

03

Recibido: 15 de noviembre del 2024

Aceptado: 15 de diciembre del 2024

Publicado: 04 de enero del 2025

DOI: <https://doi.org/10.57175/evsos.v3i2.222>

Colapso sísmico basado en energía para edificios aporricados de concreto armado equipados con amortiguadores viscosos, Lima 2024

Seismic collapse based on energy for moment-resisting frame reinforced concrete buildings equipped with viscous dampers, Lima 2024

Vlacev Toledo Espinoza ¹

¹ Escuela Universitaria de Posgrado Universidad Nacional Federico Villarreal, Perú.

Correo institucional: vlacev@outlook.com

Resumen

El estudio analiza el comportamiento de edificios de concreto armado con pórticos resistentes a momentos y equipados con amortiguadores, utilizando la energía potencial para monitorear el inicio del colapso. Se emplearon curvas IDA para obtener el índice de margen de colapso (IMC) como indicador principal del desempeño sísmico, siguiendo el enfoque del FEMA P695. Se evaluaron edificios de 3, 6 y 9 pisos con distintos niveles de amortiguamiento suplementario (5%, 10%, 20%, 30% y 40%) y amortiguadores lineales y no lineales (1.0, 0.7, 0.5 y 0.3). El enfoque fue cuantitativo y cuasiexperimental. Los resultados mostraron que el IMC aumentó entre 1.08 y 2.46 veces en edificios con amortiguadores en comparación a los prototipos sin ellos. Además, un mayor amortiguamiento incrementó el IMC, aunque los amortiguadores no lineales no lograron el mismo efecto. Se identificó una correlación entre el IMC y los indicadores, permitiendo predecir el desempeño sísmico.

Palabras claves: energía sísmica disipada, amortiguadores viscosos, índice de margen al colapso, análisis dinámico incremental.

Abstract

The study analyzes the behavior of reinforced concrete buildings with moment-resisting frames equipped with dampers, using potential energy to numerically monitor the onset of collapse. IDA curves were employed to obtain the collapse margin ratio (CMR) as the primary indicator of seismic performance, following the FEMA P695 approach. Buildings with 3, 6, and 9 stories were evaluated, incorporating different levels of supplemental damping (5%, 10%, 20%, 30%, and 40%) and both linear and nonlinear dampers (1.0, 0.7, 0.5, and 0.3). The research followed a quantitative, quasi-experimental approach. Results showed that the CMR increased between 1.08 and 2.46 times in buildings with dampers compared to those without them. Additionally, higher damping increased the CMR, although nonlinear dampers did not achieve the same effect. A correlation between the CMR and the indicators was identified, allowing for the prediction of seismic performance.

Keywords: seismic energy dissipation, viscous dampers, collapse margin ratio, incremental dynamic analysis.

1. Introducción

El diseño sísmico de edificios de concreto armado con amortiguadores requiere una atención especial debido a la carencia de directrices claras en muchos códigos actuales. Los estándares de la American Society of Civil Engineers (2022, 2023) establecen una probabilidad condicional de colapso por un sismo máximo considerado (SMC), que varía según la categoría de riesgo del edificio.

Estas estructuras pueden experimentar incursiones inelásticas en eventos sísmicos, donde parte de la energía se disipa en la estructura principal y otra es absorbida por los amortiguadores. Sin embargo, los estándares actuales no especifican cómo manejar los valores máximos de los parámetros de diseño, lo que puede llevar a comportamientos frágiles (Scozzese et al., 2021).

Los terremotos son movimientos sísmicos causados por la liberación de energía que se dispersa como ondas en todas direcciones (Shearer, 2019), generando desplazamientos en el suelo y en los edificios (Fardis, 2018). Esta energía es un indicador escalar y global, dependiente de la masa y el periodo del sistema (Akiyama, 1986). Por ello, resulta lógico y coherente adoptar un enfoque que examine cómo los terremotos afectan a las estructuras desde una perspectiva energética. Este enfoque ha llevado al desarrollo de métodos centrados en el balance energético, también denominados metodología según el concepto de energía de Housner-Akiyama.

Donaire y Benavent (2020) destacan que los enfoques basados en el desempeño sísmico buscan diseñar estructuras que cumplan con diferentes niveles de prestaciones frente a diversas intensidades de movimientos sísmicos. Señalan la necesidad de un enfoque basado en energía para optimizar eficientemente el diseño de estructuras con protección sísmica. A pesar de los avances, se requiere más investigación sobre la entrada y absorción de energía y su relación con el desplazamiento inelástico máximo.

Benavent et al. (2021) resaltan la dificultad en determinar el potencial de disipación de energía en estructuras de concreto armado, dada su relación con la trayectoria de carga y la identificación de su máxima capacidad de disipación. También mencionan que las investigaciones sobre el uso de balance de energía en edificios de concreto armado con amortiguadores son limitadas. Comentan que Housner introdujo el enfoque en 1956 con una ecuación para medir la entrada de energía sísmica en estructuras, luego Akiyama lo expandió entre 1970 y 1980, planteando un método de diseño sísmico. Actualmente se emplea en aplicaciones de disipadores histeréticos, según normativas de Japón y Europa.

Zhou et al. (2022) realizan un estudio cuantitativo sobre la probabilidad de colapso en edificios de acero con sistemas resistentes a momentos y amortiguadores viscosos. Evalúan el daño a través de la energía histerética y generan curvas de fragilidad mediante el análisis dinámico incremental (IDA). El estudio analiza la distribución de la probabilidad de colapso en edificios de 3, 9 y 20 pisos, considerando diferentes niveles de amortiguamiento adicional (10%, 20% y 30%) y exponentes de velocidad (1.0, 0.5 y 0.3). Los resultados muestran que la inclusión de amortiguadores aumenta significativamente la capacidad de resistencia al colapso, incrementando un 43% y 100% en edificios de 3 y 9 pisos, respectivamente, mientras que la probabilidad de colapso disminuye con mayores niveles de amortiguamiento adicional. Además, los amortiguadores lineales son más eficaces en la prevención del colapso.

Toledo (2021) analiza edificios de concreto armado con amortiguadores viscosos, enfocándose en la distribución de la energía disipada por estos dispositivos en comparación con la energía liberada por la estructura principal. El estudio cuantitativo y correlacional se realiza en prototipos de tres, seis y nueve pisos, utilizando 19 registros sísmicos de campo cercano y 47 de campo lejano. Los cálculos, efectuados mediante análisis historia de respuesta en el programa Idarc, muestran que la energía histerética disipada por la estructura y los amortiguadores es similar, sin importar el exponente de velocidad o la fracción de amortiguamiento.

Los enfoques convencionales de diseño sísmico se enfocan en fuerzas y desplazamientos, considerando aspectos como distorsiones de piso, aceleraciones y rotaciones plásticas. El problema central radica en cómo el uso de estos dispositivos influye en dicho desempeño, por tanto, en este estudio se busca examinar la prestación sísmica de edificios de concreto armado equipados con amortiguadores, evaluando cómo varían sus respuestas ante sismos con diferentes niveles de relación de amortiguamiento suplementario (ξ_{v1} de 5%, 10%, 20%, 30% y 40%), utilizando tanto amortiguadores lineales como no lineales (con exponente de velocidad α igual a 1.0, 0.7, 0.5 y 0.3), mediante el análisis de pórticos representativos de 3, 6 y 9 pisos. Se emplean estudios IDA basados en la metodología de la Federal Emergency Management Agency (FEMA, 2009). Para ello, como aporte se propone el monitorear la energía potencial, el trabajo debido a los efectos P-Delta y la energía histerética de la estructura, como indicadores del colapso numérico. Se plantea la hipótesis de que se prevé que el desempeño puede ser evaluado coherentemente mediante procedimientos basados en energía. La justificación de la investigación se encuentra en la falta de metodologías que integren la energía en la demanda y capacidad para el diseño sísmico, especialmente considerando el creciente uso de amortiguadores viscosos y la ausencia de estándares específicos en la materia. Es fundamental entender la respuesta de estos edificios ante terremotos para establecer estándares de seguridad y nuevos métodos de diseño que consideren aspectos como la distribución de energía y la capacidad de disipación.

2. Desarrollo

2.1. Teoría

Según Hamidia et al. (2014), la fuerza generada por un amortiguador viscoso puede expresarse como el producto entre la constante de amortiguamiento, ya sea lineal o no lineal, y la velocidad relativa entre los extremos del dispositivo. Esta velocidad se eleva a un exponente que varía según el tipo de amortiguador: si es lineal, el

exponente es 1.0, y si es no lineal, el exponente es menor a 1.0. En sistemas con múltiples grados de libertad, para calcular la relación de amortiguamiento viscoso efectivo modal es necesario considerar factores como la amplitud de desplazamiento del techo bajo cargas armónicas, el periodo fundamental elástico no amortiguado, la forma del primer modo normalizada, así como la energía disipada por el sistema de amortiguamiento en cada ciclo. Estos parámetros permiten estimar el amortiguamiento viscoso de manera efectiva. Además, las constantes de amortiguamiento en cada piso, que dependen de la disposición geométrica de los amortiguadores y la masa en cada nivel, pueden obtenerse mediante un análisis que considera los desplazamientos relativos en el primer modo y la relación de rigidez entre pisos.

Taylor Devices Inc. (2020) señala que los amortiguadores viscosos, inicialmente usados en defensa y aplicaciones militares, han sido adoptados en estructuras comerciales, residenciales y puentes, sujetos a cargas sísmicas y de viento. Estos dispositivos han demostrado ser confiables y eficaces a lo largo de décadas, mejorando significativamente la resiliencia estructural. Aunque muchos códigos incluyen métodos para evaluar su respuesta, no proporcionan comparaciones directas sobre la mejora lograda en la resiliencia. Los amortiguadores reducen la amplitud de las oscilaciones, disipando energía mecánica como calor mediante conducción, convección y radiación. Funcionan únicamente a velocidades determinadas, sin contribuir a la rigidez ni soportar cargas estáticas.

Para calcular los desplazamientos, velocidades y aceleraciones, se utiliza la ecuación de equilibrio dinámico (Chopra, 2016). Estos parámetros están determinados por la aceleración del suelo excitando la masa del sistema, que representa la demanda, mientras que la capacidad está definida por la fuerza inercial (dependiente de la masa y la aceleración), la fuerza de amortiguamiento (proporcional al coeficiente de amortiguamiento y la velocidad) y la fuerza de deformación de un sistema elastoplástico (debido a la rigidez y el desplazamiento). Al integrar estas fuerzas, se pueden obtener diversas formas de energía: la energía

cinética (W_{ek}), asociada a la fuerza inercial; la energía de amortiguamiento (W_D), derivada de la fuerza de amortiguamiento, que incluye tanto el amortiguamiento inherente como el suplementario aportado por los amortiguadores; y la energía de deformación (W_s), que comprende la energía elástica recuperable (W_{es}) y la energía histerética estructural (W_p).

La suma de estas energías representa la capacidad del sistema. Para lograr un equilibrio, esta capacidad debe igualar la energía de entrada (E_I), generada por la aceleración del terreno sobre la masa. Al combinar la energía cinética y la energía elástica recuperable o de deformación, se obtiene la energía vibracional elástica (W_e). Así, la ecuación se convierte en la base de los métodos de balance energético, estableciendo que la energía vibracional elástica, la energía de amortiguamiento y la energía histerética estructural son equivalentes a la energía de entrada.

2.2. Metodología

El estudio se clasifica como cuantitativo y aplicado, con un propósito explicativo, dirigido a desarrollar una metodología de diseño sísmico basada en el balance energético. Se adopta un diseño de investigación cuasiexperimental para evaluar el desempeño sísmico de edificios de concreto armado con amortiguadores viscosos. El estudio se dividió en cuatro etapas metodológicas: dimensionamiento y diseño de prototipos, selección y escalado de movimientos del terreno, estudio IDA y análisis de datos. Se realizó bajo estrictos principios éticos, garantizando la honestidad, precisión, transparencia y atribución adecuada de fuentes en todas las etapas de la investigación.

Los cálculos desarrollados se centran en pórticos típicos de edificios de 3, 6 y 9 pisos, que fueron diseñados como pórticos ordinarios capaces de resistir cargas sísmicas equipados con amortiguadores, cumpliendo con las regulaciones establecidas por el American Concrete Institute (ACI, 2022), la ASCE (2022) y el Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento (MVCS, 2020a, 2020b, 2020c).

Para llevar a cabo el análisis no lineal se utilizó el enfoque de plasticidad concentrada, siguiendo las pautas establecidas por Haselton et al. (2016) y Lignos y Krawinkler (2011), lo que permitió obtener curvas momento-rotación y definir el comportamiento histerético, con ello se realizaron análisis historia de respuesta no lineal empleando el programa Opensees (2024). En cuanto al modelado de los amortiguadores, se aplicó el modelo de Maxwell. La evaluación del desempeño hasta el colapso implica obtener el IMC mediante curvas de un análisis IDA.

Como se puede apreciar en la Figura 1, se ha empleado una configuración típica en los prototipos, los cuales son representativos de este tipo de sistemas estructurales. La altura del primer piso es de 4.5 m, mientras que los niveles restantes tienen una altura de 3.5 m. Para el caso del refuerzo en la parte superior de las vigas, se ha considerado el acero y rigidez aportada por el ancho efectivo de la losa. Los períodos estructurales son de 0.935 segundos, 1.415 segundos y 1.717 segundos para los prototipos de 3, 6 y 9 pisos, con masas de 53.54, 108.36 y 166.88 Toneladas-segundos²/metro, respectivamente. Se emplearon un total de 63 prototipos: tres sin amortiguadores y 60 con diversos tipos y niveles de amortiguamiento, variando además el exponente de la velocidad que estos dispositivos soportan debido a la carga sísmica.

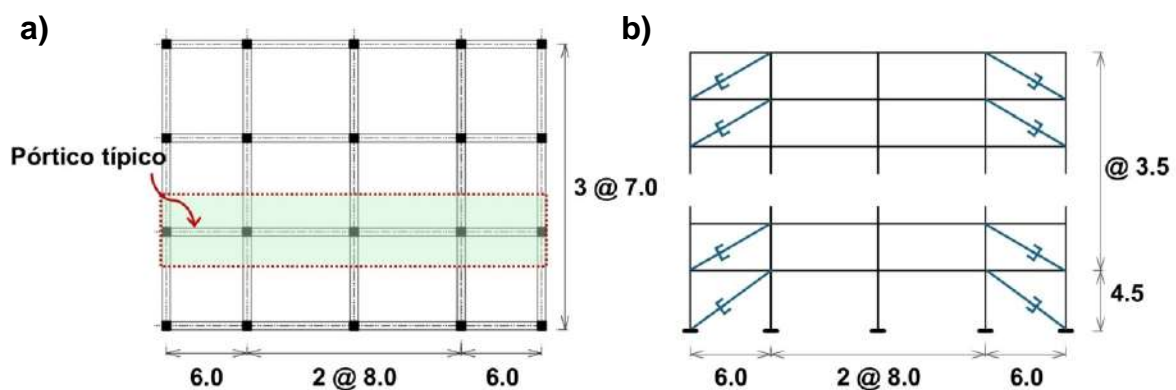


Figura 1. Modelo del prototipo típico con pórticos ordinarios resistentes a la carga sísmica: (a) vista en planta y (b) vista en elevación de los pórticos representativos utilizados

Se seleccionaron un conjunto de 30 pares movimientos de terreno con magnitudes superiores a 6.5, extraídos de la base de datos del Pacific Earthquake Engineering Research Center (PEER, 2014). Estos registros fueron normalizados conforme al FEMA (2009). Luego, se ajustaron a un nivel específico determinado por el espectro del evento SMC del ASCE (2022), S_{MT} , y el MVCS (2020b), asegurando que la intensidad de la aceleración máxima del sismo considerado sea uniforme en todos los registros para el estudio IDA posterior.

El análisis IDA, como describe el FEMA (2018), implica llevar a cabo numerosos análisis historia de respuesta no lineal, aumentando gradualmente la intensidad de los registros sísmicos hasta que ocurra el colapso numérico. En este enfoque, típicamente se monitorea la distorsión angular, estableciendo un límite específico, el cambio de pendiente entre puntos consecutivos o el aplanamiento de la curva IDA, lo cual puede subestimar la capacidad de la estructura. El aporte de este estudio se centra en el uso de la energía potencial como indicador del colapso considerando como inestabilidad dinámica cuando la energía potencial supera a la entrada de energía, por tanto, a continuación, se describirán las 3 consideraciones realizadas.

Una forma de monitorear la energía potencial consiste en considerar los efectos de segundo orden. Esta metodología fue planteada por Akiyama (2002), quien propuso que el trabajo adicional total generado por la fuerza cortante debido a los efectos P-Delta, $W_{P-Delta}$, acumulado en todos los pisos, se evalúa hasta alcanzar un desplazamiento en cada piso. Además, la altura de cada nivel también influye en el cálculo, lo que permite expresar este trabajo adicional en cada instante de tiempo.

La segunda manera de monitorear la energía potencial es mediante el uso de la rigidez equivalente de un sistema de un único grado de libertad, utilizando el primer modo de vibración. Este enfoque permite calcular la energía en cada instante de tiempo, $W_{POT-Modo1}$, sumando los valores correspondientes a todos los pisos. En este caso, la rigidez equivalente es constante y depende de la frecuencia del primer modo de vibración y de la masa modal efectiva asociada al modo fundamental.

La tercera forma propuesta para analizar el colapso consiste en utilizar una rigidez secante, que se determina calculando la rigidez en cada intervalo de tiempo, considerando la fuerza cortante y el desplazamiento relativo de cada piso. Así, la energía potencial en todos los pisos, $W_{POT-Sec}$, se evalúa con base en esta rigidez secante, lo que permite obtener una representación precisa del comportamiento estructural en función de los cambios que ocurren durante la respuesta sísmica.

En la Figura 2 se muestran las historias de energía del prototipo de 6 pisos con un amortiguamiento suplementario del 10% y un exponente de velocidad de 1, analizado con el terremoto de Duzce en Turquía, ocurrido en diciembre de 1999, que tuvo 42.33 segundos de duración y magnitud momento de 7.14. En la Figura 2a, el factor de escala de $3.8S_{MT}$ no genera inestabilidades dinámicas, ya que no es lo suficientemente elevado como para que las energías potenciales y las debidas a los efectos P-Delta se desborden, obteniendo resultados para toda la duración del evento. Sin embargo, en la Figura 2b se observa un crecimiento excesivo de las energías potenciales monitoreadas, indicando un punto de colapso numérico al superar la entrada de energía, con un factor de escala de $6.0S_{MT}$ (con un índice de colapso de 6.0), estos puntos se caracterizan por ser análisis historia de respuesta inconclusos. Por lo tanto, para el procesamiento posterior se utilizó el último punto IDA antes de la inestabilidad. El gráfico de la historia de energía con rigidez secante presenta múltiples picos que exceden la entrada de energía, se supone que la energía potencial en la fase de colapso debe ser creciente, representada como, $W_{POT-Sec-Creciente}$, y es la que se empleó para comprobar si supera la entrada de energía. Del mismo modo, se puede notar el uso de la energía cinética, W_{ek} , como lo han hecho otros autores (Meigooni y Mollaioli, 2021; Petrone et al., 2016; Szyniszewski y Krauthammer, 2012), pero las formas de energía potencial sugeridas resultan ser más sensibles.

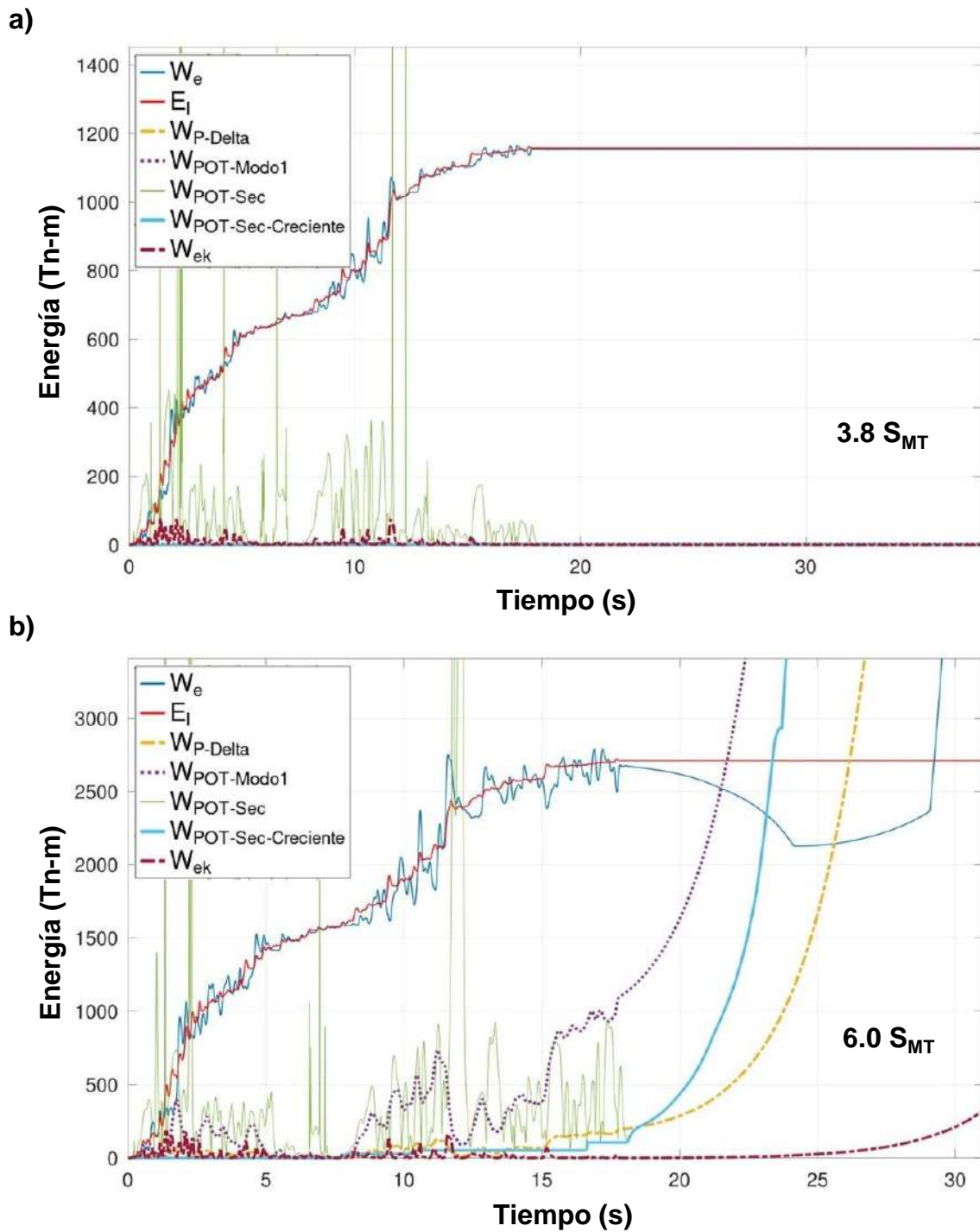


Figura 2. Monitoreo del colapso con historia de la energía potencial: (a) punto IDA sin colapso y (b) punto IDA con inestabilidad numérica

Se considera crucial evaluar el colapso numérico en los prototipos con amortiguadores, teniendo en cuenta la máxima capacidad histerética global de la estructura, para ello, se propuso determinar la capacidad máxima de energía, W_{pC} , teniendo en cuenta la variabilidad de la energía histerética considerando los resultados de cada curva IDA en los prototipos sin amortiguadores. Luego, se generan las curvas IDA analizando todos los prototipos con amortiguadores, identificando el colapso en el punto donde la energía histerética de demanda, W_{pD} , excede a W_{pC} , o se haya encontrado una inestabilidad de la energía potencial. No se ha considerado la capacidad máxima de desplazamiento y fuerza de los amortiguadores en este estudio, aspectos que deberán investigarse en trabajos futuros.

El FEMA (2009) establece los criterios para evaluar el desempeño sísmico, destacando la mediana de la capacidad de colapso, que refleja la intensidad necesaria para que el 50% de los registros provoquen el colapso, y la aceleración espectral del sismo máximo considerado. El IMC es el principal indicador del margen de seguridad frente al colapso. Este IMC se puede analizar a través de un ajuste lognormal acumulado de los puntos de colapso, generando una curva de fragilidad (FEMA, 2009, 2018; Zhou et al., 2022). Las curvas reflejan la probabilidad de colapso ante diferentes niveles de intensidad sísmica, considerando la variabilidad entre registros. Según los criterios del ASCE (2022), la probabilidad condicional de colapso para un sismo máximo debe ser inferior o igual al 10%, dependiendo del nivel de riesgo y la importancia de la estructura.

En resumen, el presente estudio es numérico, orientado a encontrar puntos IDA hasta alcanzar el colapso, monitoreando la capacidad máxima de energía, W_{pC} , y la energía potencial en las tres formas propuestas. El proceso de análisis de datos tiene como objetivo evaluar parámetros estadísticos y regresiones para la evaluación y predicción del IMC considerando los indicadores de la variable independiente (relación de amortiguamiento adicional y exponente de la velocidad).

2.3. Resultados

Una vez obtenidos los puntos IDA y evaluado el último punto antes del colapso, el IMC se calcula como la relación entre la mediana de la capacidad de colapso y la aceleración espectral del sismo máximo considerado. Asimismo, el IMC puede estimarse utilizando un histograma de frecuencias, el cual se ajusta a una función de densidad de probabilidad lognormal. La representación de la función acumulada de probabilidad lognormal (cdf), en la parte inferior derecha, ofrece la curva de fragilidad al colapso, donde el 50% de probabilidad corresponde al valor del IMC.

La Figura 3 presenta las curvas IDA de los prototipos sin amortiguadores, donde las cruces negras señalan el último punto previo al colapso en cada curva, lo que representa la capacidad máxima de energía, W_{pc} . También se incluye el IMC, que es la mediana del índice de colapso, este índice considera el número de veces que se debe superar el evento SMC para que ocurra el colapso. En el caso del prototipo de 3 pisos, el IMC indica que el colapso ocurriría en la mitad de los sismos si el evento SMC se supera en 2.80 veces. Las Figuras 4, 5 y 6 muestran las curvas IDA para los modelos de 3, 6 y 9 pisos, respectivamente, equipados con amortiguadores.

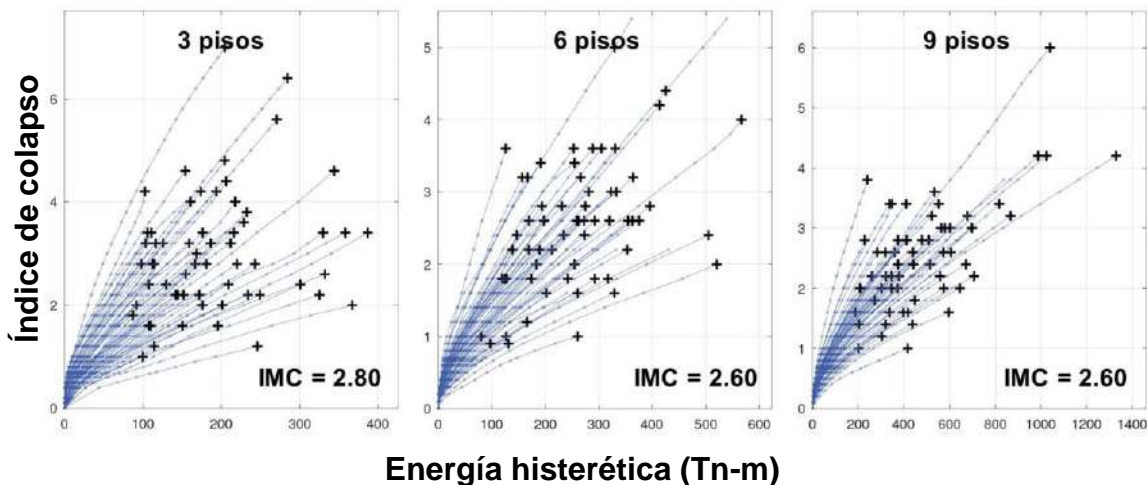


Figura 3. Curvas IDA para los prototipos sin amortiguadores

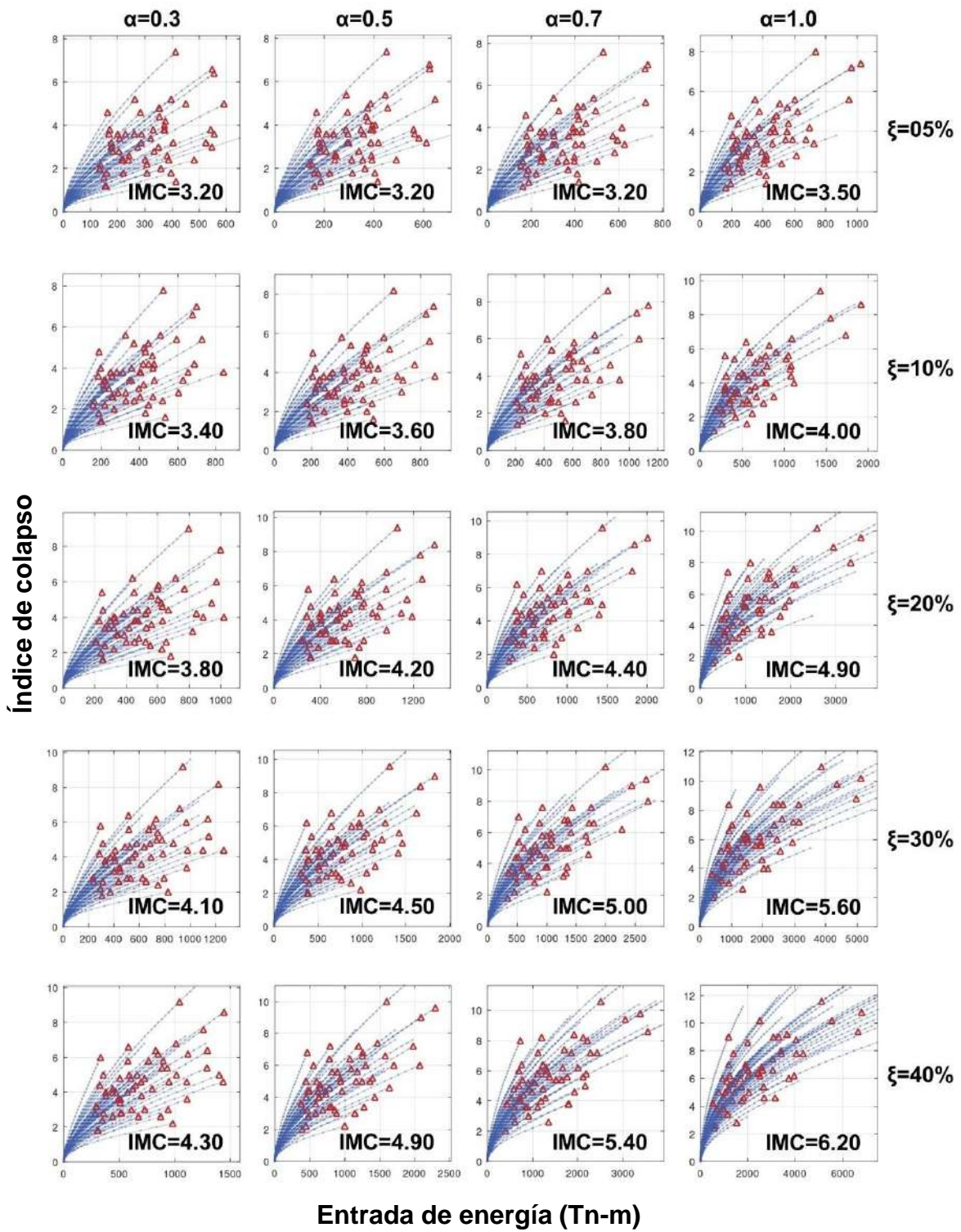


Figura 4. Curvas IDA para los prototipos de 03 pisos con amortiguadores

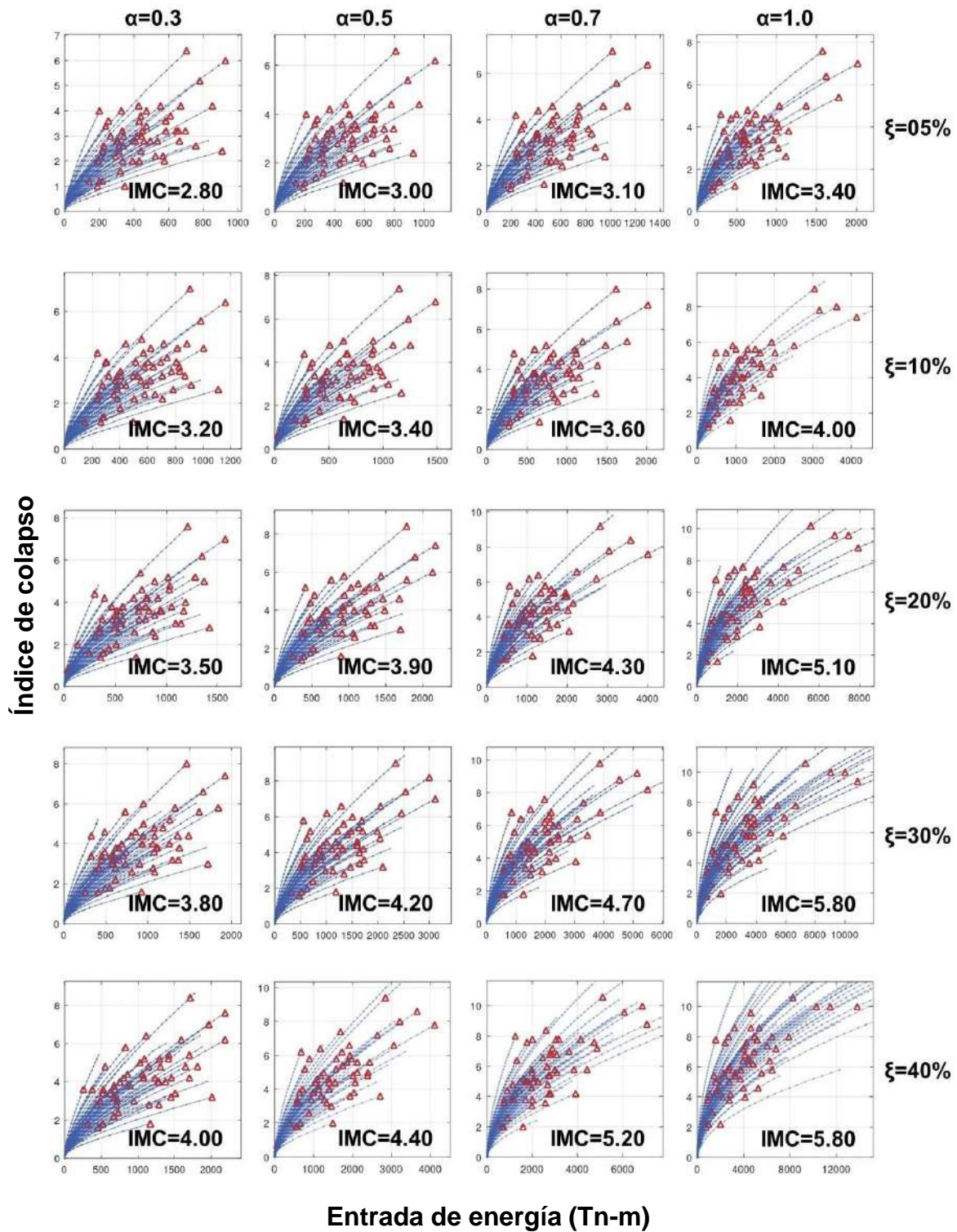


Figura 5. Curvas IDA para los prototipos de 06 pisos con amortiguadores

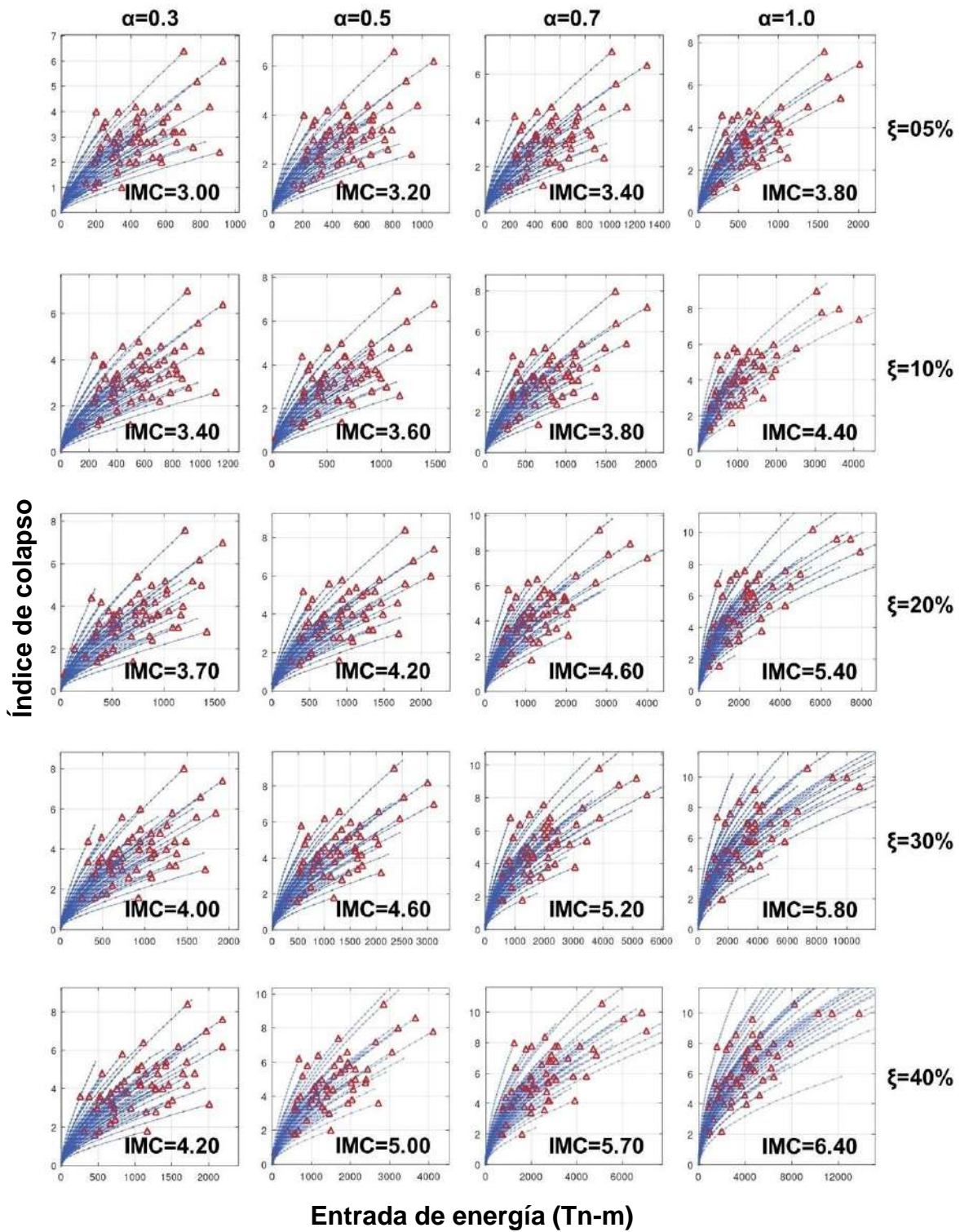


Figura 6. Curvas IDA para los prototipos de 09 pisos con amortiguadores

La Figura 7 muestra los resultados de la regresión que evalúa el IMC tanto para el exponente de velocidad, α , como para cada nivel de amortiguamiento suplementario debido a la inclusión de los amortiguadores, ξ_{v1} , agrupando los prototipos por número de pisos. También se presenta el trazado de las líneas de tendencia. Algunas curvas se ajustan con polinomios de segundo grado y otras con lineales.

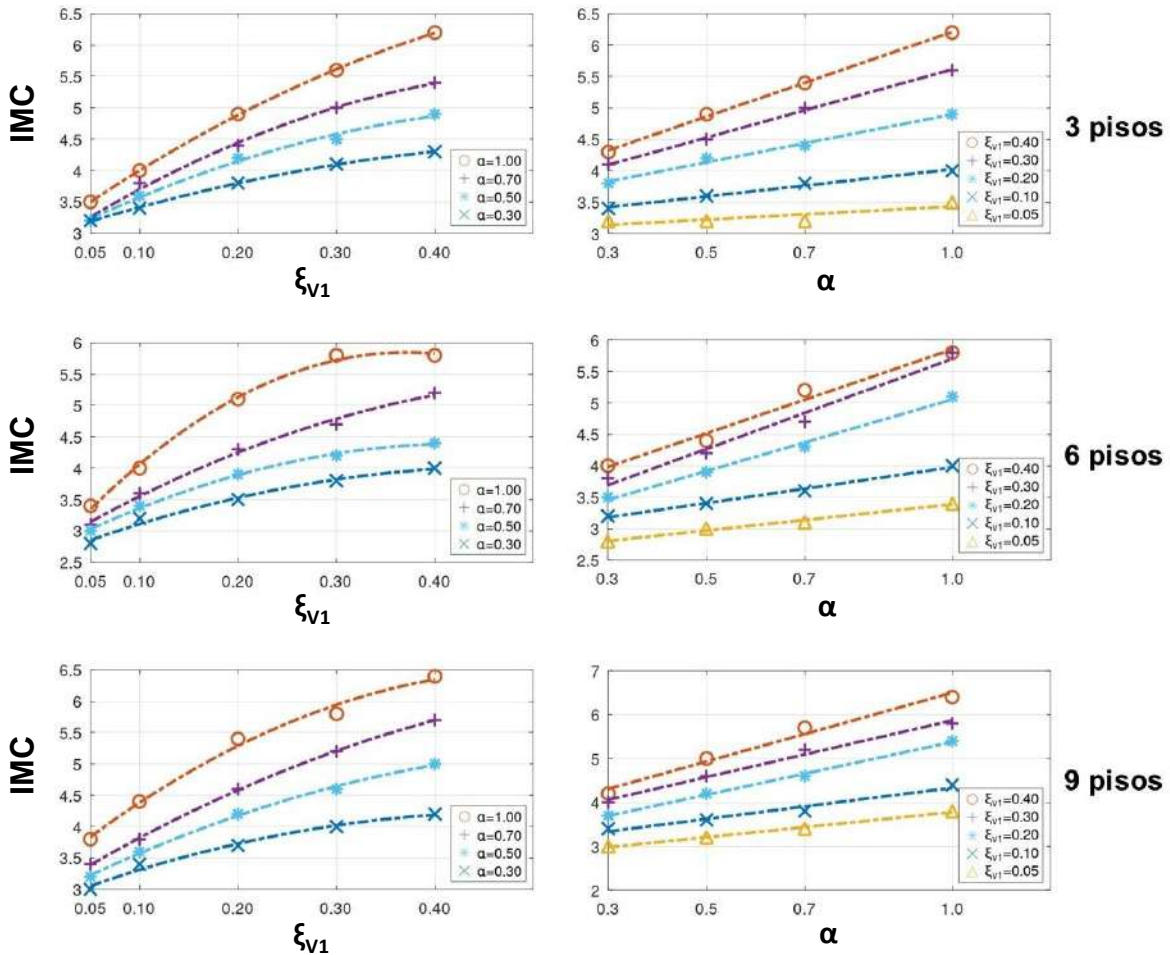


Figura 7. Predicción del IMC variando el amortiguamiento y exponente de velocidad

2.4. Discusión de resultados

Normativas como las del ASCE (2022) definen una probabilidad de colapso condicional que los edificios deben cumplir, recomendando el IMC como el principal

parámetro para evaluar el desempeño sísmico. Esto implica considerar la probabilidad condicional de colapso debido a eventos SMC, siendo igual o menor al 10%, 5% y 2.5% para edificios convencionales, importantes y especiales, respectivamente, derivada de curvas de fragilidad al colapso con desviaciones estándar logarítmicas de 0.6.

En las curvas IDA de la Figura 3, los valores del IMC son 2.80, 2.60 y 2.60 para los modelos de 3, 6 y 9 pisos, sin amortiguadores, respectivamente. Se observa una similitud en los valores del IMC, lo que sugiere que un valor de 2.60 para edificios de 6 a 9 pisos podría ser apropiado bajo las condiciones del estudio. Los edificios de 3 pisos muestran un IMC ligeramente mayor, posiblemente debido a que su comportamiento está más influenciado por el diseño de los componentes estructurales, en lugar de estar controlado por distorsiones inducidas por la entrada de energía. Sin embargo, si se aprecia que la mediana de la energía histerética estructural varía considerando que el periodo y la masa son distintos en los prototipos, presentándose cierta relación que ha servido para describir la energía en términos de velocidades equivalentes (Akiyama, 2002).

Los resultados del IMC para los prototipos de 3, 6 y 9 pisos, presentados en las Figuras desde la 4 a la 6, revelan un rango de valores para el IMC que varía según el nivel de amortiguamiento adicional y exponente de velocidad.

En el prototipo de 3 pisos, los valores del IMC varían entre 3.20 y 6.20, presentando una tendencia lineal en función del exponente de velocidad como indicador y una tendencia cuadrática al considerar la relación de amortiguamiento como indicador, según los resultados de las regresiones realizadas. El incremento del IMC, en los pórticos con amortiguadores, demuestra la efectividad de estos dispositivos, con aumentos de entre 1.14 y 2.21 veces. El IMC es mayor cuando se emplean amortiguadores lineales, y varía entre 3.50 y 6.20 para $\alpha = 1.0$, entre 3.20 y 5.40 para $\alpha = 0.7$, entre 3.20 y 4.90 para $\alpha = 0.5$, y 3.20 y 4.30 para $\alpha = 0.3$.

Para el prototipo de 6 pisos, los valores del IMC varían entre 2.80 y 5.80, también con tendencias de primer y segundo grado. El aumento del IMC con incrementos de

entre 1.08 y 2.23 veces, corroboran la eficacia de los amortiguadores. Los valores para el IMC van desde 2.80 hasta 5.80, estando entre 3.40 y 5.80 para un $\alpha = 1.0$, entre 3.10 y 5.20 para $\alpha = 0.7$, entre 3.00 y 4.40 para $\alpha = 0.5$, y 2.80 y 4.00 para $\alpha = 0.3$

Finalmente, para el prototipo de 9 pisos, los valores del IMC se sitúan entre 3.00 y 6.40, con tendencias de primer y segundo grado. El aumento del IMC con uso de amortiguadores, entre 1.15 y 2.46 veces, reafirman la eficacia de los amortiguadores en mejorar el desempeño sísmico de los edificios. Según el exponente de velocidad utilizado se observan rangos de 3.80 a 6.40 ($\alpha = 1.0$), 3.40 a 5.70 ($\alpha = 0.7$), 3.20 a 5.00 ($\alpha = 0.5$), y 3.00 a 4.20 ($\alpha = 0.3$).

En general, el IMC se incrementa a medida que el exponente de la velocidad también lo hace, es decir, los amortiguadores lineales conducen a un IMC mayor que los no lineales. Asimismo, el IMC disminuye cuando se emplean relaciones de amortiguamiento suplementario menores.

Zhou et al. (2022) señalan que el IMC en edificios de 3 y 9 pisos es de 1.6 y 2.6, respectivamente. Además, para incrementos adicionales del 10%, 20% y 30% en el amortiguamiento, el IMC varía a 2.2, 2.8 y 3.2 para el edificio de 3 pisos, mientras que para el de 9 pisos es de 4.3, 4.9 y 5.3, respectivamente. Sin embargo, en este estudio se observaron incrementos del IMC que van desde el 1.08 hasta el 2.40 veces con respecto a los prototipos sin amortiguadores. Esta disparidad podría explicarse por el hecho de que Zhou, Xiao y Sebaq emplean edificios de acero y evalúan la capacidad máxima de energía, W_{pc} , mediante análisis pushover, estableciéndolo como un único valor máximo de energía. En contraste, en este estudio, el W_{pc} se determina a través de la energía histerética en los puntos de colapso, manteniendo así la variabilidad entre los registros.

En la Figura 7 se observa que es posible predecir con precisión el IMC considerando el exponente de velocidad o la relación de amortiguamiento suplementario o adicional que añaden los amortiguadores. Por lo tanto, los pasos a seguir para implementar un diseño basado en energía utilizando el IMC como medida de

desempeño serían los siguientes: (1) seleccionar un IMC objetivo conforme a lo establecido por la normativa, por ejemplo, para cumplir con una categoría de uso especial y una incertidumbre de 0.60 el IMC mínimo debería ser de 3.18 según lo que señala el FEMA (2009); (2) elegir el parámetro a utilizar según la Figura 9, la relación de amortiguamiento suplementaria o el exponente de velocidad; y (3) calcular el IMC propuesto mediante las tendencias disponibles, asegurándose de que sea igual o mayor que el IMC objetivo. Este IMC propuesto puede utilizarse para el dimensionamiento de los amortiguadores, donde se requieren valores iniciales de la relación de amortiguamiento adicional y exponente de velocidad, para luego verificar la conformidad con las normativas en diversos niveles de desempeño en una etapa de diseño definitivo, incluso al colapso. Por ejemplo, en un edificio de 6 pisos con una relación de amortiguamiento suplementario del 10% se puede seleccionar cualquier exponente de velocidad superior a 0.50 para obtener un IMC mayor a 3.18, siendo los amortiguadores lineales los que proporcionarían el mayor IMC (cerca de 4.00), garantizando la operación continua de la estructura.

3. Conclusión

Una estrategia empleada para mejorar la prestación de los edificios es la incorporación de amortiguadores viscosos. Por lo tanto, es fundamental evaluar el IMC de estas estructuras, diseñadas de acuerdo con las regulaciones actuales, al considerarse como el indicador fundamental del desempeño. Se analizaron pórticos ordinarios de concreto, con el objetivo de alcanzar comportamientos inelásticos incluso ante pequeñas distorsiones, tanto con y sin la presencia de amortiguadores. Se logró cumplir con el objetivo principal de aplicar un enfoque basado en el balance energético en todas las fases de análisis, definiendo el punto de colapso mediante el monitoreo de la energía potencial y estableciendo un límite para la capacidad máxima de energía, W_{pc} . El IMC se determinó mediante un estudio IDA, que permite ajustar los datos a distribuciones lognormales y obtener la mediana de los colapsos registrados.

Se observó que en los prototipos que carecen de amortiguadores, el IMC tiende a ser similar, lo que sugiere la posibilidad de establecer un valor común para esta tipología estructural, basado en los prototipos analizados. La introducción de amortiguadores aumenta la capacidad al colapso, incrementando el IMC entre 1.14 y 2.21 veces para el prototipo de 3 pisos, entre 1.08 y 2.23 para el de 6 pisos, y de 1.15 a 2.46 veces para el de 9 pisos. Estos resultados indican que el IMC no sufre mayor variación a medida que aumenta el número de pisos en un edificio.

Los amortiguadores no lineales, con exponentes de velocidad de 0.7, 0.5 y 0.3, exhiben un IMC más bajo en comparación con los amortiguadores lineales. Además, un aumento en el amortiguamiento suplementario resulta en una mejora del IMC. Por lo tanto, valores bajos de estos parámetros, no generan mejoras significativas.

En contraste con investigaciones anteriores, los resultados varían, lo que sugiere que el método de evaluación y los materiales utilizados pueden influir en los resultados del IMC.

Los valores del IMC muestran claras tendencias y, por lo tanto, son predecibles, considerando parámetros iniciales de la relación de amortiguamiento adicional y el exponente de velocidad. Estos parámetros se pueden definir de manera que garanticen el cumplimiento de un IMC objetivo, el cual debe ser verificado durante las etapas de diseño definitivo para asegurar un nivel de desempeño superior al de los prototipos sin amortiguadores.

Por tanto, esta aplicación práctica del uso del IMC es una comprobación de la hipótesis que se prevé que el desempeño al colapso sísmico para edificios aporticados de concreto armado equipados con amortiguadores viscosos se puede evaluar de manera coherente empleando procedimientos basados en energía. Además, la incorporación de amortiguadores mejora el desempeño en situaciones de colapso, lo que permite considerarlos para su implementación en edificaciones principales y/o esenciales.

Referencias

ACI. (2022). *Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary (Reapproved 2022)*. American Concrete Institute.

<https://doi.org/10.14359/51716937>

Akiyama, H. (1986). Earthquake-resistant limit-state design for buildings.

Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 14(1), 148-148.

<https://doi.org/10.1002/eqe.4290140112>

Akiyama, H. (2002). Collapse modes of structures under strong motions of

earthquake. *Annals of Geophysics*, 45(6). <https://doi.org/10.4401/ag-3548>

ASCE. (2022). *Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and*

Other Structures ASCE/SEI 7-22 (7.^a ed.). American Society of Civil

Engineers. <https://doi.org/10.1061/9780784415788>

ASCE. (2023). *Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings: ASCE/SEI 41-23*. American Society of Civil Engineers.

<https://doi.org/10.1061/9780784416112>

Benavent-Climent, A., Donaire-Ávila, J., & Mollaioli, F. (2021). Key Points and

Pending Issues in the Energy-Based Seismic Design Approach. En A.

Benavent-Climent & F. Mollaioli (Eds.), *Energy-Based Seismic Engineering*

(pp. 151-168). Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-](https://doi.org/10.1007/978-3-030-73932-4_11)

[3-030-73932-4_11](https://doi.org/10.1007/978-3-030-73932-4_11)

Chopra, A. K. (2016). *Dynamics of Structures (Fifth Edition)*. Pearson Education, Inc.

- Donaire-Ávila, J., & Benavent-Climent, A. (2020). Optimum Strength Distribution for Structures with Metallic Dampers Subjected to Seismic Loading. *Metals*, 10, 127. <https://doi.org/10.3390/met10010127>
- Fardis, M. N. (2018). From Force- to Displacement-Based Seismic Design of Concrete Structures and Beyond. En K. Pitilakis (Ed.), *Recent Advances in Earthquake Engineering in Europe* (Vol. 46, pp. 101-122). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-75741-4_4
- FEMA. (2009). *Quantification of Building Seismic Performance Factors (FEMA P695)*. Federal Emergency Management Agency.
- FEMA. (2018). *Seismic Performance Assessment of Buildings, FEMA P-58*. Federal Emergency Management Agency. <https://femap58.atcouncil.org/>
- Hamidia, M., Filiatrault, A., & Aref, A. (2014). *Simplified Seismic Collapse Capacity-Based Evaluation and Design of Frame Buildings with and without Supplemental Damping Systems*. MCEER, University at Buffalo.
- Haselton, C. B., Liel, A. B., Taylor-Lange, S. C., & Deierlein, G. G. (2016). Calibration of Model to Simulate Response of Reinforced Concrete Beam-Columns to Collapse. *ACI Structural Journal*, 113(6). <https://doi.org/10.14359/51689245>
- Lignos, D. G., & Krawinkler, H. (2011). Deterioration Modeling of Steel Components in Support of Collapse Prediction of Steel Moment Frames under Earthquake Loading. *Journal of Structural Engineering*, 137(11), 1291-1302. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0000376](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000376)

- Meigooni, F. S., & Mollaioli, F. (2021). Simulation of seismic collapse of simple structures with energy-based procedures. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 145, 106733. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2021.106733>
- MVCS. (2020a). *Norma E.020, cargas*. SENCICO.
- MVCS. (2020b). *Norma E.030, diseño sismorresistente*. SENCICO.
- MVCS. (2020c). *Norma E.060, concreto armado*. SENCICO.
- PEER. (2014). *PEER Ground Motion Database—PEER Center*.
<https://ngawest2.berkeley.edu/>
- PEER. (2024). *Opensees (Versión 3.6.0) [Software]*.
<https://opensees.berkeley.edu/>
- Petrone, F., Shan, L., & Kunnath, S. K. (2016). Modeling of RC Frame Buildings for Progressive Collapse Analysis. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 10(1), 1-13. <https://doi.org/10.1007/s40069-016-0126-y>
- Scozzese, F., Gioiella, L., Dall'Asta, A., Ragni, L., & Tubaldi, E. (2021). Influence of viscous dampers ultimate capacity on the seismic reliability of building structures. *Structural Safety*, 91, 102096.
<https://doi.org/10.1016/j.strusafe.2021.102096>
- Shearer, P. M. (2019). *Introduction to Seismology*. Cambridge University Press.
<https://doi.org/10.1017/9781316877111>
- Szyniszewski, S., & Krauthammer, T. (2012). Energy flow in progressive collapse of steel framed buildings. *Engineering Structures*, 42, 142-153.
<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2012.04.014>

Taylor Devices, Inc. (2020). *Fluid viscous dampers. General guidelines for engineers including a brief history.* Taylor Devices, Inc.

<https://www.taylordevices.com/damper-manual/>

Toledo Espinoza, V. (2021). *Distribución de energía entre disipadores viscosos y pórticos con respuesta no lineal: Aplicación a los métodos basados en el balance energético [tesis de maestría, Universidad Politécnica de Madrid].* Universidad Politécnica de Madrid.

Zhou, Y., Xiao, Y., & Samier Sebaq, M. (2022). Energy-based fragility curves of building structures equipped with viscous dampers. *Structures*, 44, 1660-1679. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.08.101>