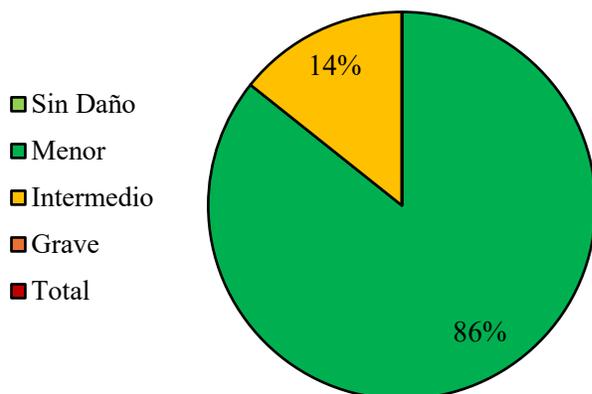


Figura 2.9 Edificios con menos de dos niveles de diferencia.

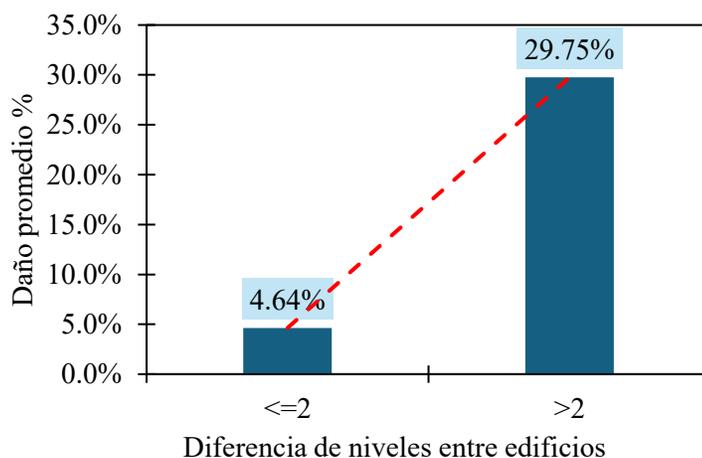


Figura 2.10 Daño promedio en los edificios respecto a la diferencia de niveles.

Por otro lado, la Figura 2.11 y Tabla 2.5 Edificios con más de dos niveles de diferencia. presentan los casos donde la diferencia de niveles supera los dos pisos. En estos casos, los resultados muestran un incremento notable en el daño promedio de la Figura 2.10, elevándose al 29.7%. Este incremento en el daño sugiere que la diferencia en altura está asociada con una mayor vulnerabilidad estructural durante eventos sísmicos. Cuando los edificios tienen alturas significativamente diferentes, las fuerzas de impacto derivadas del golpeteo pueden afectar de manera desigual a las estructuras adyacentes.

Tabla 2.5 Edificios con más de dos niveles de diferencia.

Valor asociado	Nivel de daño	Contador	Porcentaje
0.000	Sin Daño	0	0%
0.025	Menor	4	40%
0.175	Intermedio	3	30%
0.450	Grave	1	10%
0.950	Total	2	20%
		10	

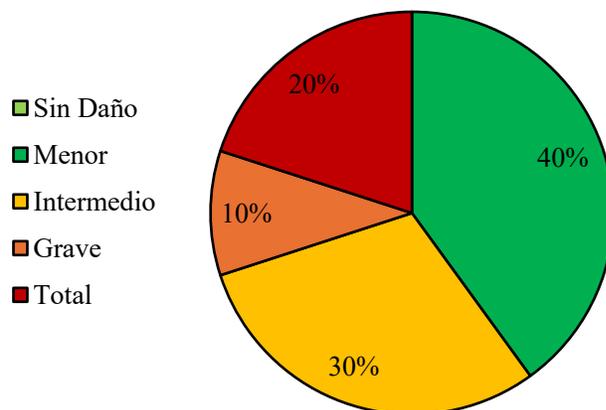


Figura 2.11 Edificios con más de dos niveles de diferencia

2.3.2 Diferencia de rigidez

La diferencia de rigidez entre las estructuras se analizó relacionando el índice de daño asignado con el tipo de estructuración de cada edificio. En este estudio, se clasificaron las estructuras en tres categorías: flexibles, semirrígidas y rígidas, de acuerdo con la clasificación establecida en la Tabla 2.6. Esto permite identificar patrones claros de susceptibilidad al daño en función de la rigidez de la estructura.

En la Figura 2.12 los resultados indican que las estructuras categorizadas como semirrígidas y flexibles tienden a sufrir mayores daños en comparación con las estructuras rígidas. Esto particularmente cuando están ubicadas junto a una estructura rígida.

Tabla 2.6 Categoría de rigidez de acuerdo a su sistema estructural.

Sistema estructural	Clave	Categoría
Mampostería histórica	1.1	Rígido
Muros de mampostería confinada	1.2	Rígido
Muros de mampostería no confinada	1.3	Rígido
Marcos de concreto con muros	2.1	Semirrígido
Marcos de concreto	2.2	Semirrígido
Columnas y losa plana de concreto	2.3	Flexible
Marcos de acero	3	S/C
Estructura metálica	3.1	S/C

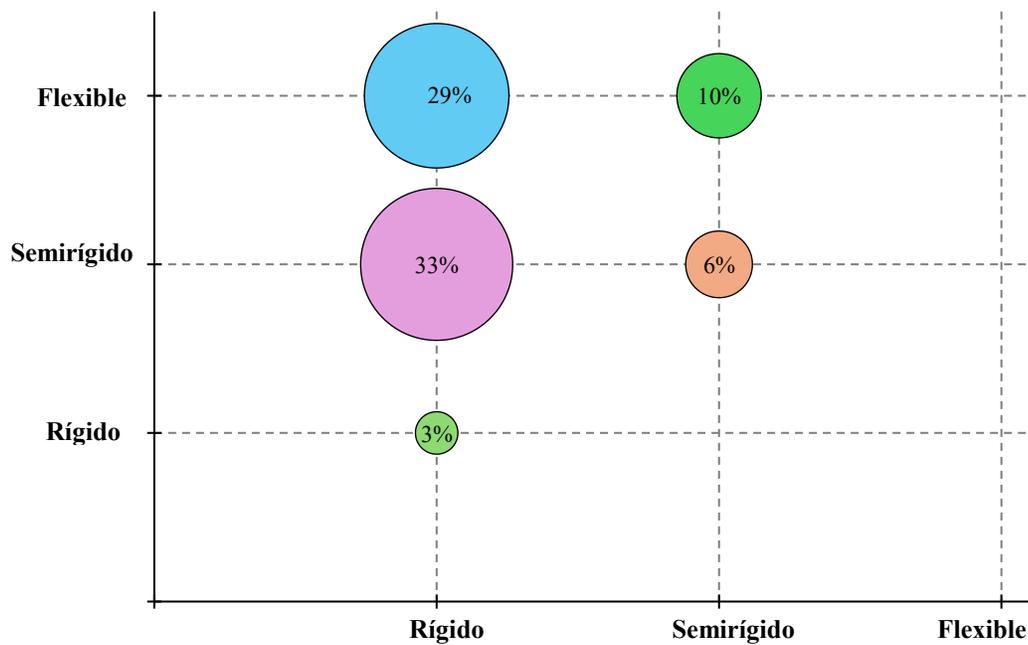


Figura 2.12 Nivel de daño promedio.

2.3.3 Diferencia de edad

La diferencia de edad entre las estructuras se evaluó tomando como referencia el año 1985, un año clave en la normatividad de construcción de la Ciudad de México tras el devastador sismo de ese año. En la Tabla 2.7 y en la Figura 2.13 se muestran los casos donde ambos edificios fueron construidos antes de esta fecha, observándose daños significativamente más severos, incluyendo dos colapsos totales. Esto sugiere que los edificios más antiguos, diseñados con normativas anteriores son más vulnerables a sufrir daños graves por golpeteo sísmico.

En los casos donde uno de los edificios fue construido antes de 1985 y el otro después, como se ilustra en la Tabla 2.8 y la Figura 2.14, se presentaron ocho casos de golpeteo. De estos, siete mostraron solo daños menores, lo que indica que los edificios más modernos, diseñados bajo normas sísmicas más estrictas, tienden a resistir mejor los efectos de este mecanismo.

Finalmente, cuando ambos edificios fueron construidos después de 1985, no se registró ningún daño como evidencia la Tabla 2.9. Esto refuerza la mejoría de las normativas después de este año para mitigar los efectos del golpeteo sísmico. En la Tabla 2.10 y en Figura 2.15 se presenta un resumen de estos datos, donde claramente el caso más desfavorable es cuando los dos edificios involucrados fueron construidos antes de 1985. Estos resultados recalcan la vulnerabilidad de las construcciones más antiguas y la necesidad de programas de reforzamiento estructural para reducir el riesgo de colapso en futuros sismos.

Tabla 2.7 Ambos edificios construidos antes de 1985

Valor asociado	Nivel de daño	Contador	Porcentaje
0.000	Sin Daño	0	0.0%
0.025	Menor	3	33.3%
0.175	Intermedio	3	33.3%
0.450	Grave	1	11.1%
0.950	Total	2	22.2%
		9	

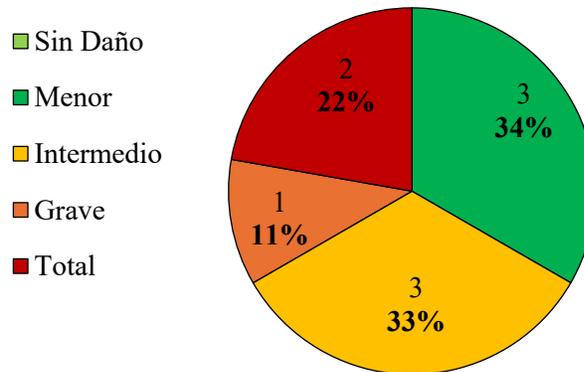


Figura 2.13 Edificios construidos antes de 1985.

Tabla 2.8 Un edificio construido antes de 1985 y otro después de 1985.

Valor asociado	Nivel de daño	Contador	Porcentaje
0.000	Sin Daño	0	0.0%
0.025	Menor	7	87.5%
0.175	Intermedio	1	12.5%
0.450	Grave	0	0.0%
0.950	Total	0	0.0%
		8	

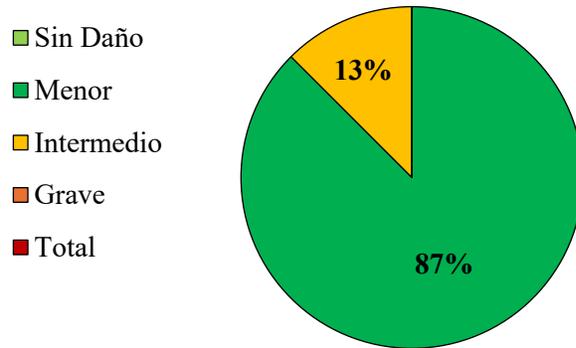


Figura 2.14 Un edificio antes de 1985 y otro después

Tabla 2.9 Ambos edificios construidos después de 1985

Valor asociado	Nivel de daño	Contador	Porcentaje
0.000	Sin Daño	0	-
0.025	Menor	0	-
0.175	Intermedio	0	-
0.450	Grave	0	-
0.950	Total	0	-
		0	

Tabla 2.10 Daño promedio en las estructuras.

Diferencia de edad	Daño promedio
Ambos antes del 85	32.78%
Antes y después del 85	4.38%
Ambos después del 85	-

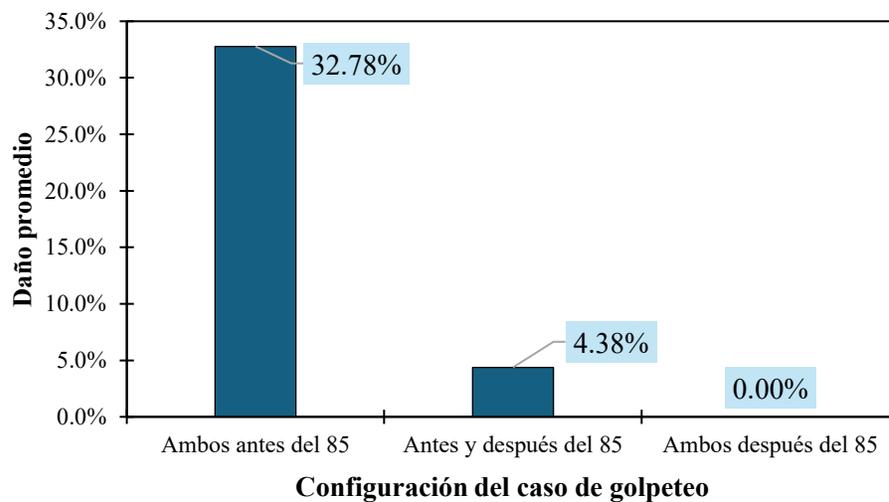


Figura 2.15 Daño promedio respecto a la antigüedad de las estructuras.

2.3.4 Edificio de esquina

En el caso de los edificios con asimetría de esquina, no se observa una tendencia clara que indique que esta patología influya significativamente en el nivel de daño causado por golpeteo sísmico. De los 17 casos registrados, 11 presentaban asimetría de esquina y la mayoría de estos solo mostró daños menores (73%) como se observa en la Tabla 2.11 y Figura 2.16. Sin embargo, es importante señalar que, en los 6 casos restantes, donde ninguna de las estructuras presentaba esta asimetría, se registró un mayor promedio de daño como se ilustra en la Figura 2.17. Esto podría indicar que la asimetría de esquina, aunque no es determinante, puede ofrecer una ligera ventaja en términos de distribución de impactos, lo que podría reducir la severidad del daño en ciertos escenarios.

Tabla 2.11 Casos donde un edificio presenta asimetría de esquina.

Valor asociado	Nivel de daño	Contador	Porcentaje
0.000	Sin Daño	0	0.0%
0.025	Menor	8	72.7%
0.175	Intermedio	1	9.1%
0.450	Grave	1	9.1%
0.950	Total	1	9.1%
		11	

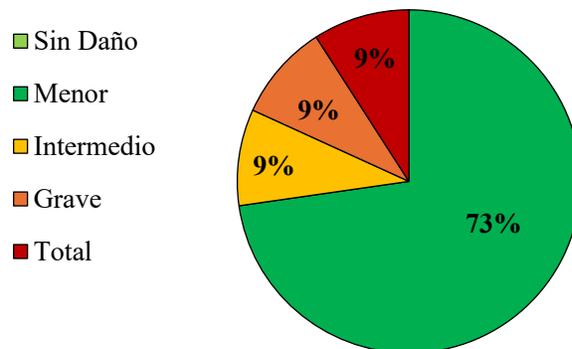


Figura 2.16 Casos donde un edificio presenta asimetría de esquina.

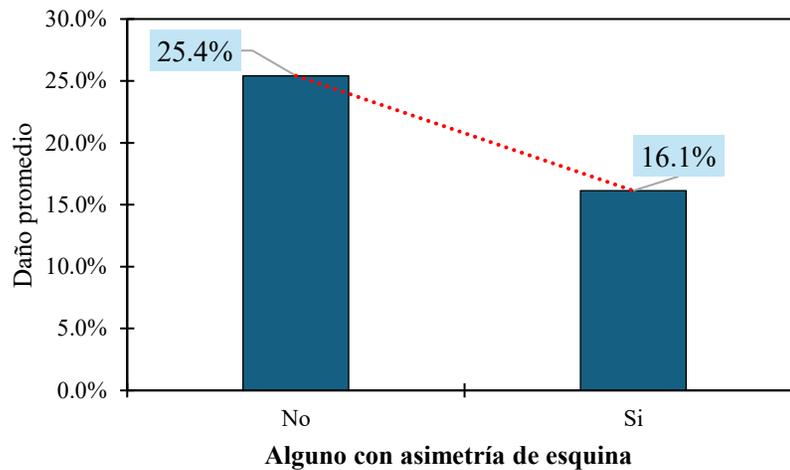


Figura 2.17 Daño promedio registrado.

2.3.5 Diferencia de altura en conjunto con asimetría de esquina

Al analizar conjuntamente la diferencia de alturas y la asimetría de esquina, se observa que la asimetría no tiene un impacto significativo en el nivel de daño causado. Los datos de la Tabla 2.12 y de la Figura 2.18 revelan que el daño promedio en edificios con una diferencia de alturas significativa y sin asimetría es de 33.1%, mientras que en aquellos con asimetría es ligeramente mayor, alcanzando el 36%. Esta pequeña diferencia no parece ser suficientemente relevante para considerar que la asimetría de esquina juegue un papel crucial en la severidad de los daños.

Por otro lado, se reitera que la diferencia de alturas sí muestra una tendencia clara en los niveles de daños causados a los edificios. La diferencia de alturas resulta ser un factor estadísticamente relevante, mostrando que las estructuras que presentan una mayor disparidad en altura son más susceptibles a daños significativos. La combinación de una mayor diferencia de alturas con una asimetría de esquina parece no incrementar sustancialmente el daño, lo que sugiere que la diferencia de alturas, por sí sola, tiene un peso mucho mayor en la vulnerabilidad estructural durante un sismo.

Tabla 2.12 Casos en conjunto de diferencia de altura y asimetría de esquina.

Diferencia de altura	Asimetría de esquina	
	No	Si
Poca	10.0%	4.6%
Mucha	33.1%	36.3%

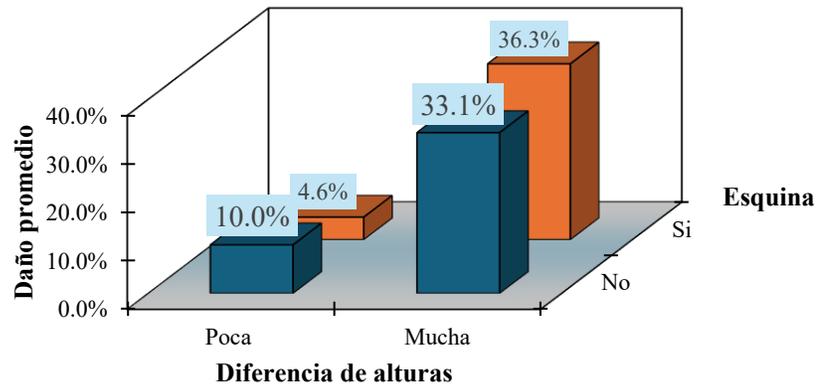


Figura 2.18 Daño promedio respecto a la asimetría de esquina y la diferencia de niveles en conjunto

3. Parámetros de modelado

Para modelar esta patología en software comercial como lo es ETABS (Computers and Structures Inc, 2018), es fundamental tomar en cuenta dos variables clave: la separación entre edificios y el coeficiente de amortiguación de impacto.

Estas variables se ilustran la Figura 3.1, donde se presenta el modelo de contacto empleado para simular el golpeteo sísmico, además se ilustra visualmente el funcionamiento del coeficiente de amortiguamiento, este parámetro regula la disipación de energía durante el impacto y se determina a partir de la ecuación (3.1).

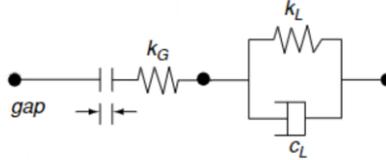


Figura 3.1 Modelo de contacto: Elemento Gap más Kelvin-Voigt (Shakya y Wijeyewickrema, 2009)

$$C_L = -2 \ln(e_r) \sqrt{\frac{k_L m_1 m_2}{[\pi^2 + (\ln(e_r))^2](m_1 + m_2)}} \quad (3.1)$$

Donde

C_L	Coeficiente de amortiguamiento
e_r	Coeficiente de restitución asociado a las superficies involucradas
k_L	Constante del resorte lineal
$m_1 m_2$	Masas de los elementos involucrados en la colisión

Para estructuras de concreto es recomendable usar los siguientes parámetros (Márquez, 2022):

$$e_r = 0.65$$

$$k_L = 93,500 \text{ kN/m}$$

3.1 Calibración de modelado

Para garantizar que los modelos desarrollados en este trabajo sean adecuados y que los resultados obtenidos sean confiables, se replicó un estudio realizado por Polycarpou *et al.* (2013). Al acercarnos a los resultados reportados en dicho artículo, se valida que el método de modelado y análisis es apropiado.

Según Polycarpou *et al.* (2013), las simulaciones numéricas consideraron dos edificios de estructura típicas, que constan de cinco y tres pisos, respectivamente, como se muestra en la Figura 3.2. Las estructuras son modeladas en dos dimensiones como sistemas de múltiples grados de libertad, con comportamiento de cortante en vigas y las masas agrupadas en cada nivel. Para simplificar el análisis se consideró que ambos edificios tenían elementos estructurales idénticos, diferenciándose únicamente en el número de pisos.

Cada piso tiene una masa de 140 toneladas, exceptuando la del último piso donde se consideró una masa de 100 toneladas. Los períodos fundamentales de los edificios equivalen a 0.554 y 0.344 segundos, respectivamente. Además, se asumió que los dos edificios estaban en serie con un espacio de separación de 10 cm y niveles de piso colineales, generando un golpeteo de tipo piso-piso.

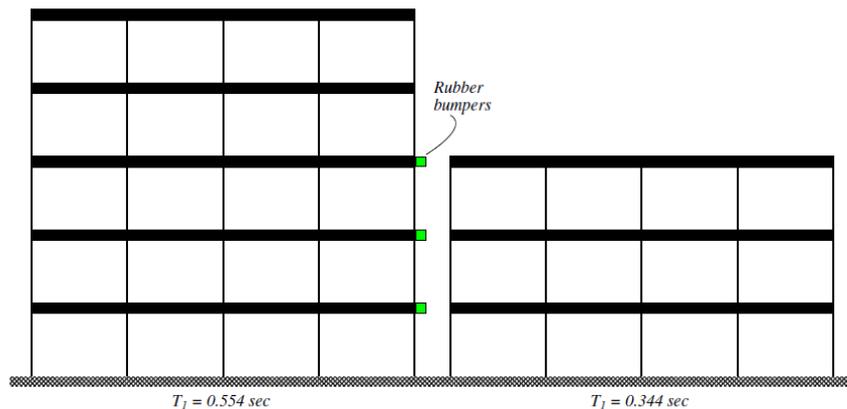


Figura 3.2 Modelos considerados para calibrar el método (Polycarpou *et al*, 2013).

Se utilizó un modelo de impacto viscoelástico lineal modificado para la simulación de impactos de piso a piso (es decir, sin el uso de amortiguadores). En ese caso, para la rigidez del resorte de impacto lineal Polycarpou *et al.* (2013) utilizaron un valor de 3750 kN/mm, mientras que el coeficiente de restitución igual a 0.65.

En los análisis dinámicos se consideraron dos configuraciones diferentes, utilizando el registro del terremoto de Kobe de 1995 (estación KJMA, PGA = 0.821 g) como excitación del suelo. En la primera configuración, se consideró que la separación entre los edificios era lo suficientemente ancha como para evitar cualquier contacto entre los dos edificios. En el segundo caso, se consideró que la separación era igual a 10 cm.

El modelo de calibración se realizó en el Software ETABS. La composición de los edificios se ilustra en la Figura 3.3, donde el edificio de 5 niveles (izquierda) se denomina edificio 1 y al de tres niveles (derecha) edificio 2. Los elementos estructurales poseen las mismas características en ambas estructuras: columnas con una altura de 3 metros por piso y vigas con un claro de 4 metros.

Ambos elementos estructurales están diseñados en concreto con una resistencia a la compresión de 250 kg/cm^2 . Las dimensiones de estos elementos se colocaron de esa manera para que los resultados se acerquen lo más posible a los resultados teóricos mostrados por Polycarpou *et al.* (2013).

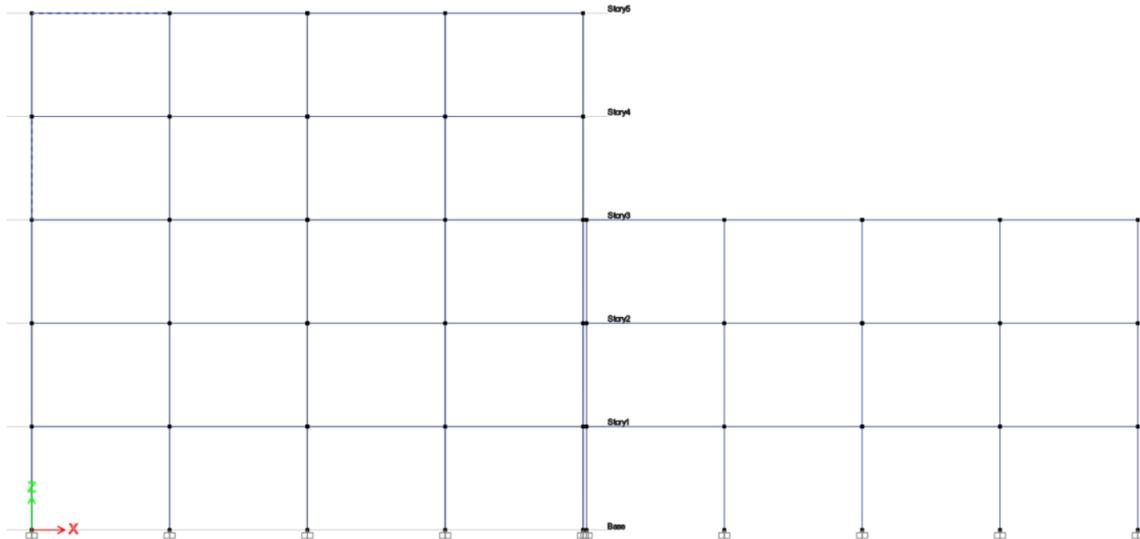


Figura 3.3 Vista del modelo sin golpeteo.

Una de las principales características del modelo es que se desestima el peso propio de los elementos, asignando manualmente la carga por nivel según los valores proporcionados por Polycarpou *et al.* (2013), como se muestra en la Figura 3.4. Estas cargas se distribuyen de manera que cada nivel soporta 140 toneladas, mientras que el último nivel tiene una carga de 100 toneladas.

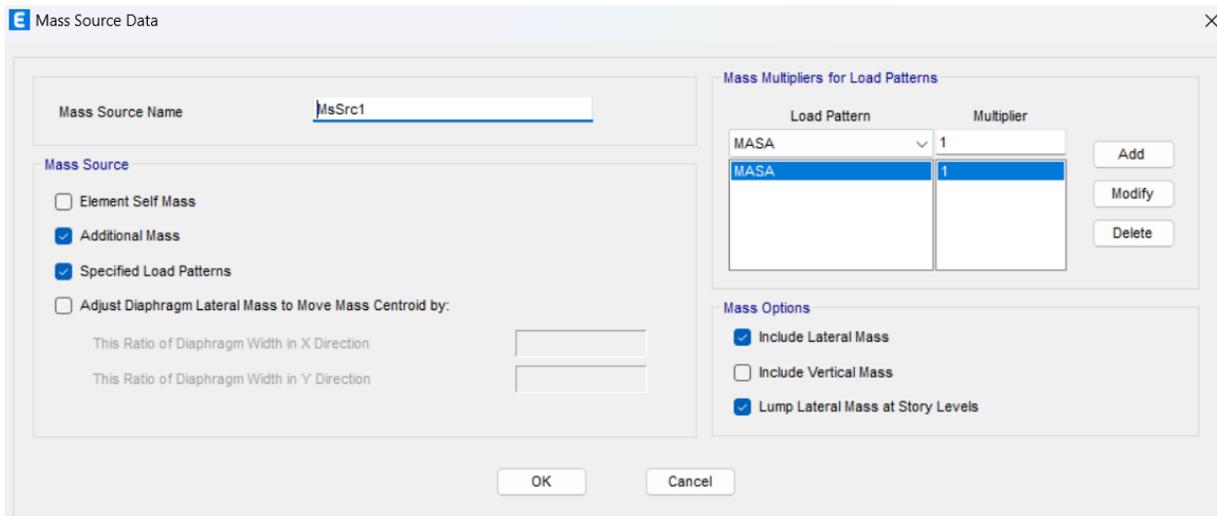


Figura 3.4 Ventana de la configuración de la masa del modelo.

Tras configurar los modelos según las especificaciones descritas anteriormente, se determinaron los períodos fundamentales de vibración de cada edificio utilizando el software ETABS. Los valores obtenidos se presentan en la Tabla 3.1, donde se comparan con los resultados reportados en el artículo de Polycarpou *et al.* (2013). La comparación muestra una concordancia adecuada entre ambos conjuntos de resultados, con errores que pueden considerarse despreciables, del orden del 0.003%.

Este nivel de precisión valida la calidad del modelo desarrollado y confirma que los parámetros empleados son consistentes con los planteados en el estudio base. Además, permite asegurar que el enfoque adoptado para simplificar las propiedades estructurales y las cargas asignadas no afecta significativamente la representación del comportamiento dinámico de las estructuras bajo análisis.

Tabla 3.1 Comparación de los periodos fundamentales de las estructuras.

Edificio	Periodo T (s)		% de error
	(Polycarpou <i>et al.</i> , 2013)	Este trabajo	
Cinco niveles	0.554	0.554	0.00%
Tres niveles	0.344	0.3439	0.03%

A continuación, se presentan los resultados finales obtenidos para el modelo sin considerar el golpeteo sísmico. La Figura 3.5 muestra las gráficas de las historias de aceleración para ambos edificios. Mientras que la Figura 3.6 presenta las aceleraciones máximas por nivel, en este caso, los resultados son muy similares a los reportados en el artículo de Polycarpou *et al.* (2013) teniendo un error porcentual en general menor al 10%, exceptuando el primer nivel del edificio 1, el cual alcanza un 23.5% de error (Tabla 3.2).

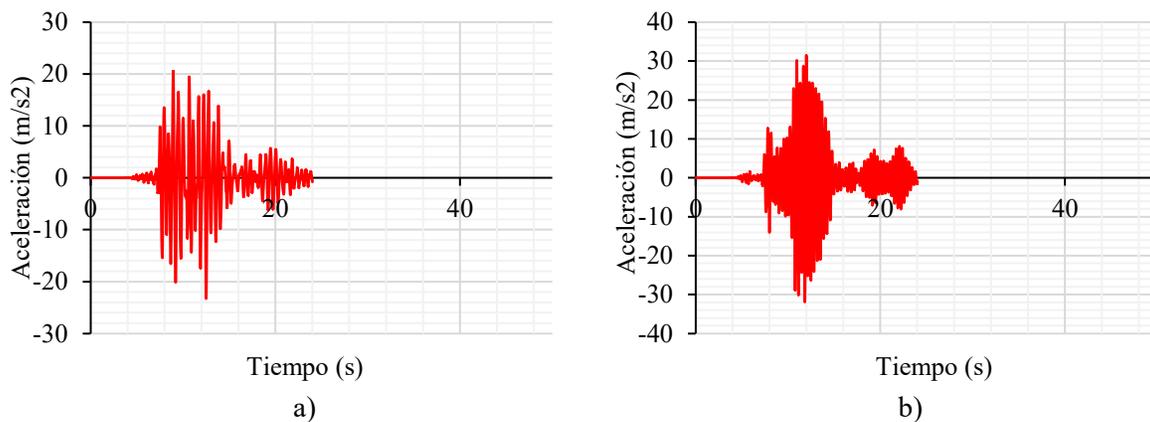


Figura 3.5 Historia de aceleraciones. a) Edificio 1; b) edificio 2.

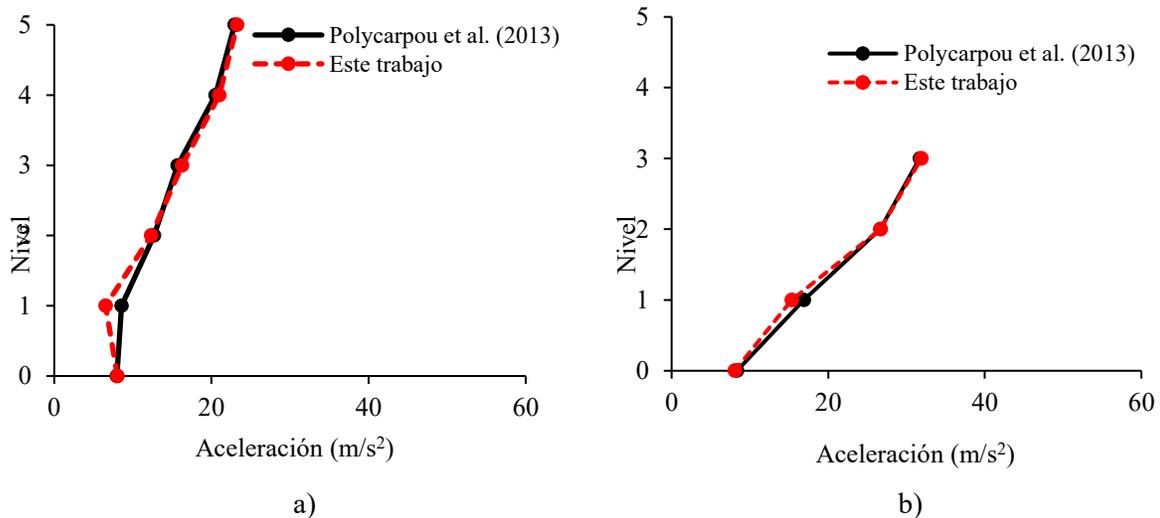


Figura 3.6 Aceleraciones máximas por nivel en el caso sin golpeteo. a) Edificio 1; b) edificio 2.

Por otro lado, la Figura 3.7 muestra los desplazamientos máximos de entrepiso para los dos edificios. En el caso del primer edificio, los valores obtenidos fueron prácticamente idénticos a los del artículo, lo que

demuestra un alto nivel de precisión en la simulación. Para el segundo edificio, aunque se observó una mayor disparidad en los resultados, las diferencias siguen siendo aceptables, manteniéndose dentro de un margen razonable de similitud con los valores teóricos, esto se puede observar en la Tabla 3.2 donde se muestran los errores porcentuales, los cuales se mantienen menores al 1% para el edificio 1 y menores al 10% para el edificio 2.

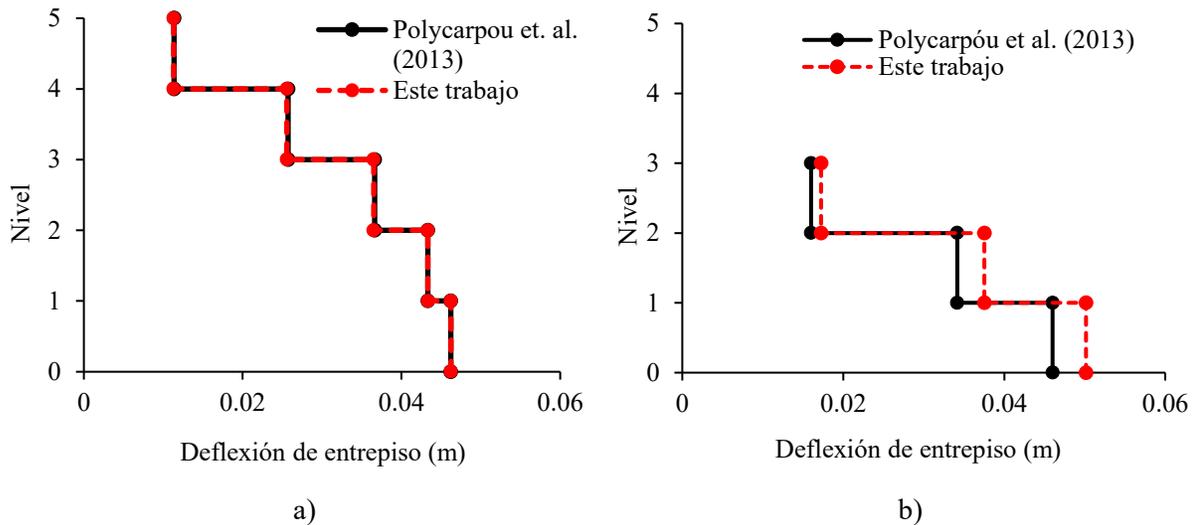


Figura 3.7 Deflexiones máximas de entrepiso en el caso sin golpeteo. a) Edificio 1; b) edificio 2.

Tabla 3.2 Porcentaje de error caso sin golpeteo.

		Error (%)	
		Nivel	Deflexión de entrepiso
Edificio 1		0	0.04%
		1	0.02%
		2	0.31%
		3	0.56%
		4	0.40%
		5	0.40%
Edificio 2		0	9.04%
		1	9.91%
		2	7.78%
		3	7.78%

En la Figura 3.8 se muestra configuración del modelo con golpeteo sísmico. En esta figura se puede observar el elemento de contacto utilizado para simular dicho fenómeno. En este caso, se emplearon elementos tipo "link" disponibles en las herramientas de ETABS, los cuales se colocaron estratégicamente en las uniones donde se anticipa que ocurra el contacto entre los edificios durante un evento sísmico.

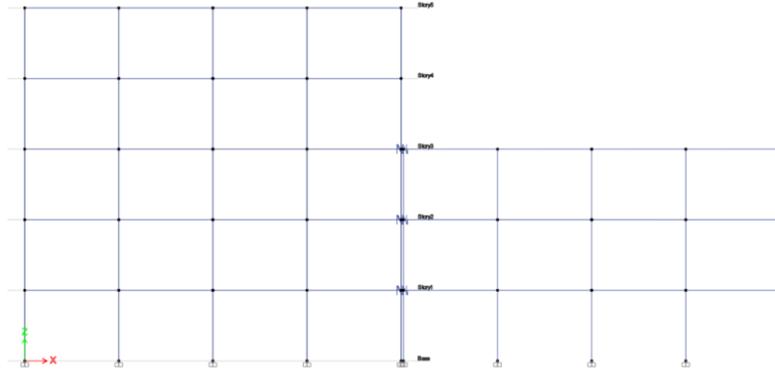


Figura 3.8 Vista del modelo con golpeteo sísmico.

La configuración de estos elementos de contacto se establece como se muestra en la Figura 3.9a, donde se define la separación inicial entre los edificios mediante un elemento tipo “GAP”, en este caso de 10 cm. Este elemento permite modelar el comportamiento no lineal del contacto, activándose únicamente cuando la separación se reduce a cero durante la interacción.

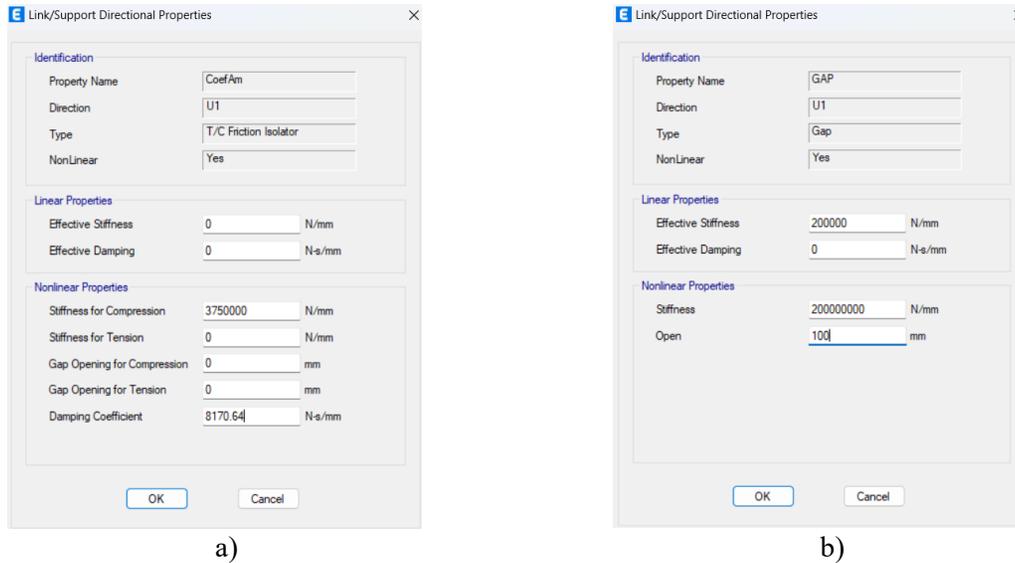


Figura 3.9 Ventanas de configuración del software ETABS. a) Separación entre edificios (GAP); b) Coeficiente de amortiguamiento de impacto

En la Figura 3.9b se especifican los valores asignados a la constante de resorte lineal (k_L) y al coeficiente de impacto, este último calculado a partir de la ecuación (3.1), utilizando los siguientes parámetros:

$$\begin{aligned}
 m_1 &= 660,000 \text{ kg} \\
 m_2 &= 380,000 \text{ kg} \\
 k_L &= 3750 \text{ kN/mm} \\
 e_r &= 0.65
 \end{aligned}$$

$$C_L = -2 \ln(0.65) \sqrt{\frac{\left(3750 \frac{\text{kN}}{\text{mm}}\right) (660,000 \text{ kg})(380,000 \text{ kg})}{[\pi^2 + (\ln(0.65))^2](660,000 \text{ kg} + 380,000 \text{ kg})}}$$

$$C_L = 8170.6444 \frac{Ns}{mm}$$

Los resultados obtenidos del modelo de calibración que incluye el golpeteo sísmico se presentan en la Figura 3.10 y Figura 3.11. En estas se observa claramente cómo, con una separación de 10 cm, ocurre contacto entre las estructuras en el tercer piso durante la simulación. Este contacto es consistente con las características del golpeteo modelado y valida el uso de los elementos tipo "link" y las propiedades definidas en el modelo.

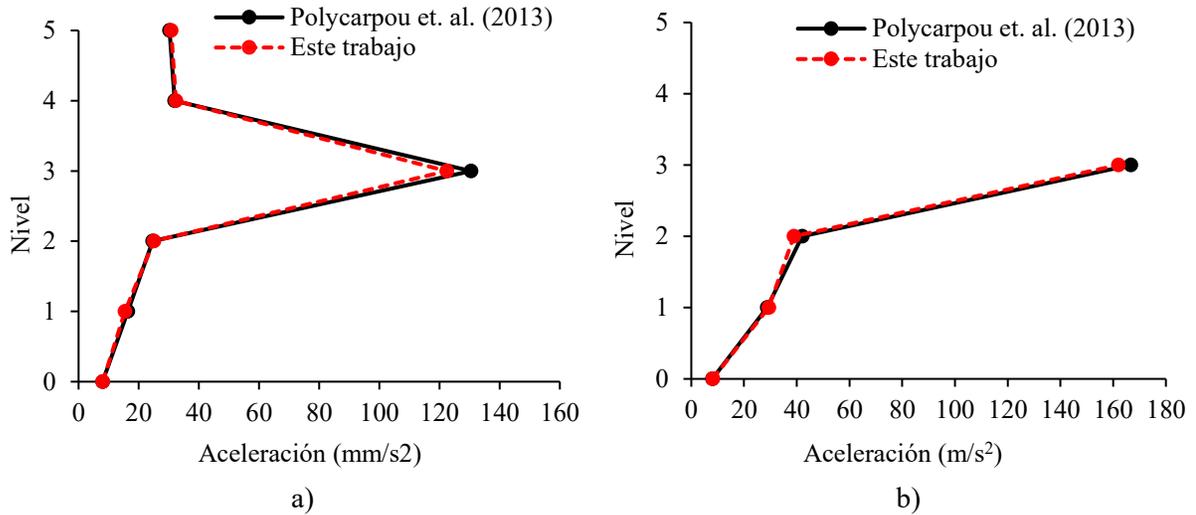


Figura 3.10 Aceleraciones máximas por nivel en el caso con golpeteo. a) Edificio 1; b) edificio 2.

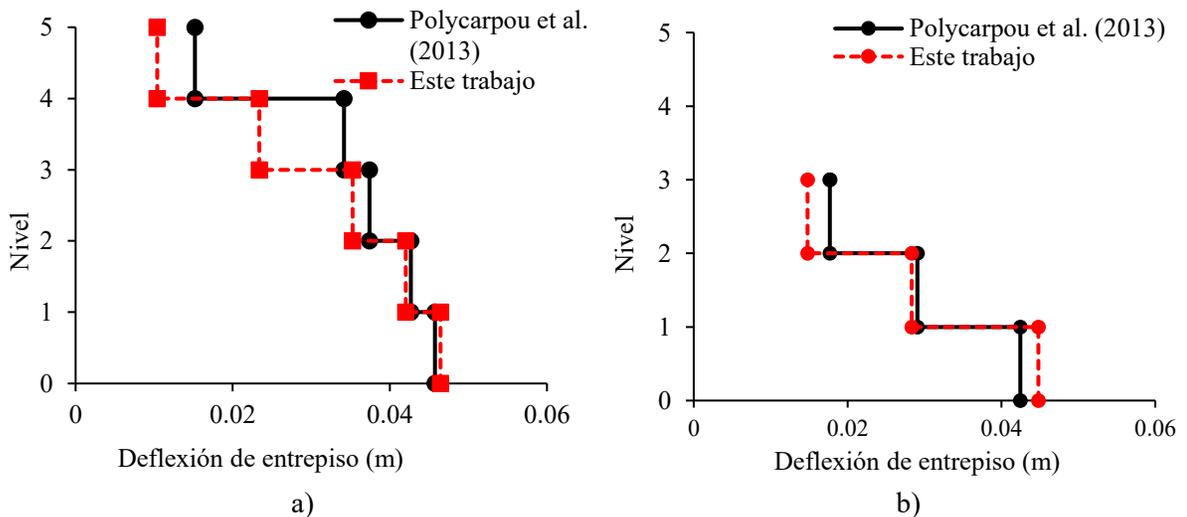


Figura 3.11 Deflexiones máximas de entrepiso para el caso con golpeteo. a) Edificio 1; b) edificio 2.

En la Tabla 3.3 se muestran los errores porcentuales obtenidos para la calibración con una separación de $S=10$ cm, se logra observar que para las aceleraciones máximas se mantienen menores al 7.5%. Para las deflexiones máximas en los niveles superiores el error aumenta considerablemente, alcanzando valores de hasta el 31.5%.

Tabla 3.3 Porcentaje de error S=10 cm.

Error (%)			
	Nivel	Aceleraciones Máximas	Deflexión de entrepiso
Edificio 1	0	1.09%	1.55%
	1	5.90%	1.55%
	2	1.84%	1.57%
	3	6.22%	5.79%
	4	1.47%	31.53%
	5	1.78%	31.57%
Edificio 2	0	1.09%	5.52%
	1	2.03%	5.52%
	2	7.47%	2.49%
	3	2.80%	16.38%

En términos generales, los errores porcentuales presentados permiten concluir que la calibración del modelo es adecuada y presenta un buen nivel de concordancia con los resultados obtenidos por Polycarpou *et al.* (2013). Si bien se observan algunas disparidades en ciertos niveles, la mayoría de los errores se mantienen dentro de un margen aceptable para este tipo de simulaciones.

Estos resultados permiten validar la capacidad del modelo para reproducir los fenómenos reportados en la literatura, como el contacto entre estructuras y los efectos dinámicos asociados. Esto asegura que el modelo es adecuado para realizar el análisis paramétrico propuesto en este trabajo, proporcionando una base confiable para explorar las variables que influyen en el golpeteo sísmico y en los índices de daño estructural.

4. Análisis paramétrico y evaluación del daño

4.1 Diferencia de niveles

Como se analizó en el capítulo 2 de este trabajo, existen diversos parámetros que pueden influir significativamente en el índice de daño de las estructuras involucradas en el golpeteo sísmico. Entre estos parámetros, uno de los más determinantes es la diferencia en el número de niveles entre las estructuras adyacentes.

A partir de los 17 casos analizados anteriormente, se definieron dos configuraciones estructurales para el estudio: una con un edificio de cinco niveles frente a uno de cuatro niveles y otro con un edificio de ocho niveles frente a otro de cuatro niveles.

La selección de estas configuraciones se basó en el número de niveles promedio y en la diferencia de niveles observada en los casos analizados. Se identificó que los edificios con daño intermedio a total presentaban, en promedio, una mayor diferencia de niveles (cuatro niveles), mientras que aquellos con un daño menor tenían una menor diferencia (dos niveles).

De esta manera, los modelos desarrollados también incorporan la clasificación propuesta, en la que se distingue entre edificios con una diferencia de niveles menor o igual a 2 y aquellos con una diferencia mayor a 2, de acuerdo con las estadísticas obtenidas. Este enfoque permitirá evaluar cómo la variación en este parámetro afecta el comportamiento estructural y el índice de daño en ambas configuraciones.

Las propiedades de los edificios propuestos para los modelos son basadas en lo ya visto en la calibración, variando el número de niveles y cambiando el registro sísmico al de Cibeles 19 de septiembre de 2017. Además, se analizó el comportamiento estructural considerando diferentes separaciones entre las estructuras: 0.0 cm, 0.5 cm, 1.0 cm y 1.5 cm, respectivamente. Estas separaciones son menores a la mínima requerida por las NTC-SISMO (2023), que establecen un valor mínimo de 5 cm. Realizar esta variación permite evaluar si una menor separación incrementa efectivamente el daño y en qué casos esto puede o no ser cierto.

4.1.1 Edificios con un piso de diferencia

La configuración de este modelo se presenta en la Figura 4.1, donde se muestra la composición estructural desarrollada en ETABS con una diferencia de un solo nivel entre los edificios adyacentes. En dicha configuración, se observa que el tipo de interacción corresponde a un golpeteo tipo piso-piso, donde los entresijos de ambas estructuras coinciden en altura.

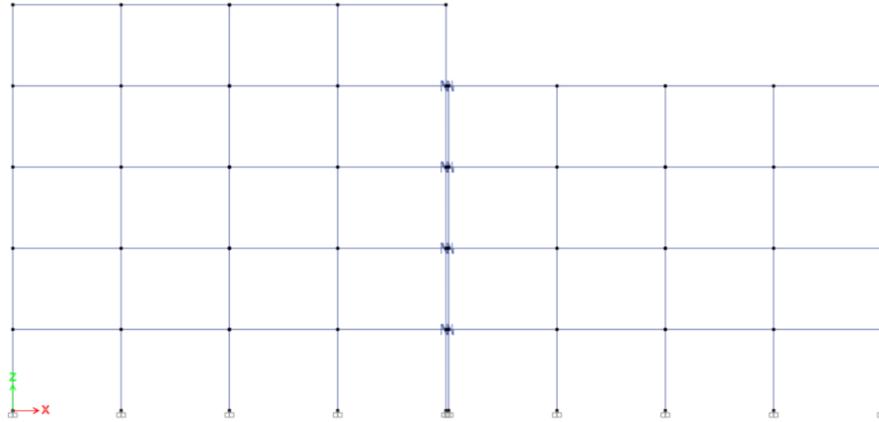
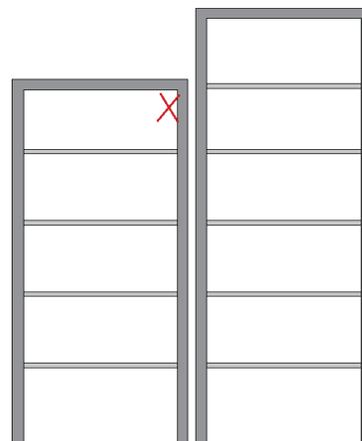


Figura 4.1 Modelo para la diferencia de 1 nivel.

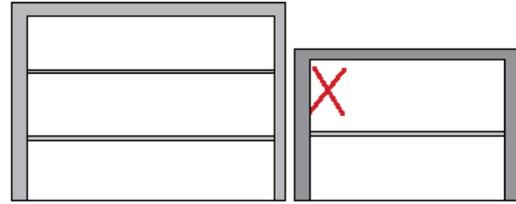
Por otro lado, la Figura 4.2 presenta ejemplos fotográficos tomados del visualizador de inmuebles con daños en México (SISÉ, 2025), en los que se documentan casos reales donde únicamente existía un nivel de diferencia entre las estructuras colindantes. Estos ejemplos permiten sustentar la validez del modelo propuesto y confirmar que esta configuración es representativa de situaciones observadas en campo y permiten establecer una relación directa entre los modelos analíticos y la evidencia.

En el caso registrado como Chapultepec 260 (Figura 4.2a), se observa a la izquierda un edificio de cinco niveles, compuesto por marcos de concreto con muros, mientras que a la derecha se encuentra un edificio de seis niveles, también construido mediante marcos de concreto. En este evento se documentó que el edificio de menor altura sufrió daños menores, mientras que el edificio más alto no presentó daños visibles.

Por su parte, en el caso de Durango 219 (Figura 4.2b) se observa un edificio de tres niveles a la izquierda frente uno de dos niveles a la derecha. Ambos edificios tienen una estructuración de mampostería confinada. En este caso, el edificio más bajo fue el más afectado con daños intermedios a comparación del edificio más grande que no mostró afectaciones relevantes.



a) Chapultepec 260



b) Durango 219

Figura 4.2 Ejemplos de casos con un nivel de diferencia (SÍSÉ, 2025).

En la Figura 4.3 se presentan los desplazamientos máximos registrados para las diferentes separaciones entre los edificios, así como los obtenidos sin presencia del golpeteo sísmico. Se observa que, cuando existe una interacción por golpeteo, el desplazamiento de ambos edificios tiende a ser menor, lo cual indica que el contacto entre las estructuras limita parcialmente el movimiento de éstas.

Esto no implica necesariamente que a menor separación se produzca un menor desplazamiento. De hecho, se aprecia que los desplazamientos mínimos se presentan, en la mayoría de los niveles cuando la separación es de 0.5 cm entre las estructuras.

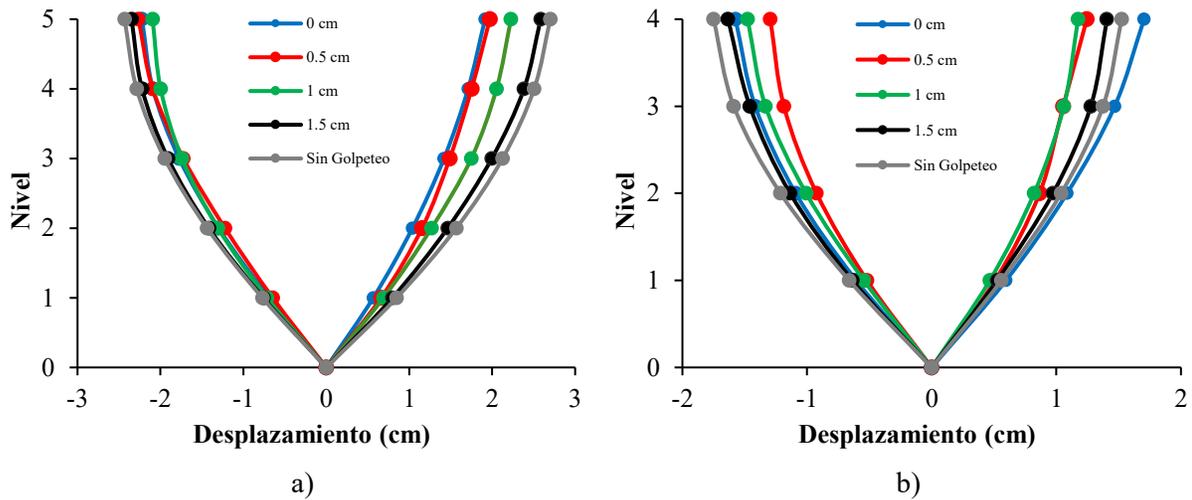


Figura 4.3 Desplazamientos máximos. a) Edificio 1; b) edificio 2.

Por otro lado, la Figura 4.4 muestra las fuerzas cortantes máximas generadas en los edificios para cada caso analizado. De forma similar a los desplazamientos, se observa que el cortante en presencia de golpeteo puede ser, en ciertos niveles menor que en la ausencia de este.

En estas gráficas se observa que las fuerzas cortantes mínimas se encuentran en los escenarios con separaciones entre 0.0 cm y 1.0 cm. Esta disminución sugiere que el golpeteo podría estar induciendo una redistribución de las cargas, absorbiendo parte de la energía mediante los impactos.

Aunque hay una reducción del cortante en la mayoría de los niveles se evidencia que en los niveles superiores los cambios son menores e incluso puede haber un incremento en algunas configuraciones. Esto podría indicar que el golpeteo afecta principalmente los niveles inferiores, donde disipa una mayor cantidad de energía.

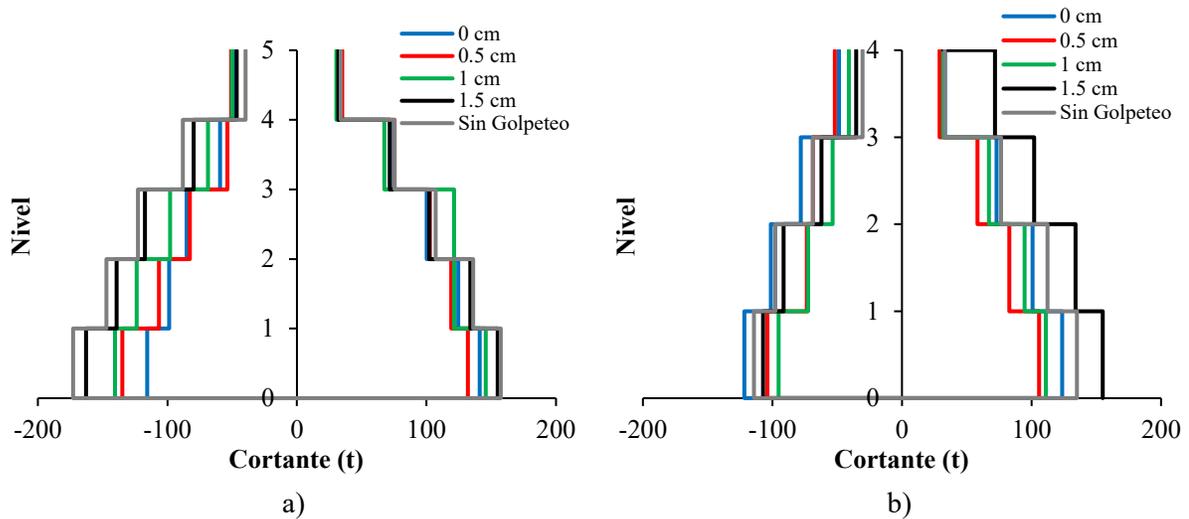


Figura 4.4 Cortantes máximos por edificio. a) Edificio 1; b) edificio 2.

4.1.2 Edificios con cuatro pisos de diferencia

Para el caso de dos edificios con una diferencia de alturas de cuatro niveles se optó por aplicar las mismas condiciones de análisis que en el caso anterior, con el fin de que puedan compararse los resultados de ambos escenarios. Esto incluye el análisis con las distintas separaciones entre los edificios y propiedades estructurales similares, ajustadas únicamente en cuanto al número de niveles.

La representación del modelo estructural en el software ETABS se presenta en la Figura 4.5, donde se puede apreciar la diferencia significativa de alturas entre las estructuras colindantes.

Este tipo de configuración es particularmente relevante ya que, como se observó en el análisis estadístico previo, las diferencias grandes en el número de niveles suelen estar asociadas a un mayor nivel de daño.

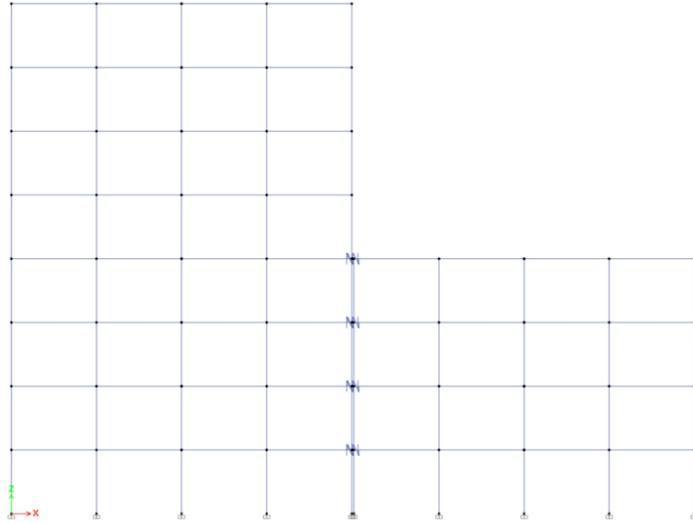


Figura 4.5 Modelo con diferencia de 4 niveles

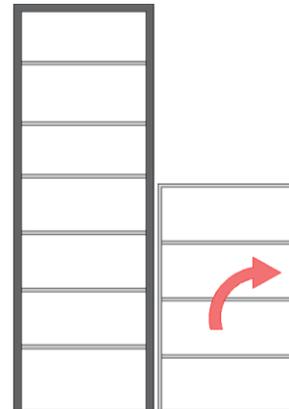
Al igual que en el caso de un solo nivel de diferencia, se tomaron algunos ejemplos fotográficos de eventos reales del visualizador de daños del SÍSE (SÍSE, 2025), donde se presentaron daños estructurales asociados al golpeteo entre edificios con una diferencia de cuatro niveles. Dichos casos se muestran en la Figura 4.6 y sirven como respaldo para validar la elección de esta configuración como un caso de estudio representativo y relevante dentro del contexto urbano de la Ciudad de México.

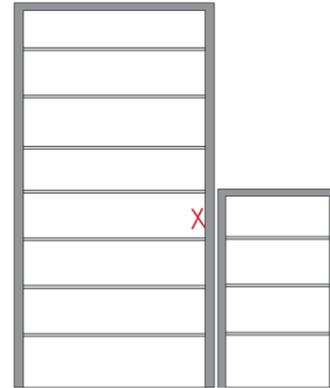
En la Figura 4.6a se presenta el caso de *Ámsterdam 25*, donde a la izquierda se encuentra un edificio de ocho niveles, estructurado con losas planas, el cual sufrió daños graves. A la derecha se observa un edificio de cuatro niveles, construido con mampostería no confinada, que presentó daño total.

Por su parte, la Figura 4.6b corresponde al caso de *Monterrey 150* donde se tiene la misma configuración de edificios, a la izquierda uno de ocho niveles contra uno de cuatro niveles a la derecha, el más alto estructurado a base de marcos de concreto con muros de mampostería y el más pequeño con marcos de concreto, ambas estructuras solamente presentaron daños menores.



a) *Ámsterdam 25*





b) Monterrey 150

Figura 4.6 Casos reales con diferencia de cuatro niveles (SÍSÉ, 2025).

Los desplazamientos máximos obtenidos para esta configuración se presentan en la Figura 4.7. En este caso, la diferencia entre las condiciones con y sin golpeteo sísmico es más notoria en comparación con el modelo anterior. Se observa que el desplazamiento del edificio más alto se ve significativamente reducido debido a la presencia de los impactos, pasando de un valor máximo de 7 cm a alrededor de 5 cm. Esta reducción sugiere que el contacto con el edificio colindante interrumpe el movimiento libre del edificio más alto, actuando como una restricción temporal durante el sismo.

Por otro lado, el comportamiento del edificio más bajo muestra un patrón diferente. En presencia de golpeteo, sus desplazamientos tienden a incrementarse respecto al caso sin interacción. Este aumento puede atribuirse al empuje inducido por el edificio más alto al momento del impacto, el cual transfiere parte de su energía a la estructura de menor altura, generando mayores desplazamientos en esta.

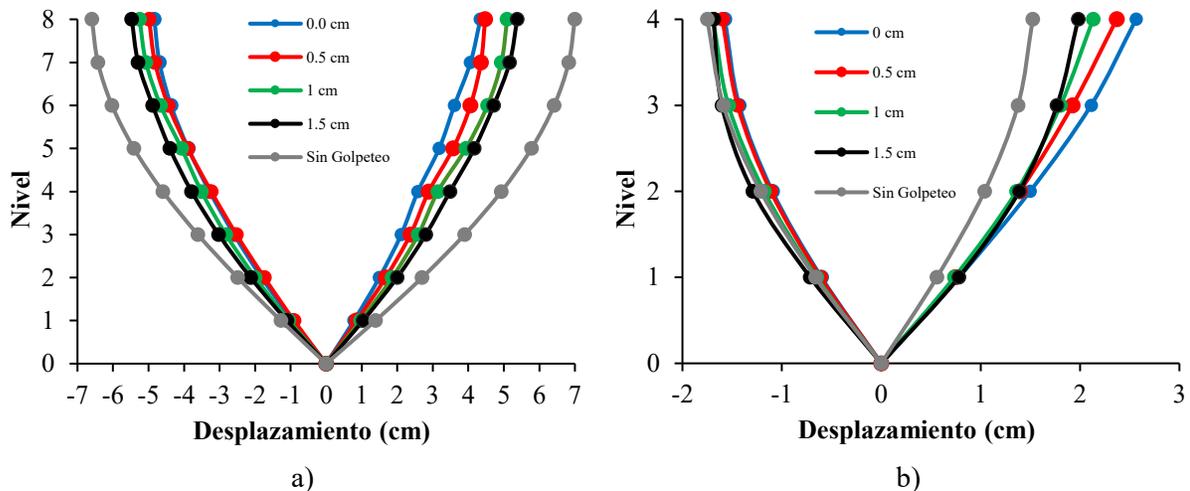


Figura 4.7 Desplazamientos máximos por nivel. a) Edificio 1; b) edificio 2.

En cuanto a las fuerzas cortantes máximas (Figura 4.8), se observa que el edificio más alto experimenta esfuerzos significativamente mayores cuando no hay golpeteo, particularmente en los niveles inferiores. Esto sugiere que, sin la interrupción del movimiento mediante impactos, las demandas internas por corte aumentan, posiblemente debido a un mayor desplazamiento relativo acumulado.

En contraste, para el edificio de menor altura, la situación es opuesta. La presencia de golpeteo incrementa notablemente las fuerzas cortantes, especialmente en el lado donde ocurren los impactos. Este aumento puede deberse a que los golpes transmiten energía de forma directa a través de los puntos de contacto, provocando concentraciones de esfuerzo en los elementos estructurales del edificio más bajo.

Este comportamiento pone de manifiesto cómo una diferencia considerable en el número de niveles entre edificaciones puede modificar de manera sustancial tanto la demanda de desplazamientos como de esfuerzos internos, afectando a cada estructura de forma distinta según su altura y posición relativa frente al impacto.

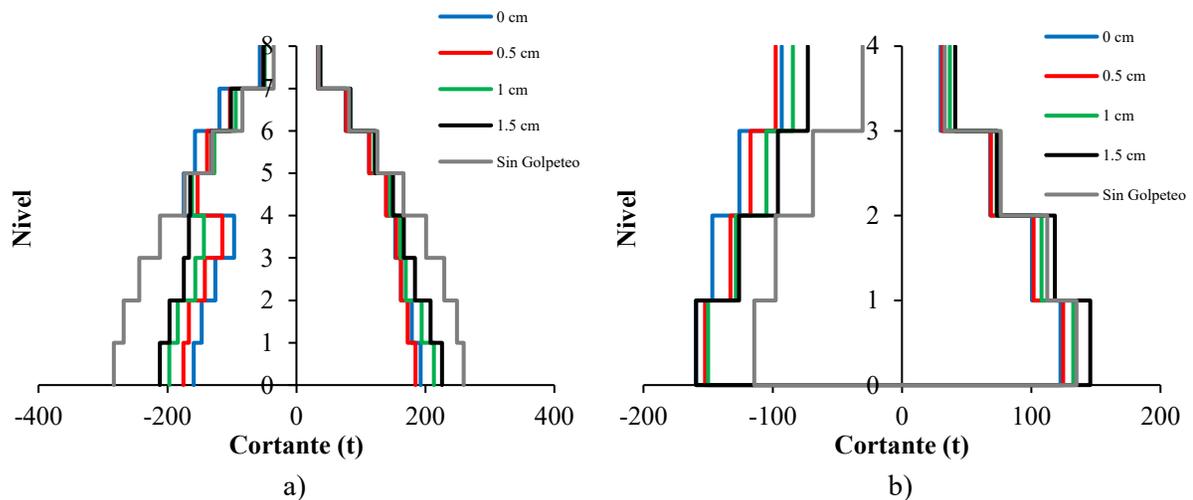


Figura 4.8 Cortantes máximos de entrepiso. a) Edificio 1; b) edificio 2.

Los resultados obtenidos servirán como base para analizar cómo la diferencia de niveles influye en el índice de daño por golpeteo de las estructuras involucradas. Este análisis permitirá cuantificar de forma más precisa el impacto de la interacción sísmica bajo las configuraciones de altura y separación.

4.2 Diferencia de rigideces

Como se explicó en el Capítulo dos, la diferencia de rigidez entre estructuras adyacentes es otro de los parámetros que puede influir significativamente en los efectos del golpeteo sísmico. Por ese motivo, en este apartado se analizó la variación de rigidez estructural como un factor adicional, evaluando su impacto en los desplazamientos y fuerzas internas generadas durante el golpeteo sísmico, así como su influencia en el índice de daño.

El análisis se llevó a cabo considerando nuevamente el caso con mayor diferencia de niveles (ocho niveles contra cuatro niveles), ya que este resultó ser el más desfavorable en términos de daño estructural en las secciones anteriores. A partir de este modelo se definieron tres escenarios hipotéticos en los que se modificó únicamente la rigidez del edificio con un menor número de niveles, con el objetivo de evaluar la magnitud del golpeteo para distintas relaciones de rigidez.

La rigidez del edificio de cuatro niveles fue incrementada en 25%, 50% y 75% con respecto a la rigidez base del edificio alto, cabe mencionar que en la configuración inicial de la calibración, la rigidez de este

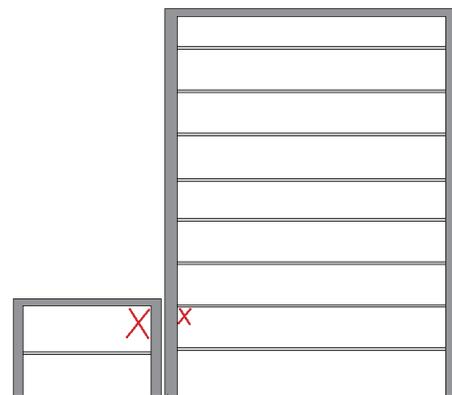
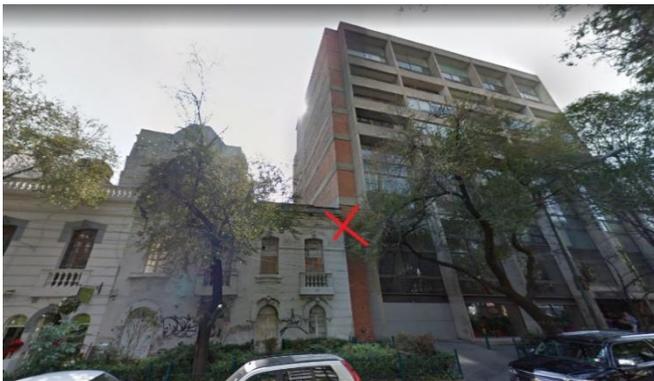
edificio es mayor al 100% respecto al edificio de ocho niveles por lo que con esta variación se está flexibilizando la estructura.

Esta modificación se implementó ajustando solamente el módulo de elasticidad del concreto, de esta forma manteniendo las mismas condiciones. Además, se utilizó la misma variación de separación entre edificios que en el análisis de diferencia de niveles (0.0 cm, 0.5 cm, 1.0 cm y 1.5 cm).

Tal como se hizo en el apartado anterior, se consultó el visualizador de sí-sé (SÍSÉ, 2025) para identificar algunos ejemplos que ayuden a justificar la variación de rigidez realizada en esta sección. Uno de estos casos corresponde a Durango 286, mostrado en la Figura 4.9a. En este ejemplo se observa un edificio de dos niveles con un sistema estructural de muros de mampostería no confinada, adyacente a uno de nueve niveles con estructura de marcos de concreto. El edificio pequeño sufrió daños intermedios, mientras que el edificio alto presentó solo daños menores. De acuerdo con la categorización de rigidez presentada en el Capítulo 2, este caso correspondería a una interacción entre una estructura rígida contra una semirrígida y por la altura de las estructuras podría equivaler a una variación del 75% de rigidez.

Otro ejemplo relevante es el de Jalapa 195 mostrado en la Figura 4.9b. Aquí se tiene un edificio de dos niveles con un sistema estructural a base de mampostería (rígido), frente un edificio de seis niveles fabricado con marcos de concreto (semirrígido) equivalente a una variación de rigidez del 50%. En este caso el edificio pequeño registró daños menores y el edificio alto no presentó daños.

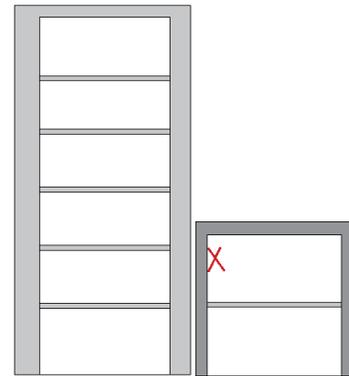
Por último, un ejemplo que puede representar la variación de rigidez del 25% es el de Álvaro Obregón 286 (Figura 4.9c), aquí se muestran dos edificios con un sistema estructural a base de losas planas catalogado como flexible. El edificio a la izquierda cuenta con 5 niveles y tubo daños graves, por otro lado, el edificio a la derecha es de 7 niveles de altura y presentó daño total



a) Durango 286



b) Jalapa 195



c) Álvaro Obregón 286

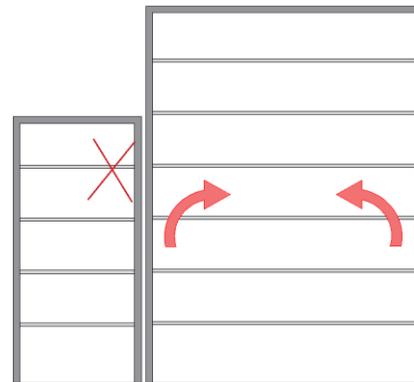


Figura 4.9 Casos reales con diferencia de rigidez (SÍSÉ, 2025).

En la Figura 4.10 se muestran los desplazamientos máximos obtenidos para la variación de rigidez y en la Figura 4.11 se presentan las gráficas correspondientes a las fuerzas cortantes máximas. Los resultados indican que a medida que el edificio pequeño se vuelve más flexible, los desplazamientos máximos tienden a incrementarse en ambos edificios.

En contraste, las fuerzas cortantes máximas tienden a disminuir cuando el edificio pequeño es más flexible y aumentan conforme su rigidez se incrementa. Este comportamiento sugiere que en condiciones de mayor flexibilidad una mayor proporción de la energía sísmica se disipa a través de dicho desplazamiento.

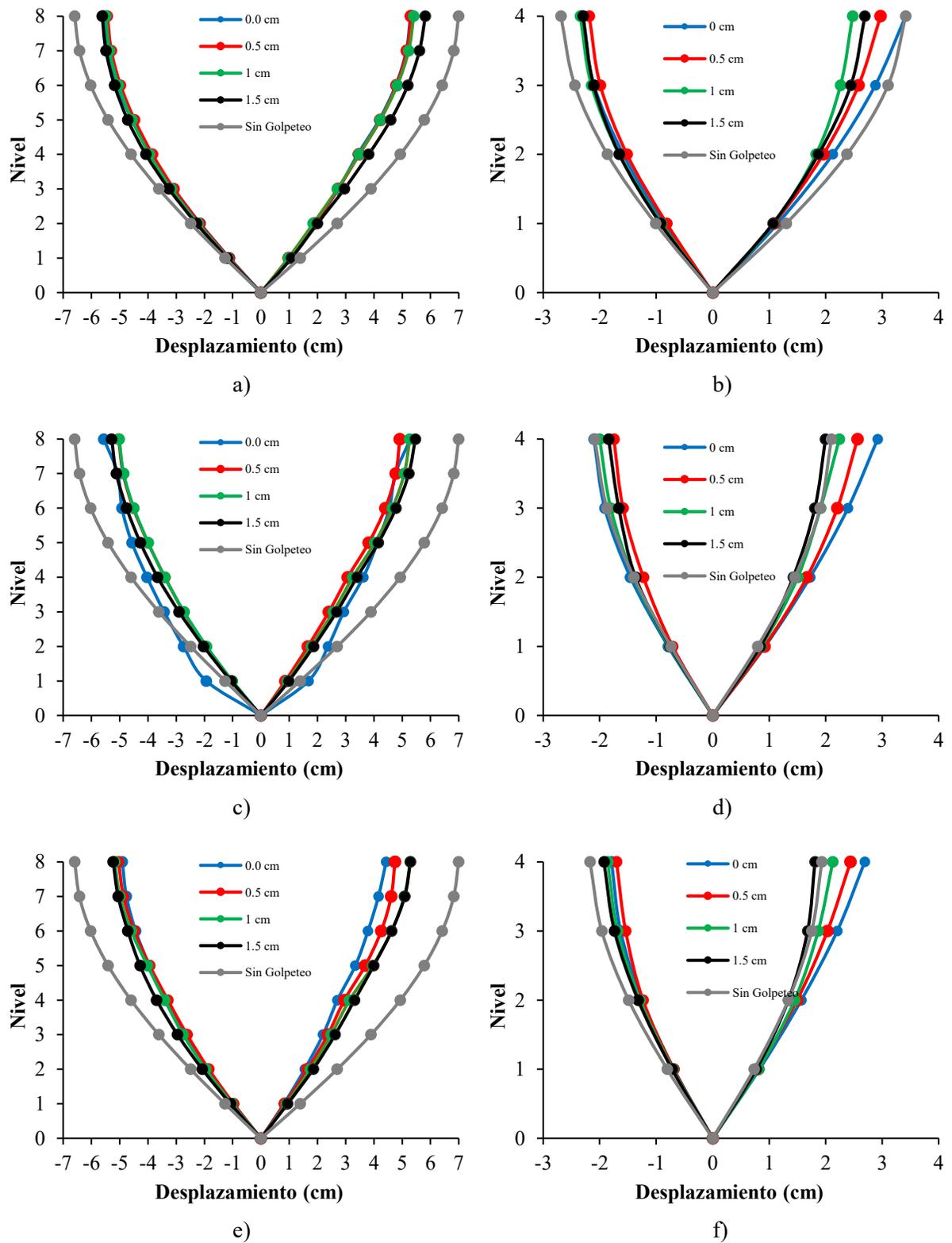


Figura 4.10 Desplazamientos máximos por rigidez. a) Edificio 1 25%; b) edificio 2 25%; c) Edificio 1 50%; d) Edificio 2 50%; e) Edificio 1 75%; f) Edificio 2 75%.

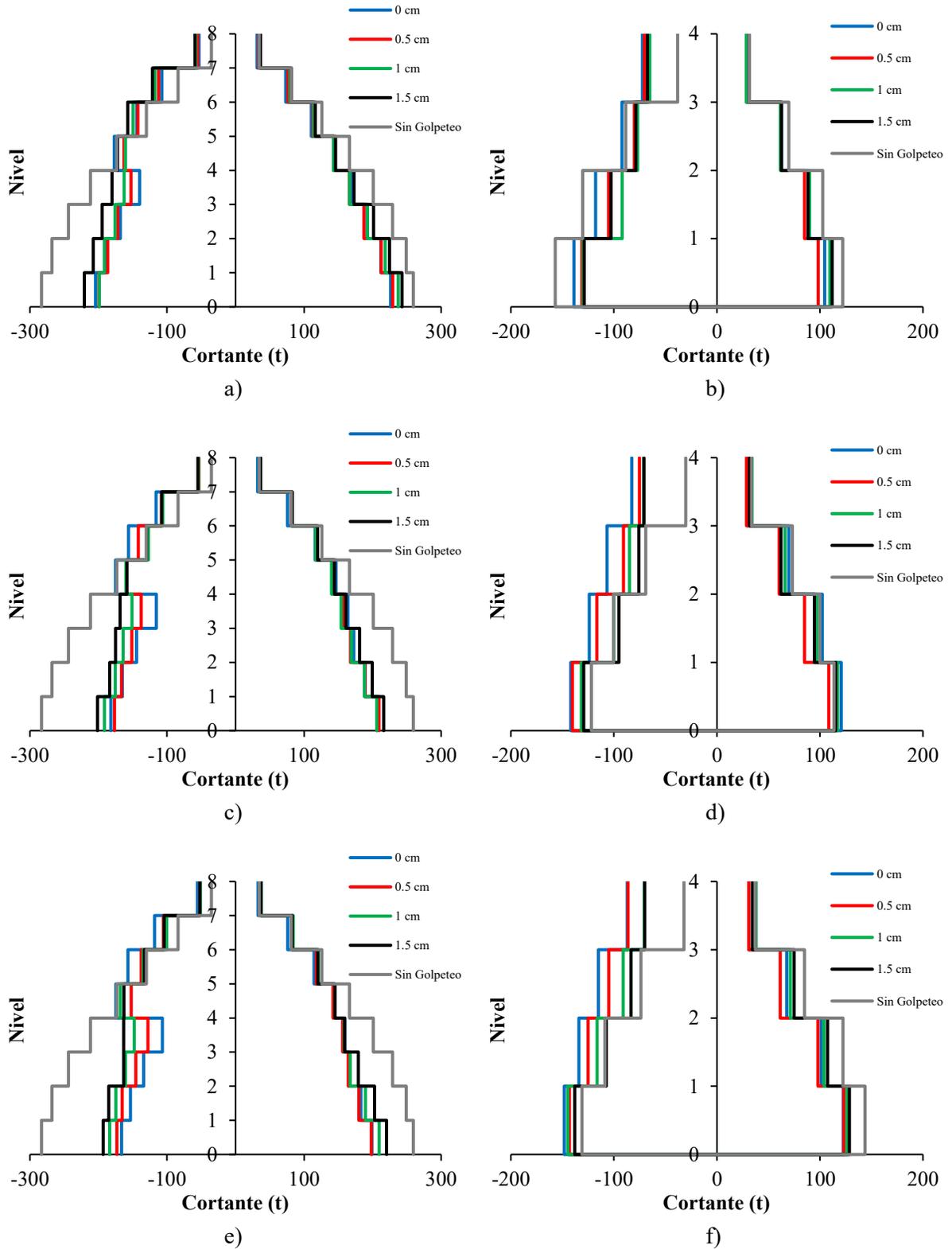


Figura 4.11 Cortantes máximos por diferencia de rigidez. a) Edificio 1 25%; b) edificio 2 25%; c) Edificio 1 50%; d) Edificio 2 50%; e) Edificio 1 75%; f) Edificio 2 75%.

4.3 Índice de daño

4.3.1 Fundamentos y metodología para calcular el índice de daño

Con el objetivo de tener una medida cuantitativa del nivel de daño ocasionado por el golpeteo sísmico, Jeng y Tzeng (2000) proponen un criterio para estimar un índice de daño (ID) en función de tres parámetros principales: el tipo de golpeteo, la presencia de este y un factor de amplificación del cortante en la estructura afectada con respecto al mismo caso sin la interacción. Este índice de daño se calcula mediante la Ecuación (4.1).

$$DI = S * Gap * V \quad (4.1)$$

Donde

<i>DI</i>	Índice de daño
<i>S</i>	Factor que representa el tipo de golpeteo
<i>Gap</i>	Factor que indica la presencia del golpeteo
<i>V</i>	Factor de amplificación de cortante

El factor correspondiente al tipo de golpeteo se clasifica según lo expuesto en el Capítulo 1 (Figura 1.3), y se detalla en la Tabla 4.1. Para todos los casos analizados en este estudio se utilizó un valor de $S = 1.0$, correspondiente al tipo de golpeteo piso-piso, es decir, donde los diafragmas de ambos edificios coinciden en altura al momento del impacto.

Tabla 4.1 Valores de S de acuerdo con su tipo de daño. (Jeng y Tzeng, 2020).

S	Descripción
1.5	Golpeteo a mitad de la columna, ya que es más peligroso que el golpeteo piso-piso.
1.3	Golpeteo en edificios de cabecera, se considera más peligroso que el golpeteo entre edificios de diferente peso.
1.3	Cuando un edificio es colindante con un edificio más grande y uno más bajo a cada uno de sus lados (es más vulnerable ya que recibe daño por ambos lados).
1.0	Todos los demás casos.

En cuanto al factor de presencia del fenómeno, se utiliza el parámetro *Gap*, el cual toma el valor de $Gap = 1$ si hay presencia de golpeteo y $Gap = 0$ si no lo hay. Dado que todos los escenarios modelados en esta investigación consideran la presencia de golpeteo, se emplea $Gap = 1$.

Por su parte, el factor de amplificación de cortante (*V*) se determina como el cociente del cortante máximo registrado en presencia de golpeteo y el cortante correspondiente en ausencia de éste, evaluado en el mismo punto. Este cálculo se muestra en la Ecuación (4.2) y se selecciona el valor más alto obtenido en toda la estructura, ya que representa el efecto más crítico del impacto.

$$V = \frac{V_{Punto}}{V_{PuntoSG}} \quad (4.2)$$

Los niveles de daño por golpeteo sísmico se clasifican conforme los rangos establecidos en la Tabla 4.2, en los cuales se pueden identificar desde daños menores hasta el colapso de la estructura, dependiendo del valor alcanzado por el índice de daño (ID).

Tabla 4.2 Clasificación del índice de daño (Jeng y Tzeng, 2020).

Nivel de daño	Índice de daño (ID)
Colapso	2.4
Daño grave	$2.4 > DI \geq 1.9$
Daño medio	$1.9 > DI \geq 1.5$
Daño menor	$1.5 > DI \geq 1.0$
Sin daño	$DI = 0$

4.3.2 Aplicación del índice de daño a los casos analizados

Los resultados obtenidos para la diferencia de niveles se presentan en las Tablas Tabla 4.3 y Tabla 4.4, en las que se resumen los índices de daño calculados y sus correspondientes niveles para los dos casos principales: edificios con una diferencia de un nivel y edificios con cuatro niveles de diferencia considerando las distintas separaciones consideradas.

Tabla 4.3 Índice y nivel de daño para 1 nivel de diferencia.

	Separación (cm)	Índice de daño (ID)	Nivel de daño
Edificio 1	0.0	1.22	Daño menor
	0.5	1.28	Daño menor
	1.0	1.26	Daño menor
	1.5	1.17	Daño menor
Edificio 2	0.0	1.59	Daño medio
	0.5	1.69	Daño medio
	1.0	1.35	Daño menor
	1.5	1.16	Daño menor

Tabla 4.4 Índice y nivel de daño para 4 niveles de diferencia

	Separación (cm)	Índice de daño (ID)	Nivel de daño
Edificio 1	0.0	1.61	Medio
	0.5	1.46	Menor
	1.0	1.40	Menor
	1.5	1.44	Menor
Edificio 2	0.0	3.05	Colapso
	0.5	3.20	Colapso
	1.0	2.76	Colapso
	1.5	2.38	Severo

Para el caso de una diferencia de un nivel, se observa que el edificio más alto únicamente experimenta daños menores en todas las separaciones analizadas. En contraste, el edificio más bajo presenta un nivel de daño medio cuando la separación es reducida, siendo una separación de 0.5 cm la más desfavorable

para este caso en ambos edificios, lo cual indica que incluso una pequeña diferencia de alturas puede generar impactos relevantes si la separación no es suficiente.

En el escenario con cuatro niveles de diferencia, el índice de daño se incrementa de manera significativa, sobre todo en el edificio más bajo. Con una separación de 1.5 cm, el daño alcanza el nivel de severo, y con separaciones menores (0.0 cm, 0.5 cm y 1.0 cm), se registra colapso estructural, evidenciando la peligrosidad de este tipo de configuración sin una separación adecuada.

En la Figura 4.12 se muestra gráficamente la variación del índice de daño respecto a la separación entre ambos edificios donde claramente se ve que el edificio más afectado fue el de menor altura, lo cual sugiere que este tipo de estructuras son más vulnerables a los efectos del golpeteo. Esta tendencia también se refleja en los 17 casos revisados, en los que se identificó que en 7 de ellos, el edificio de menor altura fue el que presentó mayores niveles de daño.

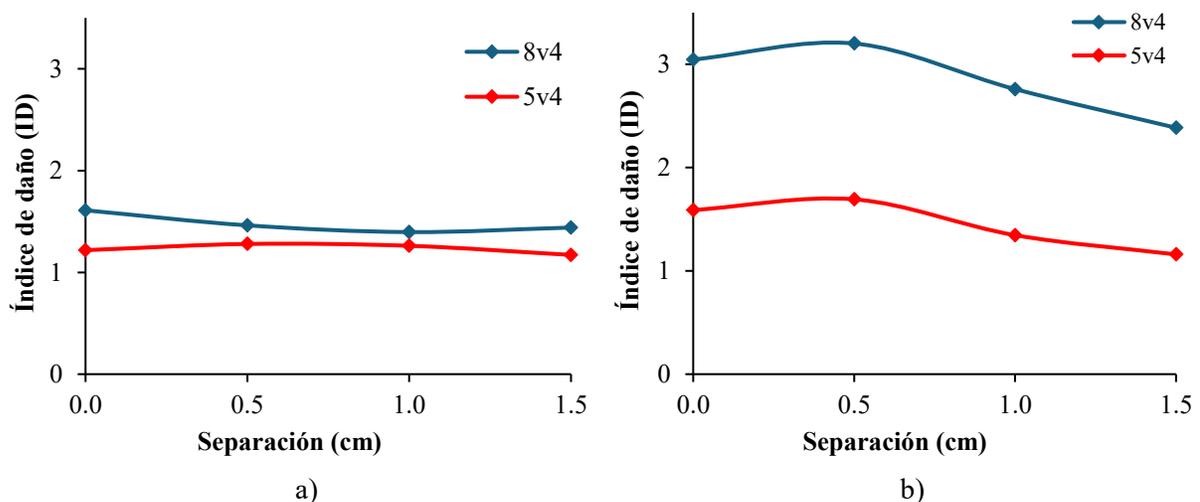


Figura 4.12 Variación del índice de daño para distintas separaciones entre edificios con diferencia de alturas. a) Edificio 1; b) edificio 2.

Estos resultados confirman que la diferencia de niveles entre los edificios adyacentes tiene una influencia directa y significativa sobre el nivel de daño por golpeteo sísmico. A mayor diferencia de alturas, mayor es la probabilidad de que se comprometa gravemente la estabilidad de una de las estructuras, especialmente si es más baja y está sometida a impactos repetidos.

Para la variación de rigidez, los índices de daño se presentan en la Tabla 4.5 donde se puede observar con claridad que conforme incrementa la rigidez del edificio pequeño también aumenta su nivel de daño. Este comportamiento sugiere que una mayor rigidez puede intensificar los daños en lugar de mitigar los efectos del golpeteo.

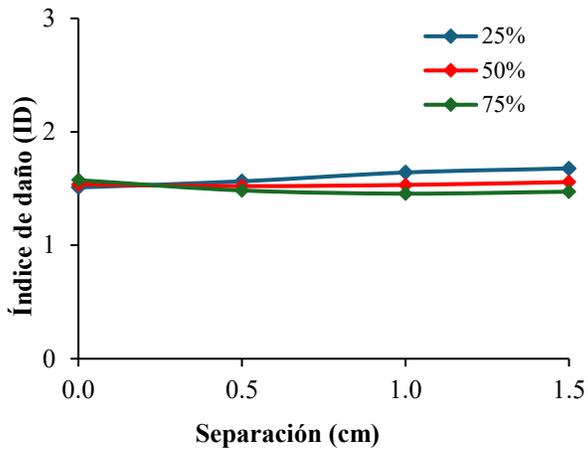
Por el contrario, el edificio más alto mantiene un nivel de daño medio y en algunos casos conforme incrementa la rigidez de su edificio adyacente el nivel de daño disminuye, esto puede deberse a que al tener al lado a una estructura más rígida absorbe la mayor parte de la energía, reduciendo el efecto sobre el edificio más grande.

Tabla 4.5 Índice y nivel de daño para la diferencia de rigidez.

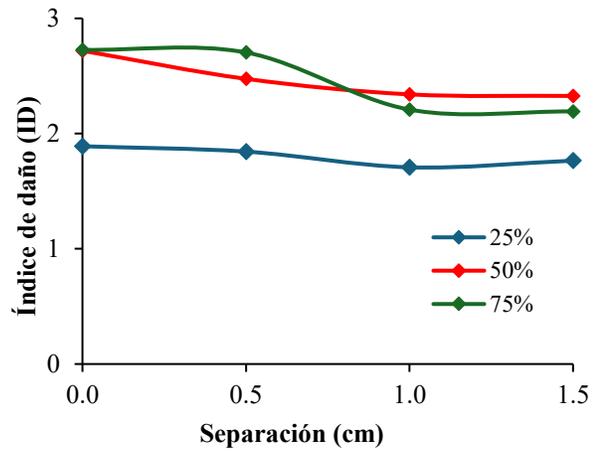
Variación de rigidez		Separación (cm)	Índice de daño	Nivel de daño
25%	Edificio 1	0.0	1.51	Medio
		0.5	1.56	Medio
		1.0	1.64	Medio
		1.5	1.68	Medio
	Edificio 2	0.0	1.89	Medio
		0.5	1.84	Medio
		1.0	1.71	Medio
		1.5	1.77	Medio
50%	Edificio 1	0.0	1.54	Medio
		0.5	1.52	Medio
		1.0	1.53	Medio
		1.5	1.56	Medio
	Edificio 2	0.0	2.72	Colapso
		0.5	2.48	Colapso
		1.0	2.34	Severo
		1.5	2.33	Severo
75%	Edificio 1	0.0	1.57	Medio
		0.5	1.48	Menor
		1.0	1.46	Menor
		1.5	1.47	Menor
	Edificio 2	0.0	2.73	Colapso
		0.5	2.70	Colapso
		1.0	2.21	Severo
		1.5	2.19	Severo

En la Figura 4.13 se muestra la variación del índice de daño respecto a la separación para este caso, en la Figura 4.13a se observa dicha variación para el edificio 1 y en la Figura 4.13b para el edificio 2. La separación ideal en estos casos es 1 cm, esto se nota principalmente cuando la rigidez es del 75%, ya que el índice de daño se reduce considerablemente.

Algo particularmente interesante ocurre cuando el edificio pequeño es 25% más rígido que el edificio alto. En este escenario el edificio más alto presenta un índice de daño menor conforme la separación entre las estructuras tiende a cero, es decir, la ausencia de separación resulta menos perjudicial que una separación insuficiente.



c)



d)

Figura 4.13 Variación del índice de daño para distintas separaciones entre edificios con diferencia de rigidez. a) Edificio 1; b) edificio 2.

5. Conclusiones

El presente trabajo permitió analizar los efectos del golpeteo sísmico entre dos estructuras adyacentes considerando principalmente los parámetros de diferencia de niveles, rigidez estructural y separación entre edificios. Esto se realizó con base a las configuraciones vistas en la Ciudad de México, utilizando herramientas de modelación estructural (ETABS) y el índice de daño cuantitativo propuesto por Jeng y Tzeng (2000). Los modelos estructurales desarrollados representaron una herramienta fundamental para el análisis detallado de este fenómeno.

Los resultados obtenidos para la diferencia de alturas confirman que, a mayor diferencia de niveles entre los edificios involucrados, mayor es el nivel de daño estructural, esto particularmente en el edificio que tenga la menor altura. Esta tendencia fue evidente tanto en los modelos realizados como en los casos documentados para el sismo del 19 de septiembre del 2017 donde este parámetro representó del 38% al 90% del nivel de daño en los edificios más afectados (Díaz *et al.*, 2024).

De igual manera se encontró que la rigidez estructural es un factor que tiene efectos significativos, ya que al incrementar la rigidez del edificio pequeño su nivel de daño también aumenta considerablemente, lo que puede ser la diferencia entre la permanencia de la estructura o su colapso. Sin embargo, para este parámetro se identificó una posible inconsistencia en el índice de daño, ya que al flexibilizar una estructura se esperaría que el daño fuese mayor, esto sucede porque el índice de daño está en función de la amplificación del cortante y no se consideran los efectos inelásticos, al flexibilizar la estructura, esta recibe menos cortante y, por lo tanto, el nivel de daño disminuye.

En cuanto a la separación entre los edificios se observó que las configuraciones con separación insuficiente tienden a generar mayores daños que aquellas con una mayor separación, esto especialmente cuando es menor a 1.0 cm. En ciertos casos, la ausencia total de separación mostró una respuesta menos desfavorable, lo cual sugiere que una separación mal dimensionada puede ser más perjudicial que su ausencia total, desafiando la idea común de que cualquier separación es mejor que ninguna.

El índice de daño propuesto por Jeng y Tzeng (2000) permitió cuantificar los niveles de daño por golpeteo y comparar de forma objetiva los efectos en cada variable analizada. Este índice resultó ser útil para establecer umbrales de daño y clasificar la severidad de los efectos del impacto entre las estructuras. Sin embargo, puede tener inconsistencias como se mencionó anteriormente, subestimando los daños por los efectos de desplazamiento.

En conjunto, los hallazgos de esta investigación aportan evidencia relevante sobre la necesidad de incorporar un análisis de golpeteo sísmico dentro de los criterios de diseño y evaluación de vulnerabilidad sísmica. Es importante destacar que desarrollar este tipo de modelos en software comercial como ETABS facilita su reproducción y aplicación por parte de otros investigadores, estudiantes y profesionales, ampliando las posibilidades de análisis y fomentando el desarrollo de criterios de diseño.

A partir de los resultados obtenidos en este trabajo, se proponen algunas recomendaciones

- Incluir el análisis de golpeteo sísmico desde las etapas tempranas de diseño estructural, especialmente en zonas urbanas tan densas y con construcciones existentes de diferente altura y rigidez como la Ciudad de México
- Considerar que el índice de daño propuesto por Jeng y Tzeng (2000), aunque es útil para evaluar el impacto del golpeteo no contempla todos los modos de falla estructural. Se recomienda usarlo con precaución y de ser posible complementarlo con otros indicadores.

- Desarrollar un índice de daño adaptado al contexto de la Ciudad de México, que incorpore variables como los desplazamientos y el sistema estructural.
- Profundizar la investigación del efecto combinado de otros parámetros no abordados en este estudio, como la asimetría de esquina o la antigüedad de las estructuras además de otras variables como la interacción suelo-estructura, la rotación de la cimentación, las inclinaciones iniciales o la torsión, con el fin de comprender mejor su influencia en el daño por golpeteo sísmico.
- Considerar para edificaciones existentes con riesgo de golpeteo, la aplicación de medidas de mitigación estructural que contribuyan a reducir el daño potencial. Aunque el presente trabajo no abordó de manera directa estas estrategias, se reconoce la importancia de considerarlas en futuras investigaciones y en la práctica profesional. De acuerdo con Díaz (2023), algunas de estas medidas incluyen el incremento de separación entre estructuras, el aumento de la rigidez estructural, la instalación de dispositivos de amortiguamiento suplementarios, la conexión de estructuras a través de elementos rígidos o viscoelásticos, así como el uso de bandas de goma para absorber la energía en los impactos.

Referencias

- Ahued, A. (2018). Terremoto en México: la respuesta en salud del gobierno de la Ciudad de México. *Salud Pública de México*, 60(Supl. 1), 83–89. <https://doi.org/10.21149/9327>
- Computers and Structures, Inc. (2018). *ETABS 18: Integrated building design software* (Versión 18.0.0) [Software]. <https://www.csiamerica.com>
- Díaz, A. (2023). *Uso de bandas de goma como medida de mitigación del daño por golpeteo sísmico en la Ciudad de México* [Tesis de licenciatura, UNAM]. <http://132.248.9.195/ptd2023/agosto/0843714/Index.html>
- Díaz, A., Cazarín, E., y Reinoso, E. (2024). Metodología para identificar la vulnerabilidad por golpeteo sísmico en edificios de la Ciudad de México. *XXIV Congreso Nacional de Ingeniería Estructural*. <https://www.researchgate.net/publication/386107094>
- Fundación ICA. (1988). *Experiencias derivadas de los sismos de septiembre de 1985*. Noriega Editores.
- Gobierno de la Ciudad de México. (2023). *Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo*. Gaceta Oficial de la Ciudad de México. <https://www.isc.cdmx.gob.mx/dependencia/marco-normativo>
- Jeng, V., y Tzeng, W. (2000). Assessment of seismic pounding hazard for Taipei City. *Engineering Structures*, 22(5), 459–471. [https://doi.org/10.1016/S0141-0296\(98\)00123-0](https://doi.org/10.1016/S0141-0296(98)00123-0)
- Manoukas, G., y Karayannis, C. (2024). Asymmetric seismic pounding between multistorey reinforced concrete structures in a city block. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 177, 108415. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2023.108415>
- Márquez, O. (2022). *Estudio del fenómeno de golpeteo en edificaciones afectadas en la colonia Roma de la Ciudad de México por el sismo 19S-2017* [Tesis de licenciatura, UNAM]. <http://132.248.9.195/ptd2022/junio/0825987/Index.html>
- Miari, M., Choong, K., y Jankowski, R. (2019). Seismic pounding between adjacent buildings: Identification of parameters, soil interaction issues and mitigation measures. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 121, 135–150. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2019.02.024>

- Miranda, F., y Ramos, L. (2021). Cronología y daños: las diferencias en los sismos de 1985 y 2017. <https://www.milenio.com/politica/comunidad/sismos-1985-2017-cronologia-estadisticas-infografia>
- Meli, R., Miranda, E., López, C., y López, O. (2019). *Evaluación de los efectos de los sismos de septiembre de 1985 en los edificios de la CDMX*. Instituto de Ingeniería, UNAM.
- ONU-Habitat. (2018). Superficie de CDMX crece a ritmo tres veces superior al de su población. <https://onu-habitat.org/index.php/superficie-de-cdmx-crece-a-ritmo-tres-veces-superior-al-de-su-poblacion>
- Polycarpou, C., Komodromos, P., y Polycarpou, C. (2013). A nonlinear impact model for simulating the use of rubber shock absorbers for mitigating the effects of structural pounding during earthquakes. *Earthquake Engineering y Structural Dynamics*, 42(1), 81–100. <https://doi.org/10.1002/eqe.2194>
- Reinoso, E., Ventura, F., Buendía, L., Pérez, M., Martínez, J., Cabrera, M., Meléndez, B., Godínez, K., Pérez, X., y Mariscal, O. (2018). *Vulnerabilidad de edificaciones con base en la "Medición de la vulnerabilidad sísmica de los edificios en la CDMX y recomendaciones de mitigación"*. Instituto de Ingeniería, UNAM.
- Reinoso, E., Quinde, P., Martínez, J., Buendía, L., Gómez, D., Pérez, M., y Martínez, J. (2019). *Medición de la vulnerabilidad sísmica de los edificios en la CDMX y recomendaciones de mitigación. Etapa 2*. Instituto de Ingeniería, UNAM.
- Reinoso, E., Espinosa, E., Quinde, P., Gómez, D., Días, M., Ordaz, R., Arroyo, J., Villaseñor, M., y Márquez, O. (2022). *Medición de la vulnerabilidad sísmica de los edificios en la CDMX y recomendaciones de mitigación. Etapa 5*. Instituto de Ingeniería, UNAM.
- Reinoso, E., Espinosa, E., Gómez, D., Días, A., Ordaz, R., Arroyo, J., Catalán, V., Martínez, J., Fontes, I., López, J., y Ortiz, O. (2023). *Medición de la vulnerabilidad sísmica de los edificios en la CDMX y recomendaciones de mitigación. Etapa 6*. Instituto de Ingeniería, UNAM.

- Shakya, K., y Wijeyewickrema, C. (2016). Mid-column pounding of multi-story reinforced concrete buildings considering soil effects. *Advances in Structural Engineering*, 12(1), 71–85. <https://doi.org/10.1260/136943309787522687>
- SÍSÉ. (2017). *Visualizador de inmuebles con daños en México*. <https://visualizador.si-se.mx/>
- SSN. (2017). *Sismo del día 19 de septiembre de 2017, Puebla-Morelos (M 7.1)*. Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geofísica, Servicio Sismológico Nacional. http://www.ssn.unam.mx/sismicidad/reportes-especiales/2017/SSNMX_rep_esp_20170919_Puebla-Morelos_M71.pdf
- SSN. (2024). *Catálogo sísmico del Servicio Sismológico Nacional*. Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geofísica, Servicio Sismológico Nacional. <http://www2.ssn.unam.mx:8080/catalogo/>
- Zamora, E., Ramos, S., y Reinoso, E. (2022). Golpeteo piso-columna inducido por sismo en edificios de concreto reforzado considerando interacción suelo-estructura. *XXII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica*.