UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO.

FACULTAD DE INGENIERÍA.

EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO SÍSMICO PARA UN MARCO DE ACERO DE NUEVE NIVELES CON AMORTIGUADORES VISCOSOS NO LINEALES PARA DIFERENTES VALORES DE α.

TESIS.

PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

LICENCIATURA EN INGENIERÍA CIVIL.

PRESENTA:

DANIELA VARGAS BARRIOS.

DIRECTOR DE TESIS:

DR. FRANCISCO HECTOR BAÑUELOS GARCÍA.

OCTUBRE DE 2026.

Índice

Resumen 4
CAPÍTULO 1. 6
Introducción. 6
Planteamiento del problema. 6
Justificación 8
Limitaciones. 9
Limitaciones del Modelo Estructural 9
Limitaciones en el análisis sísmico. 9
Hipótesis. 10
Objetivo general. 11
Objetivos específicos 11
CAPÍTULO 2. 12
Control sísmico 12
Tipo de sistemas de control. 15
Sistemas de aislamiento sísmico 16
Tipos de Control Sísmico 18
Ventajas del Control Sísmico 24
Amortiguadores de fluido viscoso 25
Metodología. 30
Definición de la demanda. 33
Determinación del amortiguamiento necesario para satisfacer una distorsión. 33
Diseño de los amortiguadores de fluido viscoso 33
Determinar distorsiones de entrepiso 38
CAPÍTULO 3 39
Ejemplo de aplicación 40
Resultados del diseño 44
Coeficiente de variación 66
Discusión 68
Recomendaciones 70
Conclusiones 73
Referencias 76

Resumen

La evaluación del desempeño de estructuras de acero equipadas con amortiguadores de fluido viscoso no lineal para distintos valores del parámetro α permite analizar cómo varía la capacidad de disipación de energía y la respuesta sísmica de la estructura conforme cambia el comportamiento no lineal del amortiguador.

Con el propósito de evaluar la efectividad de los amortiguadores de fluido viscoso no lineal en estructuras de acero, se analizó un marco plano de acero de nueve niveles y cinco crujías, mediante análisis historia-tiempo no lineal, realizado en OpenSees. La demanda sísmica empleada correspondió a la componente Este-Oeste (EW) del sismo de Michoacán de 1985, registrada en la estación SCT, debido a su representatividad para estudios de respuesta sísmica estructural.

El estudio consideró valores del parámetro de velocidad α comprendidos entre 0.1 y 1.0, así como niveles de amortiguamiento suplementario de 5 %, 10 % y 15 %. Como variables principales de respuesta se evaluaron los desplazamientos laterales máximos y las distorsiones de entrepiso, indicadores fundamentales para estimar el desempeño sísmico de la estructura.

Cuando se realiza una evaluación del desempeño para diferentes valores de α permite determinar la configuración más eficiente de amortiguadores de fluido viscoso no lineal en estructuras de acero sometidas a excitaciones sísmicas, optimizando tanto la seguridad estructural como el comportamiento de la edificación.

En estudios se observa que valores bajos de α mejoran significativamente la disipación de energía y reducen la respuesta sísmica; sin embargo, también pueden incrementar la complejidad del diseño y análisis numérico. El análisis para distintos valores de α permite identificar el comportamiento óptimo del sistema estructural. Comúnmente se estudian valores de α igual a 0.1, 0.5, 0.3 y 1 con

comportamiento lineal, moderadamente no lineal, alta eficiencia de disipación y comportamiento fuertemente no lineal.

Una de las innovaciones más importantes es el análisis detallado del efecto del parámetro α sobre la respuesta dinámica estructural. Tradicionalmente se utilizaban amortiguadores lineales (α=1); sin embargo, investigaciones recientes demuestran que valores no lineales menores permiten una disipación de energía más eficiente y una mejor reducción de demanda sísmica.

En estructuras de acero, los valores de amortiguamiento suplementario más utilizados en análisis y diseño sísmico suelen expresarse como porcentaje del amortiguamiento crítico equivalente. Los valores más significativos son: 5 %, 10%, 15 % y 20 %. Por lo que en esta tesis los valores a considerar son: 5 %, 10% y 15 %.

Los resultados mostraron que la incorporación de amortiguadores viscosos produjo reducciones significativas en la respuesta estructural. En particular, la configuración que combinó los valores más adecuados de α con mayores porcentajes de amortiguamiento suplementario presentó las mayores disminuciones en desplazamientos laterales y distorsiones de entrepiso, evidenciando una mejora sustancial en el comportamiento sísmico del sistema.

Se concluye que tanto el parámetro α como el nivel de amortiguamiento suplementario influyen de manera importante en la eficiencia de los amortiguadores de fluido viscoso no lineal. La selección apropiada de estos parámetros permite optimizar la disipación de energía sísmica y reducir la demanda estructural, constituyéndose en una alternativa efectiva para el control sísmico y la mejora del desempeño de estructuras de acero.

CAPÍTULO 1.

INTRODUCCIÓN.

Planteamiento del problema.

El comportamiento de las estructuras ante eventos sísmicos ha sido objeto de estudio debido a las implicaciones que tienen los daños o el colapso de las estructuras. Debido a ello, han surgido alternativas en el diseño, como la implementación de sistemas de control sísmico, como lo son los amortiguadores de fluido viscoso (FVDs). Se han desarrollado diversas formulaciones para diseñar estos dispositivos, de los cuales los que han tenido mayor aplicación son los que consideran o aproxima el comportamiento de estos dispositivos como el amortiguamiento clásico suplementario. El procedimiento de diseño de estos dispositivos que más se utiliza el de (Constantinou & Symans, 1992), el cual es la base de algunos documentos técnicos de diseño tales como: (ASCE/SEI, 7-2022)

Este procedimiento se basa en la idea de que el comportamiento de un amortiguador de fluido viscoso puede aproximarse mediante amortiguamiento clásico suplementario mediante las propiedades dinámicas de un sistema (por ejemplo, forma modal, periodo). En particular estos dispositivos se han implementado en distintos tipos de estructuras siendo los marcos de acero en los que más se utilizan, ya que la conexión entre los dispositivos es más fácil de realizar, y no se requieren elementos suplementarios para su instalación.

El amortiguamiento suplementario es una estrategia de control sísmico pasivo que consiste en incorporar dispositivos disipadores de energía a una estructura con el fin de incrementar su capacidad de amortiguamiento efectivo. En estructuras de acero, estos sistemas permiten reducir significativamente los desplazamientos,

derivas y aceleraciones inducidas por la acción sísmica, mejorando el desempeño global de la edificación. La implementación de amortiguamiento suplementario contribuye a disminuir las demandas sísmicas sobre los elementos estructurales, reducir los niveles de daño y aumentar la seguridad y funcionalidad de la estructura durante y después de un sismo.

En virtud de que el amortiguamiento inherente en la mayoría de las estructuras es muy pequeño, su respuesta a los sismos puede reducirse en gran medida al agregar amortiguamiento suplementario, lo cual puede idealizarse mediante este tipo de dispositivos. Éstos pueden ser de mucha utilidad para reducir la respuesta estructural, así como el daño.

Aunque existen estudios sobre amortiguadores de fluido viscoso no lineal y sobre la influencia del exponente α en la respuesta estructural, aún es necesario evaluar su desempeño en marcos de acero sometidos a registros sísmicos representativos del Valle de México, debido a las características particulares de suelos blandos, periodos largos y amplificación dinámica; ya que genera incertidumbre en el diseño estructural y su desempeño sísmico. ¿Cómo influye la variación de α en el comportamiento de marcos de acero equipados con estos dispositivos?

Justificación.

Los amortiguadores son utilizados en estructuras de acero, especialmente en zonas sísmicas, porque disipan la energía generada por sismos y otras vibraciones, lo que ayuda a prevenir daños severos y reduce el riesgo de colapso.

El uso de amortiguadores de fluido viscoso no-lineal en estructuras de acero como edificios, puede reducir la respuesta estructural frente a cargas dinámicas, como sismo. Estos dispositivos reducen la respuesta, el desplazamiento, momentos flexionantes entre otros. Por lo que aumentan la vida útil de la estructura al evitar vibraciones repetitivas, permitiendo que la estructura sufra menos daño en un evento fuerte.

El diseño de estos amortiguadores contribuye en la disipación de energía en estructuras, ya que disipa parte de la energía de entrada de un sistema. Y por consiguiente se reduce la energía de las deformaciones inelásticas (daño). Uno de los parámetros fundamentales en el comportamiento de los amortiguadores de fluido viscoso no lineal es el exponente α, el cual define el grado de no linealidad de la relación fuerza-velocidad. Asimismo, el coeficiente de amortiguamiento C determina la magnitud de la fuerza desarrollada por el dispositivo. La combinación de ambos parámetros influye en la capacidad de disipación de energía, en las demandas de fuerza del amortiguador y en la respuesta sísmica global de la estructura.

Sin embargo, no hay muchos estudios donde se analice el comportamiento de este parámetro, considerando como demanda de diseño, sismos como los que afectan al Valle de México. Por lo que en esta tesis se realiza un estudio paramétrico considerando distintos valores de α y con ello analizar el desempeño estructural ante distintos valores de este parámetro.

Limitaciones.

1. El análisis se limita a estructuras de acero sometidas principalmente a cargas dinámicas (sísmicas, vibraciones).
2. Los amortiguadores analizados serán únicamente viscosos hidráulicos.
3. La respuesta se evaluará dentro de un rango específico de frecuencias y amplitudes relevantes para la estructura.

Limitaciones del Modelo Estructural.

1. La estructura de acero se modela con elementos lineales y no lineales.
2. La rigidez y masa se consideran constantes (en el modelo lineal).
3. En los modelos a analizar se propone que el acomodo geométrico de los amortiguadores se realice con la configuración diagonal.

Limitaciones en el análisis sísmico.

El análisis dinámico estudia cómo responde la estructura ante movimientos vibratorios, considerando masa, rigidez, amortiguamiento y distribución de elementos estructurales

El método dinámico modal espectral considera múltiples modos de vibración. Y el dinámico paso a paso (historia de tiempo), simula la respuesta ante registros sísmicos reales o sintéticos.

En conjunto, el análisis sísmico busca garantizar que una estructura pueda resistir sismos con un nivel adecuado de seguridad, minimizando daños materiales y riesgos para las personas.

Cuando $\alpha = 1$ se tienen amortiguadores viscosos lineales y representa una relación lineal entre la fuerza y la velocidad experimentada en el amortiguador. Cuando $\alpha \neq 1$ se tienen amortiguadores viscosos no lineales y se tiene una relación no lineal entre la fuerza y la velocidad. Cuando $\alpha = 0$, se comporta como un amortiguador de fricción pura (Lin & Chopra, 2002)

Comúnmente también se estudian valores como: $\alpha = 0.5$ para un comportamiento moderadamente no lineal, $\alpha = 0.3$ para alta eficiencia de disipación y $\alpha = 0.1$ para comportamiento fuertemente no lineal.

En esta tesis los parámetros a evaluar en el amortiguador son entre $\alpha = 0.1$ a $\alpha = 1$ con incrementos de 0.1, para poder identificar el comportamiento óptimo del sistema estructural.

Los valores de amortiguamiento suplementario a utilizar en los análisis y diseño sísmico son: 0.05, 0.10 y 0.15.

5 % → 10 %: suele producir las mayores mejoras relativas en el desempeño sísmico.

10 % → 15 %: continúa reduciendo desplazamientos y derivas de manera significativa.

Hipótesis.

La variación del exponente de no linealidad α en amortiguadores de fluido viscoso modifica significativamente la respuesta sísmica en marcos de acero. En particular, se espera que valores menores de α permitan reducir las distorsiones máximas de entrepiso y los desplazamientos laterales respecto al caso con amortiguadores lineales, manteniendo demandas de fuerza compatibles con un diseño práctico.

El desempeño de la estructura no cambia significativamente en menos del 10% el desempeño de los amortiguadores no lineales en términos de la distorsión de entrepiso.

Objetivo general.

Evaluar el desempeño sísmico de un marco plano de acero equipado con amortiguadores de fluido viscoso lineales y no lineales, mediante análisis historia-tiempo, con el fin de determinar la influencia del parámetro α en términos de las distorsiones de entrepiso y desplazamientos laterales ante una demanda sísmica representativa del Valle de México.

Objetivos específicos

1. Modelar en OpenSees un marco plano de acero de nueve niveles y cinco crujías.
2. Diseñar amortiguadores viscosos para niveles de amortiguamiento suplementario de 5 %, 10 % y 15 %.
3. Evaluar valores de α entre 0.1 y 1.0 con incrementos de 0.1.
4. Comparar desplazamientos máximos, distorsiones de entrepiso y fuerzas máximas en los dispositivos.
5. Identificar la combinación de α y amortiguamiento suplementario que ofrece mejor desempeño sísmico.

CAPÍTULO 2.

Control sísmico

Todas las estructuras que son construidas en sitios donde ocurren sismos, son susceptibles a experimentar daños en su integridad; el nivel de los daños puede ir de leve a severo, dependiendo de la vulnerabilidad que tenga cada estructura. Los reglamentos de construcción consideran, como parte de sus filosofías de diseño, que las estructuras puedan experimentar daños durante un sismo, estableciendo como límite el colapso de la misma. En resumen, la estructura después de un sismo puede resultar severamente dañada, pero no debería colapsar.

El control sísmico consiste en integrar al sistema estructural un conjunto de dispositivos a través de los cuales se disipe el daño que pueda ocurrir en el sistema durante un sismo, evitando no solo el escenario de un posible colapso, sino también los daños que puedan ocurrir en el sistema estructural y en los contenidos; con lo que se logra alcanzar un nivel de desempeño óptimo y resiliente, sin sacrificar a la estructura ni a sus contenidos.

El control sísmico se refiere a las estrategias y dispositivos utilizados para reducir la respuesta estructural, mejorando la seguridad y el desempeño de los edificios y puentes. Se puede clasificar en pasivo, activo, híbrido y semiactivo**.**

Las técnicas de control de respuesta sísmica se pueden clasificar según la forma como el sistema maneja la energía impuesta por el sismo, su absorción y disipación. Se conocen como sistemas de disipación de energía aquellos que aportan el término Ep (Energía potencial).

La diferencia con los amortiguadores lineales radica en que la fuerza de amortiguamiento en los no-lineales no es directamente proporcional a la velocidad del movimiento, sino que sigue una relación, como una potencia de la velocidad.

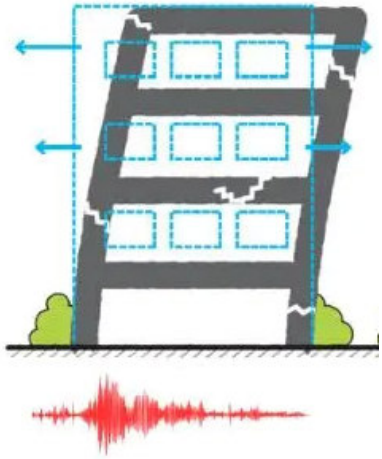
Los amortiguadores de fluido viscoso no-lineal son una alternativa para mejorar la respuesta estructural y con ello reducir el daño en los sistemas.

La siguiente figura es representativa para apreciar el comportamiento de una estructura con y sin un control sísmico.

Diseño convencional

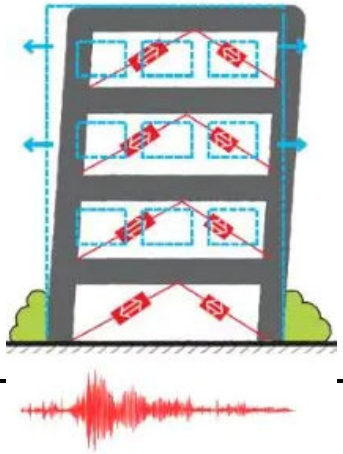
Estructura de base fija.

Disipación de energía sísmica a través del daño de elementos estructurales.



Estructura con sistema de disipación de energía.

Desvió de la energía sísmica hacia los dispositivos de disipación de energía. Reducción de respuesta dinámica de la estructura.



Estructura con aislamiento sísmico basal.

Reducción de la energía sísmica independizando el movimiento de la estructura del movimiento horizontal del suelo.

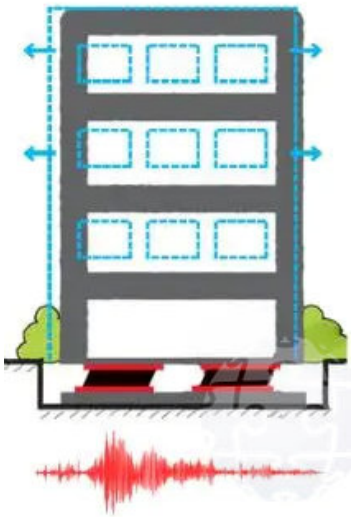


Figura 1: Sistemas de Protección Sísmica. (Rodriguez, 2026).

Tipo de sistemas de control.

Sistema de control	Tipo	Tipo	Dispositivo
Control pasivo.	Aislamiento sísmico.	Mecanismos deslizantes o de rodillos.	Apoyo de rodillos. Apoyo de placa deslizante, tipo péndulo, basculante. Capa deslizante.
		Elemento flexible.	Elastómero de multicapas
			Dispositivo flexible.
	Disipación de energía.	De tipo histerético	Acero.
			Plomo.
		De tipo friccionante	
		De tipo viscoelástico	
		De tipo fluido.	Hidráulico.
			Viscoso.
	Efecto de masa adicional.	De masa y resorte.	
		De tipo pendular.	
		Vibración de líquido.	
Control semiactivo.	Control de amortiguamiento	Sistema de amortiguamiento variable.	De tipo hidráulico.
			Riostra.

	Control de rigidez.	Sistemas de rigidez variable	
Control activo e hibrido.	Efecto de masa.	Amortiguamiento activo de masa.	
		Amortiguamiento híbrido de masa.	
	Control de fuerza.	Tendón activo.	

Tabla 1: Tipo de sistemas de control. (C&E, 2017)

Sistemas de aislamiento sísmico.

Sistemas de aislación y disipación sísmica, son sistemas presentes entre la subestructura y la superestructura de edificios. En el sistema de aislamiento sísmico en la base se instalan dispositivos, generalmente en el nivel más bajo del edificio, con el fin que se absorban de forma parcial, la energía impuesta por el sismo antes que sea transmitida a la superestructura.

Las principales características que debe cumplir este tipo de aisladores son la alta rigidez vertical, flexibilidad horizontal, rigidez torsional, durabilidad, resistencia a cambios de temperatura y resistencia a fuerzas cortantes, propiedades que deben ser comprobadas en laboratorios antes de ser utilizados.

La técnica de efecto de masa consiste en adicionar una masa al edificio para que vibre con la misma frecuencia natural de vibración de la estructura. Por lo general, se instalan en riostras diagonales dentro de los pórticos de la estructura o como complemento al sistema de aislamiento sísmico en la base, entre la fundación y la plataforma de aislamiento.

Características de aisladores sísmicos

Los aisladores sísmicos son dispositivos mecánicos de alta tecnología instalados entre la cimentación y la estructura de un edificio. Su función principal es desacoplar el edificio del suelo, permitiendo que la estructura se mueva de forma controlada y disipando la energía del sismo para evitar daños estructurales y colapsos. En seguida se enlistan sus características:

- Desempeño bajo todas las cargas de servicio, verticales y horizontales, deberá ser tan efectiva como la estructura convencional.
- Provee la flexibilidad horizontal suficiente para alcanzar el periodo natural de la estructura aislada.
- Alta flexibilidad lateral: Permiten que el edificio se mueva de un lado a otro de manera suave y lenta.
- Alta rigidez vertical: Aunque son muy flexibles horizontalmente, son capaces de soportar el peso vertical del edificio sin deformarse.
- Disipación de energía: Actúan como amortiguadores, transformando la energía destructiva del terremoto en calor.
- Reducción de aceleraciones, protegiendo tanto la estructura como el mobiliario y la integridad de las personas.

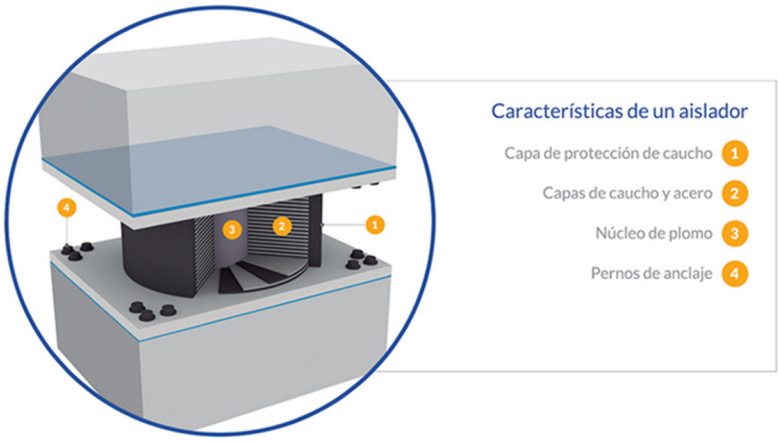


Figura 2: Características de un aislador. (Detek, 2026)

Tipos de Control Sísmico.

El control sísmico activo es una estrategia de protección estructural que utiliza dispositivos capaces de generar fuerzas mecánicas controladas en tiempo real para reducir la respuesta dinámica de una estructura durante un evento sísmico. Los sistemas activos requieren una fuente externa de energía, así como un conjunto de sensores, actuadores y algoritmos de control que permitan una actuación inteligente sobre el comportamiento de la estructura.

En esencia, el control sísmico activo opera por cuatro elementos fundamentales: sensores**,** procesador o controlador**,** actuadores y fuente de energía**.** Los sensores registran variables como aceleraciones, desplazamientos o deformaciones de la estructura. Esta información se envía al controlador, que emplea algoritmos matemáticos como control óptimo o control predictivo para determinar la magnitud y dirección de la fuerza que deben aplicar los actuadores. Finalmente, los actuadores, usualmente hidráulicos o electromecánicos, generan las fuerzas necesarias para modificar la respuesta estructural en cuestión de milisegundos.

El objetivo principal de este tipo de control es disminuir los desplazamientos laterales, aceleraciones y fuerzas internas**,** contribuyendo así a mejorar el nivel de seguridad estructural y el desempeño sísmico general. Debido a su capacidad para adaptarse a diferentes niveles de excitación y controlar múltiples modos vibratorios, el control sísmico activo es especialmente útil en edificios altos, estructuras esbeltas, puentes colgantes y edificaciones estratégicas que requieren una respuesta altamente eficiente incluso ante sismos severos.

Entre las aplicaciones más destacadas se encuentran los Amortiguadores de Masa Activa y los Amortiguadores de Masa Sintonizada Activos, los cuales consisten en masas auxiliares capaces de desplazarse mediante actuadores para contrarrestar el

movimiento estructural. Ejemplos representativos del uso de estos sistemas se pueden encontrar en edificios japoneses de gran altura, como el Shiodome Sumitomo Building y el Kyobashi Seiwa Building, donde los controladores activos han demostrado su capacidad para reducir de forma considerable las vibraciones inducidas por sismos y vientos.

Pese a sus beneficios, la implementación del control activo presenta ciertas limitaciones importantes, entre ellas su alto costo, los requerimientos de mantenimiento especializado y el riesgo de que el sistema pueda fallar o volverse inestable en caso de fallos eléctricos o errores en el algoritmo de control. Esta dependencia energética y tecnológica lo hace menos confiable que los sistemas pasivos en algunos escenarios.

Control Semiactivo.

El control sísmico semiactivo es una estrategia moderna de protección estructural que combina las ventajas del control pasivo y activo para lograr una respuesta eficiente, estable frente a movimientos sísmicos. A diferencia de los sistemas activos, los dispositivos semiactivos no generan fuerzas por sí mismos, sino que modifican sus propiedades mecánicas en tiempo real a través de una fuente energética mínima. Esta característica les permite adaptarse dinámicamente a las variaciones del movimiento sísmico sin el riesgo de inestabilidad asociado a los sistemas totalmente activos.

Los sistemas semiactivos se componen de tres elementos principales: sensores**,** controlador **y** actuadores o dispositivos ajustables. Los sensores registran el comportamiento estructural como aceleraciones o desplazamientos y transmiten los datos a un controlador, que aplica un algoritmo para determinar el nivel óptimo de rigidez, amortiguamiento o fricción que debe adoptar el dispositivo. Los actuadores, a diferencia de los utilizados en sistemas activos, no aplican fuerzas externas a la estructura, sino que modifican parámetros internos del dispositivo (viscosidad, fuerza de fricción, voltaje de un fluido, etc.) para influir sobre la respuesta dinámica estructural.

Entre los dispositivos semiactivos más utilizados destacan los amortiguadores magnetorreológicos, amortiguadores de fluido electrorreológico, disipadores de fricción controlada**, y** amortiguadores de rigidez variable**.** Estos elementos pueden ajustar su comportamiento en milisegundos, lo que permite una actuación adaptativa y eficiente ante diferentes intensidades y frecuencias del movimiento sísmico. Su capacidad de cambiar instantáneamente entre estados de baja y alta disipación los convierte en dispositivos muy eficaces para controlar vibraciones en

estructuras altas, puentes, edificios industriales y sistemas que requieren altos niveles de confiabilidad.

El principal beneficio del control semiactivo es que ofrece un desempeño similar al de los sistemas activos, pero con menor consumo energético y mayor estabilidad**,** ya que no existe riesgo de que el dispositivo actúe produciendo fuerzas no deseadas o desestabilizadoras. Además, en comparación con los sistemas pasivos, los dispositivos semiactivos pueden adaptarse a distintos niveles de demanda sísmica, lo que mejora significativamente su eficiencia en escenarios variables. Su bajo requerimiento de energía también permite que sigan funcionando incluso con sistemas de respaldo de baja capacidad, una ventaja importante en condiciones sísmicas donde puede haber fallas eléctricas.

No obstante, estos sistemas presentan algunas limitaciones, como la necesidad de una adecuada calibración de los algoritmos de control y la dependencia de sensores y componentes electrónicos que requieren mantenimiento especializado. Además, aunque son más eficientes que los dispositivos pasivos, su efectividad sigue estando limitada por el hecho de que no pueden aplicar fuerzas externas adicionales, sino únicamente modificar su comportamiento interno.

En la práctica, los sistemas semiactivos han demostrado ser una alternativa equilibrada y confiable para diversas tipologías estructurales. Su aplicación es cada vez más frecuente en investigaciones académicas y proyectos de ingeniería avanzada, debido a que ofrecen una solución robusta y flexible para el control sísmico. Con los avances recientes en materiales inteligentes, sensores y algoritmos de control, se prevé que los sistemas semiactivos continúen evolucionando y se conviertan en una de las tecnologías más prometedoras dentro de la ingeniería estructural moderna.

Control Híbrido, Mezcla de sistemas pasivos y activos para optimizar el desempeño. Ejemplo: Aisladores + TMD activos.

Control Pasivo, sin necesidad de energía externa, estos dispositivos disipan la energía del sismo sin intervención activa. Son los más utilizados por su simplicidad y fiabilidad.

Aisladores sísmicos. Dispositivos elastoméricos o de péndulo que desacoplan la estructura del suelo.

Amortiguadores. Disipadores de energía que reducen las vibraciones estructurales.

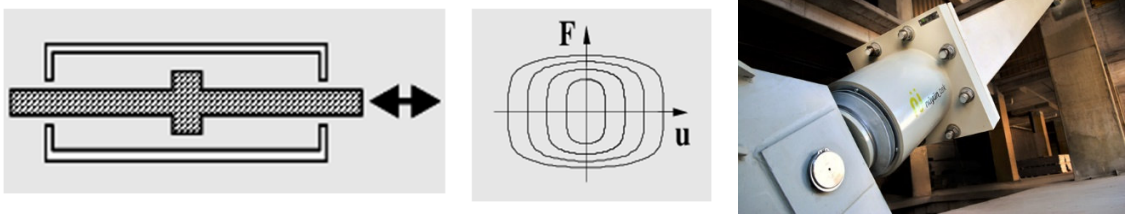
Tipos:

- Viscosos (Fluido con alta viscosidad)
- Viscoelásticos (Materiales poliméricos)
- Friccionales (Deslizamiento controlado)
- Metálicos (Deformación plástica controlada)

Los sistemas pasivos pueden clasificarse de acuerdo con el mecanismo principal de disposición de energía. La figura 2 muestra imágenes de los tipos más habituales de disipadores y sus correspondientes curvas histeréticas (carga- desplazamiento): por plastificación de metales, figura 2 (a); de fluido viscoso, (b); solido viscoelástico, (c); de fricción, (d); histerético metálico. De todos ellos, los más extendidos por su moderado coste y buena estabilidad en el tiempo son los de plastificación o fluencia de metales.

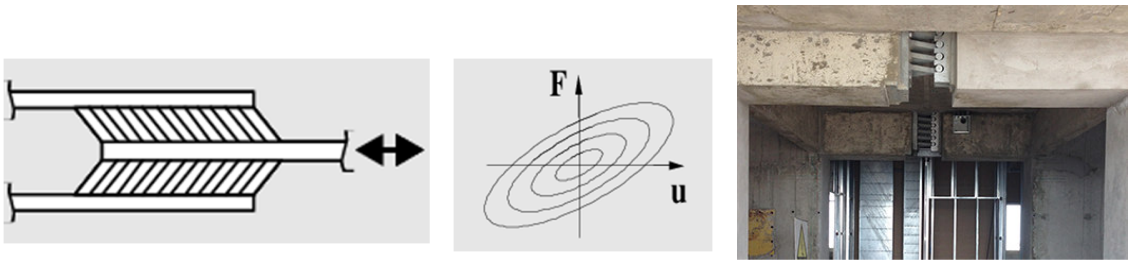
Figura de disipadores.

a) De fluido viscoso.



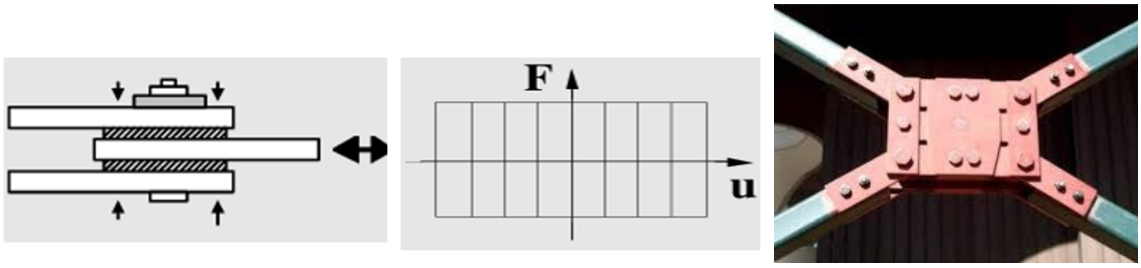
(a)

b) Solido viscoelástico.



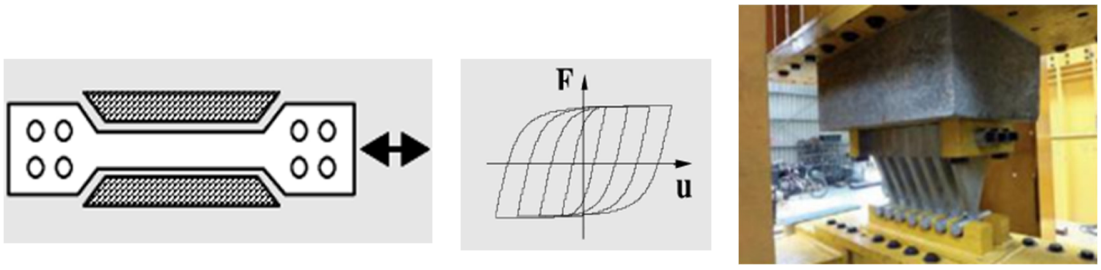
(b)

c) De fricción.



(c)

d) Histerético Metálico.



(d)

Figura 3: Tipos más frecuentes de disipadores y sus correspondientes ciclos fuerza-desplazamiento idealizados: (a); de fluido viscoso, (b); solido viscoelástico, (c); de fricción, (d); histerético metálico. Fuente imágenes: (a) (Nuyuntek, 2025); (b) (Disipa, 2025); (c) (Marsh & Fazio, 1980); (d) (Rene & Roberto, 2017).

Ventajas del Control Sísmico

El control sísmico comprende el uso de dispositivos pasivos, semiactivos, activos o híbridos para modificar la respuesta dinámica de una estructura frente a un sismo. Su incorporación ha demostrado múltiples beneficios en términos de desempeño estructural, seguridad, funcionalidad y economía.

Reduce la respuesta (desplazamientos y aceleraciones**)** en la estructura. Puede minimizar daños en elementos estructurales y no estructurales**.**

Reducción de demanda sísmica en la estructura. Los sistemas de control (amortiguadores viscosos, aisladores, disipadores metálicos, etc.) modifican las demandas de momentos, desplazamientos, etc. que genera el sismo en la estructura. lo cual se logra mediante el incremento de la disipación de energía.

Amortiguadores de fluido viscoso

Los amortiguadores de fluido viscoso son dispositivos diseñados para disipar energía mediante la deformación viscosa de un fluido interno cuando se aplican desplazamientos o velocidades relativas entre sus extremos. Su uso es común en ingeniería civil, ingeniería mecánica, protección sísmica y control de vibraciones.

Los amortiguadores de fluido viscoso (FVDs) se pueden clasificar en dos categorías: amortiguadores de fluido viscoso lineales (FVD) con $\alpha = 1$ y los de fluido viscoso no-lineales con $\alpha < 1$. Los amortiguadores FVD con $\alpha > 1$ no se utilizan en aplicaciones prácticas para el diseño estructural. Como los fluidos viscosos no-lineales exhiben fuerzas mayores que los amortiguadores de fluido viscoso a bajas velocidades, este comportamiento puede reducir el costo de estos dispositivos (Pekcan et al., n.d.; Lin y Chopra 2002; Dall'Asta et al., 2016). La Figura 4.b) muestra cómo los NLFVD tienen una forma rectangular aplanada de los bucles de histéresis de fuerza-desplazamiento, mientras que los LFVD tienen una forma de bucle elíptico. Los LFVD con un valor de a cercano a cero se utilizan para representar el comportamiento de un amortiguador histerético de fricción (Figura 3).

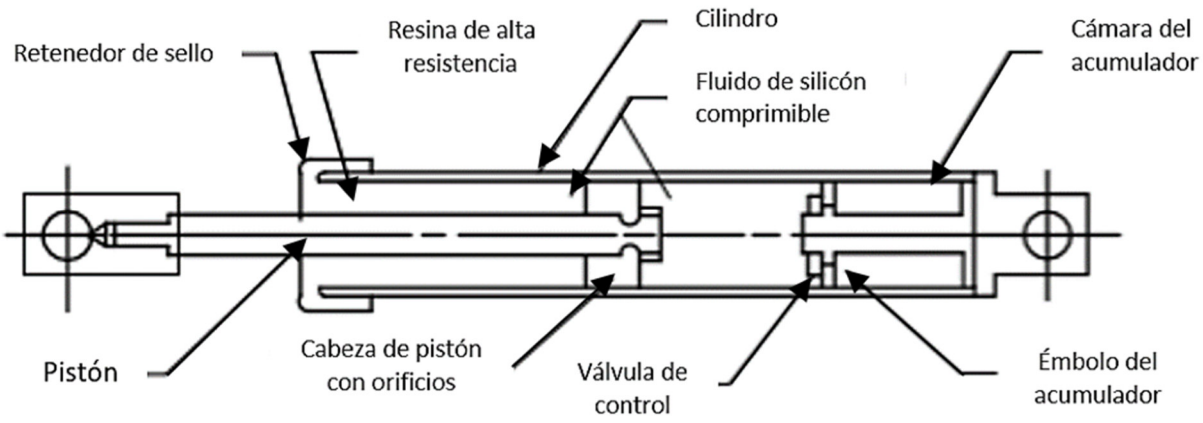
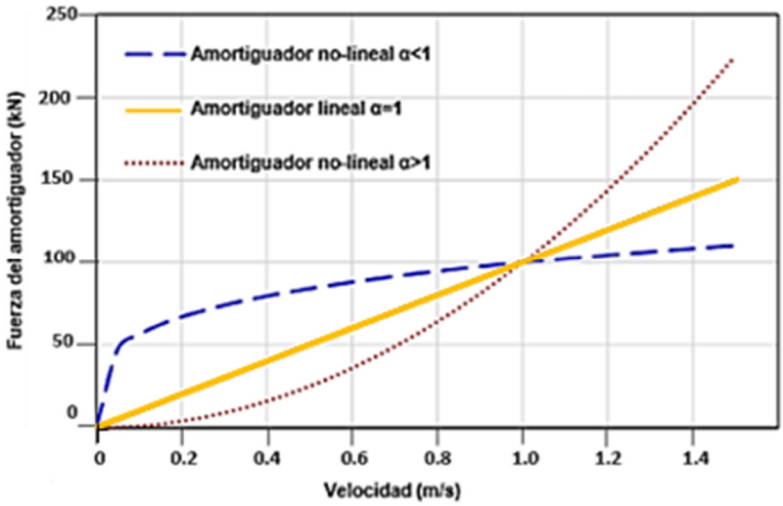
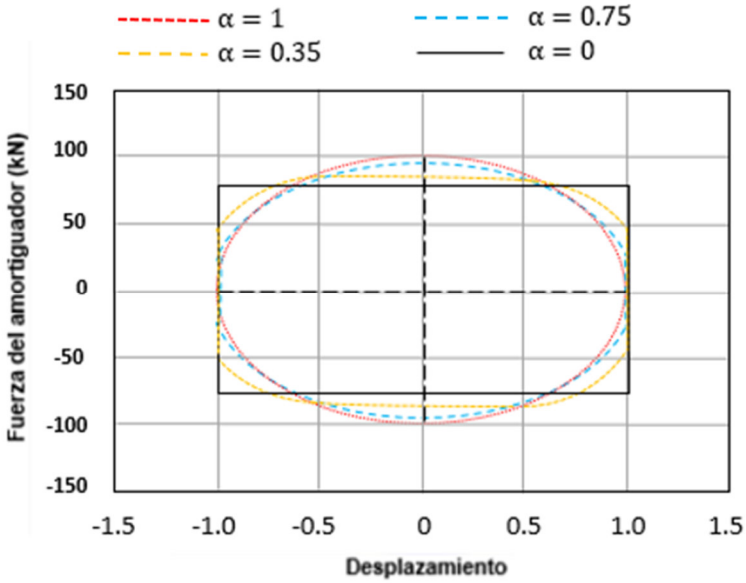


Figura 4: Componentes del amortiguador de fluido viscoso (FVD).



a) Relación fuerza-velocidad



b) Ciclo de histéresis para amortiguadores de fluido viscoso

Curvas de histéresis para amortiguadores de fluidos viscosos

Figura 5: Relaciones de comportamiento de los amortiguadores de fluido viscoso (AFVs).

Mientras las curvas presentan relaciones calculadas a partir de osciladores de un grado de libertad, los puntos corresponden a las relaciones de estructuras de varios grados de libertad. Se puede apreciar que son significativamente diferentes de la unidad, lo que implica que las respuestas de estructuras equipadas con amortiguadores lineales y no lineales son muy diferentes.

Relación de amortiguadores de fluido viscoso con fuerza-velocidad.

Los amortiguadores de fluido viscoso son dispositivos de disipación de energía dependientes de la velocidad, utilizados para reducir la respuesta dinámica de las estructuras ante acciones como sismos y viento. Su funcionamiento se basa en el flujo de un fluido de alta viscosidad a través de orificios calibrados dentro del dispositivo, generando una fuerza de amortiguamiento que permite disipar parte de la energía de vibración.

El comportamiento mecánico de estos dispositivos se describe mediante la relación fuerza–velocidad, la cual establece que la fuerza resistente desarrollada por el amortiguador depende de la velocidad relativa entre sus extremos. Por lo tanto, a medida que aumenta la velocidad de movimiento, se incrementa la fuerza de amortiguamiento y, con ello, la capacidad del dispositivo para disipar energía.

La incorporación de estos dispositivos permite disminuir los esfuerzos, desplazamientos y deformaciones producidos por las acciones dinámicas, sin modificar significativamente la rigidez de la estructura. De esta manera, contribuyen a controlar su respuesta sísmica y favorecen que los elementos estructurales permanezcan dentro del rango elástico, evitando los efectos desfavorables que puede generar un incremento excesivo de la rigidez.

Ecuación constitutiva del amortiguador viscoso no lineal

La ecuación constitutiva que describe el comportamiento de un amortiguador de fluido viscoso no lineal se expresa como:

$$\mathbf{F = C|v|^{\alpha}}$$

Donde

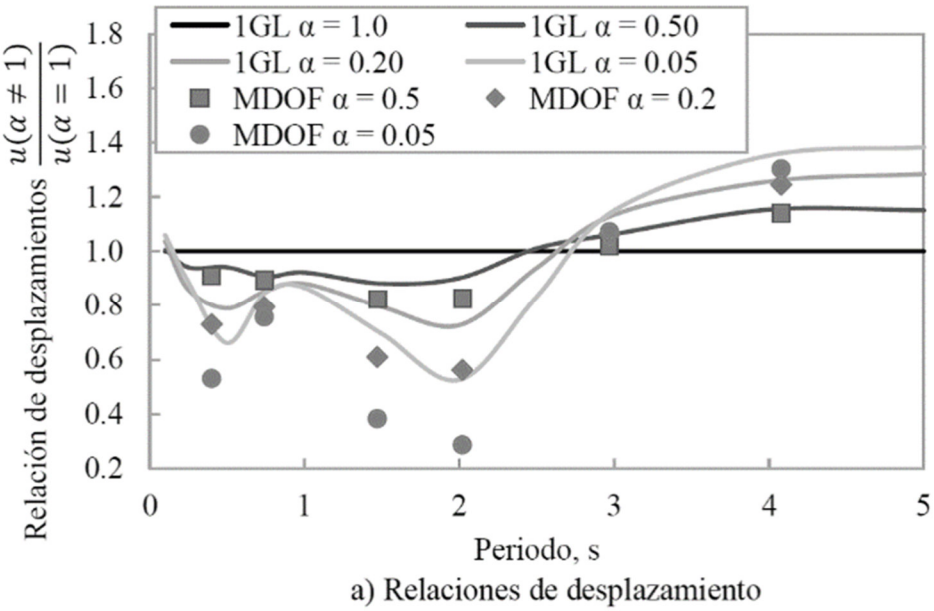
F = fuerza del amortiguador

C = coeficiente de amortiguamiento

v = velocidad relativa entre extremos del dispositivo

α = exponente de no linealidad

Relaciones de desplazamiento y fuerza en amortiguadores lineales y no lineales.



a) Relaciones de desplazamiento

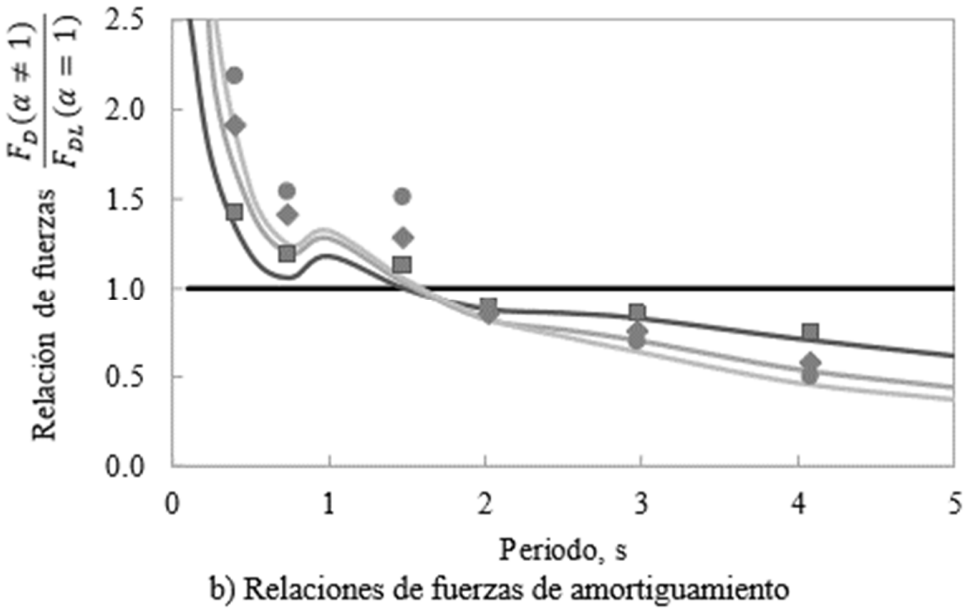


Figura 6: Relaciones de desplazamiento y fuerza en amortiguadores lineales y no lineales (Moreno, 2019).

Metodología.

Con el propósito de verificar el comportamiento de marcos de acero con amortiguadores de fluido viscoso se realiza una evaluación con distintos valores del parámetro α que representa la no linealidad del amortiguador de fluido viscoso. En este apartado de la tesis se define lo que se hizo para realizar una evaluación sísmica de un marco plano de acero con amortiguadores de fluido viscoso lineal y no lineal, considerando distintos valores de α en un parámetro de 0.1 a 1.

Se utilizaron elementos viga-columna tipo forceBeamColumn en OpenSees para representar las vigas y columnas de acero. Estos elementos permiten considerar el comportamiento no lineal de los miembros mediante la integración de la respuesta de la sección a lo largo de la longitud del elemento.

Se empleó un modelo constitutivo elástico lineal para representar el comportamiento del acero, considerando una relación lineal entre el esfuerzo y la deformación. El material permanece dentro del rango elástico, sin considerar fluencia, endurecimiento ni degradación de resistencia.

Se implementaron amortiguadores de fluido viscoso no lineal mediante el material Viscous de OpenSees, cuya fuerza resistente depende de la velocidad relativa entre sus extremos y del parámetro de no linealidad α. Se analizaron diferentes valores de α para evaluar su influencia en la respuesta sísmica de la estructura.

Se utiliza el método de aceleración promedio de Newmark para calcular el historial de tiempo.

El método de integración directa de Newmark para resolver la ecuación de movimiento de la estructura durante el análisis dinámico no lineal. Este método permite obtener la respuesta de la estructura paso a paso en el tiempo, considerando los efectos de masa, rigidez, amortiguamiento y las fuerzas externas generadas por el registro sísmico.

Duración del registro sísmico 180.1 en cm/s^2, con factor de escala aplicado de 1.00, paso de tiempo del registro 0.02

El criterio de convergencia y el algoritmo de solución son parámetros importantes para garantizar que la solución numérica sea estable y confiable.

Criterio de convergencia en OpenSees es: tcl

Algoritmo de solución NewtonLineSearch: actualiza la rigidez tangente en cada iteración e introduce la línea de búsqueda del algoritmo

Tipo de amortiguamiento inherente: Se consideró un amortiguamiento proporcional de Rayleigh para representar el amortiguamiento inherente de la estructura, definido mediante una combinación lineal de las matrices de masa y rigidez. Se adoptó una razón de amortiguamiento del 5 % para los modos de vibración seleccionados, determinándose los coeficientes de Rayleigh correspondientes para su implementación en OpenSees.

La distorsión de entrepiso es un parámetro que mide cuánto se deforma lateralmente un nivel de una estructura respecto al nivel inmediatamente inferior cuando actúa una carga lateral, como un sismo.

Límite de distorsión: Se adoptó como referencia un límite máximo de 0.02 (2 %) para la distorsión de entrepiso, con el propósito de evaluar el desempeño de la estructura ante la acción sísmica y determinar la efectividad de los amortiguadores.

1) Modelo

En el modelo estructural se definirá la geometría, las propiedades de los materiales, seccione, la masa y las condiciones de apoyo.

- Geometría: alturas de pisos, (vigas), separación de columnas.
- Propiedades materiales: acero elástico, módulo de Young, densidad, módulo de cortante
- Secciones: área, momento de inercia, propiedades de masa por elemento.
- Masa: asigna masas nodales apropiadas (masa sísmica de piso: masa de los elementos estructurales).
- Condiciones de apoyo: apoyos fijos o empotrados; si hay suelos flexibles, modelar mediante apoyos con rigidez.

Para realizar el análisis no lineal de la estructura que se evaluará en esta tesis se realiza en el software OpenSees. (McKenna & Scott, 2000)**.** Ya que con este software se puede modelar tanto los elementos estructurales cómo los dispositivos disipadores de energía.

Definición de la demanda.

Para evaluar el análisis de la estructura, se tomará como demanda sísmica el espectro de respuesta correspondiente a un registro sísmico determinado. Para el marco plano de acero, se considera del Valle de México la componente EW del sismo de Michoacán de 1985 registrado en la estación SCT.

Determinación del amortiguamiento necesario para satisfacer una distorsión.

Se modifica el amortiguamiento del espectro de tal manera que se aproxime el efecto de estos dispositivos en la estructura. Este puede ser un espectro de diseño. Esto con el propósito de diseñar los dispositivos de acuerdo con los documentos técnicos vigentes y aplicables, ASCE 7-22 (2022).

Diseño de los amortiguadores de fluido viscoso

A) Lineales

A continuación, se presenta el procedimiento de diseño de los amortiguadores de fluido viscoso de acuerdo con los reglamentos y documentos técnicos existentes, por ejemplo, a ASCE 7-22 (2022) entre otros.

Ecuación para procedimiento de diseño de amortiguadores viscosos lineales

$$\xi_{\mathrm{d}} = \frac{T \sum_{\mathrm{j}} C \mathrm{f}_{\mathrm{j}}^{2} \phi_{\mathrm{rj}}^{2}}{4\pi \sum_{\mathrm{i}} m_i \phi_{\mathrm{i}}^{2}}$$

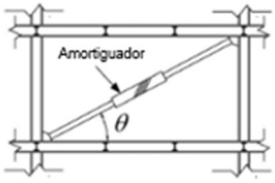
$$C = \frac{4\pi \xi_d \sum_{\mathrm{i}} mi \phi_{\mathrm{i}}^{2}}{T \sum_{\mathrm{j}} \mathrm{f}_{\mathrm{j}}^{2} \phi_{\mathrm{rj}}^{2}}$$

Donde

T	=	Periodo natural del primer modo de vibración
C	=	Coeficiente de amortiguación
α	=	número y los grados de libertad de los dispositivos, respectivamente.
f_j	=	factor de amplificación relacionado con la disposición geométrica del amortiguador.
ϕ_i	=	Desplazamientos modales horizontales del piso i.
ϕ_{rj}	=	Primer desplazamiento relativo modal entre los extremos del amortiguador j en la dirección horizontal.
mi	=	Masa

La energía se disipa debido a la fricción entre el fluido y las paredes del orificio. Los amortiguadores de fluidos viscosos se instalan dentro del esqueleto del marco de un edificio, por lo regular alineado con los contravientos, o entre las columnas y en las cubiertas de los puentes.

Factor de ampliación de configuración de instalación del amortiguador.

Configuración de instalación		Factor f
Amortiguador diagonal		cos θ

B) No lineales

Procedimiento de diseño de amortiguadores viscosos no lineales

En la fase de diseño, una vez que se ha calculado la amortiguación complementaria necesaria para la reconstrucción, el siguiente paso es dimensionar los equipos individuales para obtener la amortiguación complementaria requerida. Dependiendo del marco de diseño considerado, se puede utilizar la siguiente ecuación.

$$\xi_v = \xi_{ve1} \frac{\sum_{j=1}^{N_D} (2\pi)^{\alpha} T_{e1}^{2-\alpha} \lambda \, C f_j^{1+\alpha} D_{roof}^{\alpha-1} \phi_{rj1}^{1+\alpha}}{8\pi^3 \sum_{i=1}^{N} m_i \phi_{i1}^2}$$

Donde

C	=	coeficiente de amortiguación del dispositivo j.
λ	=	función de α.
ND y N	=	número y los grados de libertad de los dispositivos, respectivamente.
f_j	=	factor de amplificación relacionado con la disposición geométrica del amortiguador.
T_{e1}	=	período elástico del primer modo de vibración.
ϕ_{rj1}	=	diferencia entre las coordenadas modales relacionadas con los grados de libertad conectados por el amortiguador.
ϕ_{i1}	=	son las coordenadas modales y la masa del grado de libertad i, respectivamente.
m	=	Masa.
α	=	Constante exponencial del amortiguador viscoso no-lineal

En la siguiente ecuación muestra cómo se calcula el coeficiente de amortiguamiento de los disipadores considerando que todos los dispositivos tienen el mismo tamaño

$$C = \xi_{ve1} \frac{8\pi^3 \sum_{i=1}^{N} m_i \phi_{i1}^2}{(2\pi)^{\alpha} T_{e1}^{2-\alpha} \lambda f^{1+\alpha} D_{roof}^{\alpha-1}} \frac{\gamma_k}{\sum_{j=1}^{N_D} \gamma_j \phi_{rj1}^{1+\alpha}}$$

Amortiguadores de fluido viscoso lineales con α <1 (desde 0.1 a 1).Se determina la $\xi_{Diseño}$ para el modelo, y con ese valor se procede al diseño de los AFVs. Para la distribución se asignan dispositivos por cada entrepiso en forma simétrica de acuerdo con la geometría del modelo. Respecto a la configuración geométrica de los amortiguadores se propone la forma diagonal (Figura 5), ya que es la más utilizada en la práctica del diseño y rehabilitación de estructuras.

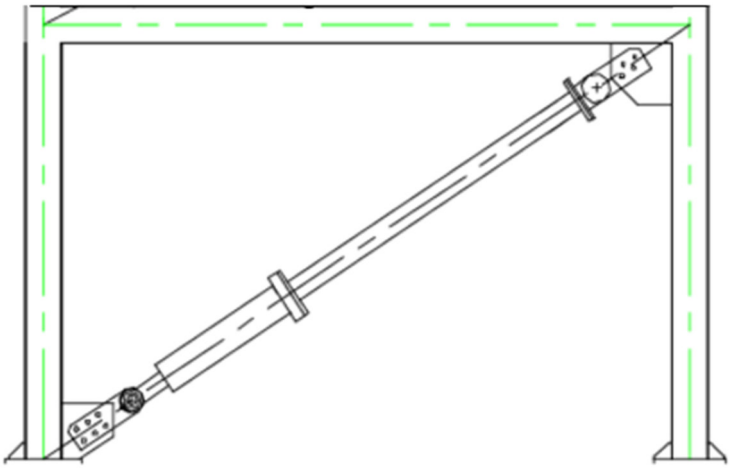


Figura 7: Amortiguador Diagonal

2) Análisis historia-tiempo.

Un análisis historia-tiempo permite una evaluación "realista y precisa" del comportamiento estructural bajo cargas dinámicas, como sismos. A diferencia de los métodos estáticos simplificados, este enfoque considera cómo varían las fuerzas a lo largo del tiempo, lo cual es vital para garantizar la seguridad de la estructura.

Unas de las razones principales para realizar este análisis son:

- Representación realista del comportamiento dinámico**:** Simula paso a paso la respuesta de la estructura a movimientos del suelo reales (registros sísmicos pasados) o cargas de viento, capturando el comportamiento dinámico real, incluyendo los efectos de resonancia y la amplificación de vibraciones en diferentes niveles.
- Evaluación del desempeño lineal: En eventos extremos, como sismos severos, las estructuras pueden experimentar deformaciones plásticas. El análisis no lineal tiempo-historia simula con precisión estos comportamientos complejos, como la degradación de la rigidez y la fluencia del acero, lo que es esencial para el diseño basado en rendimiento.
- Predicción de fallos: Ayuda a identificar puntos débiles y vulnerabilidades en la estructura bajo diferentes escenarios de carga dinámica, para prevenir fallos y garantizar la durabilidad.
- Obtención de información completa de la respuesta: A diferencia del análisis modal espectral, que proporciona valores máximos, el análisis tiempo-historia genera historiales completos de desplazamientos, velocidades, aceleraciones y fuerzas internas en cada elemento de la estructura a lo largo del tiempo.

Los análisis se efectuarán con ayuda del programa OpenSees. (McKenna & Scott, 2000).

OpenSees es un marco de software para desarrollar aplicaciones destinadas a simular el rendimiento de sistemas estructurales sometidos a sismos.

Para el análisis historia-tiempo se empleó el acelerograma correspondiente a la componente EW del sismo de Michoacán de 1985 registrado en la estación SCT. A partir de dicho registro se obtuvo su espectro de respuesta para fines de caracterización de la demanda sísmica.

3) Comparación y análisis de resultados

Determinar distorsiones de entrepiso

Con la finalidad de validar la evaluación, se determinan los perfiles de las distorsiones de los modelos diseñados para tres distintos casos:

- Estructuras sin amortiguadores
- Estructuras con amortiguadores lineales
- Estructuras con amortiguadores no-lineales

Con el cual se aproxima el amortiguamiento proporcionado por los disipadores de energía (AVC).

b. Interpretación de resultados.

Para las interpretaciones de los resultados se compararán los desplazamientos generados con los diferentes valores de los parámetros, representados en gráficas, estos valores son resultados del análisis en OpenSees.

Desplazamientos: Se obtienen gráficos y valores numéricos del desplazamiento de la estructura en puntos específicos (como los nodos de cada piso) a lo largo del tiempo. Un resultado clave es la deriva de piso, que es el desplazamiento relativo entre pisos adyacentes. Este valor es fundamental para evaluar el daño no estructural y la estabilidad global.

Al obtener los gráficos se calcula el coeficiente de variación, una medida estadística que expresa la dispersión, en relación con el valor promedio. Se compara la variabilidad entre los diferentes datos obtenidos de ñas desplazamientos, independientemente de sus unidades o magnitudes.

$$\mathrm{CV} = \frac{\sigma}{\mu} \text{ x } 100\%$$

Donde: $\sigma =$ desviación estándar. $\mu =$media aritmetica.

CAPÍTULO 3.

EJEMPLO DE APLICACIÓN

Modelo estructural.

En el siguiente ejemplo se presenta un análisis para una estructura de marcos planos de acero de nueve niveles con cinco crujías. Los materiales del modelo son a base de columnas y través de acero.

Considerando un esfuerzo de fluencia de Fy = 35153.48 y el módulo de elasticidad del acero E = 2038901.9 $\mathrm{kgf/cm^2}$

Masa actuante m = 9 Ton. (Masa para cada entrepiso).

Número de entrepisos 9. Se coloca un amortiguador por entrepiso en los extremos de la estructura, es decir 18 amortiguadores en total. Con una longitud de 9.96 m y un ángulo de 23°en cada amortiguador.

Cargas gravitacionales consideradas: aceleración de la gravedad.
Para el criterio de selección de perfiles se hizo un análisis modal espectral con el reglamento de diseño sísmico.

Se consideran tres casos con valores diferentes de amortiguamiento suplementario:

$\xi_d = 0.05$

$\xi_d = 0.10$

$\xi_d = 0.15$

Para estos tres se establece un amortiguamiento inherente para estructuras de acero con un valor de $\xi_0 = 0.02$

Se realizó el cálculo para los disipadores con parámetros para:

1) Distribución Uniforme.
2) Distorsión Modal.
3) Cortante basal.
4) Rigidez de entrepiso.
5) Energía de deformación cortante por entrepiso.

Las propiedades son las siguientes:

1. Parámetros del marco.

   9 @ 3.96 m. Altura del marco.

   Longitud 5 @ 9.14 m. Ancho de crujía.

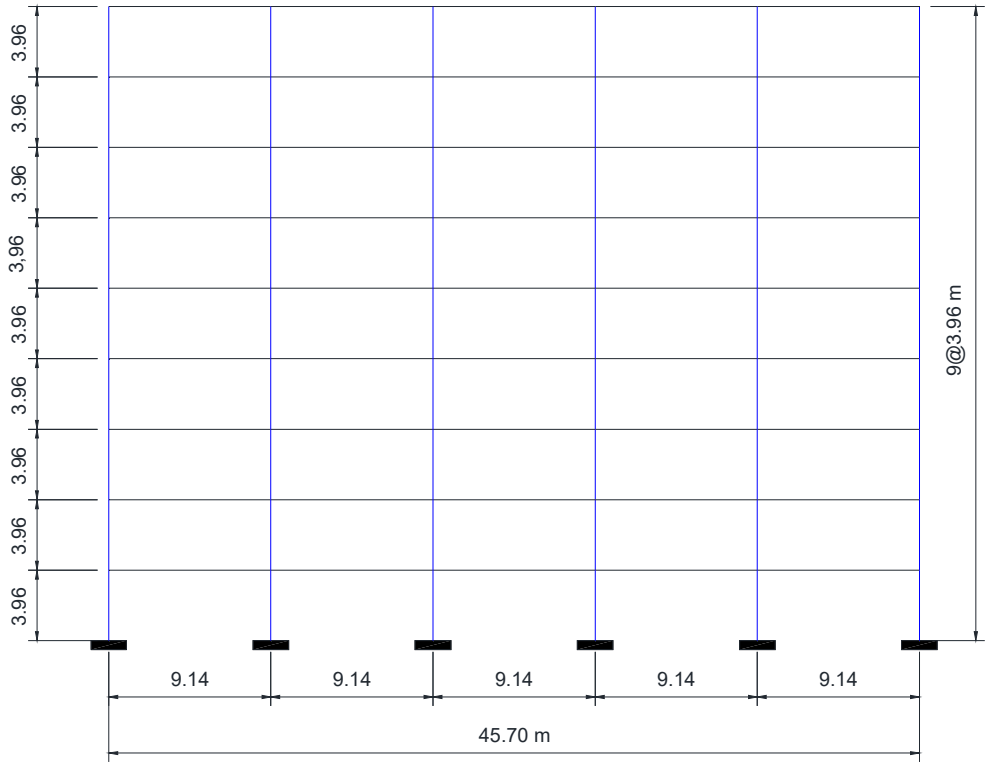


Figura 8: Diseño de la estructura por analizar.

2. La estructura de marcos planos de acero que se analiza es de nueve niveles con cinco crujías. Las propiedades de la sección transversal de las Columnas son las siguientes:

Columna.	Área de la sección transversal. (m^2)	Momento de inercia. (m^4)	Momento de fluencia. (t*m)
W14X233	0.0441	0.001252	349.70
W14X370	0.0703	0.002264	425.32
W14X283	0.0537	0.001598	312.20
W14X257	0.0488	0.001415	280.53

Tabla 2: Propiedades de las columnas.

Propiedades de las trabes son:

Trabe.	Área de la sección transversal. (m^2)	Momento de inercia. (m^4)	Momento de fluencia. (t*m)
W36 X 160	0.0303	0.004062	358.53
W36X135	0.0256	0.003247	293.19
W30X99	0.017	0.001503	179.72
W27X84	0.016	0.001186	140.53
W24X68	0.013	0.0007617	101.97

Tabla 3: Propiedades de las trabes.

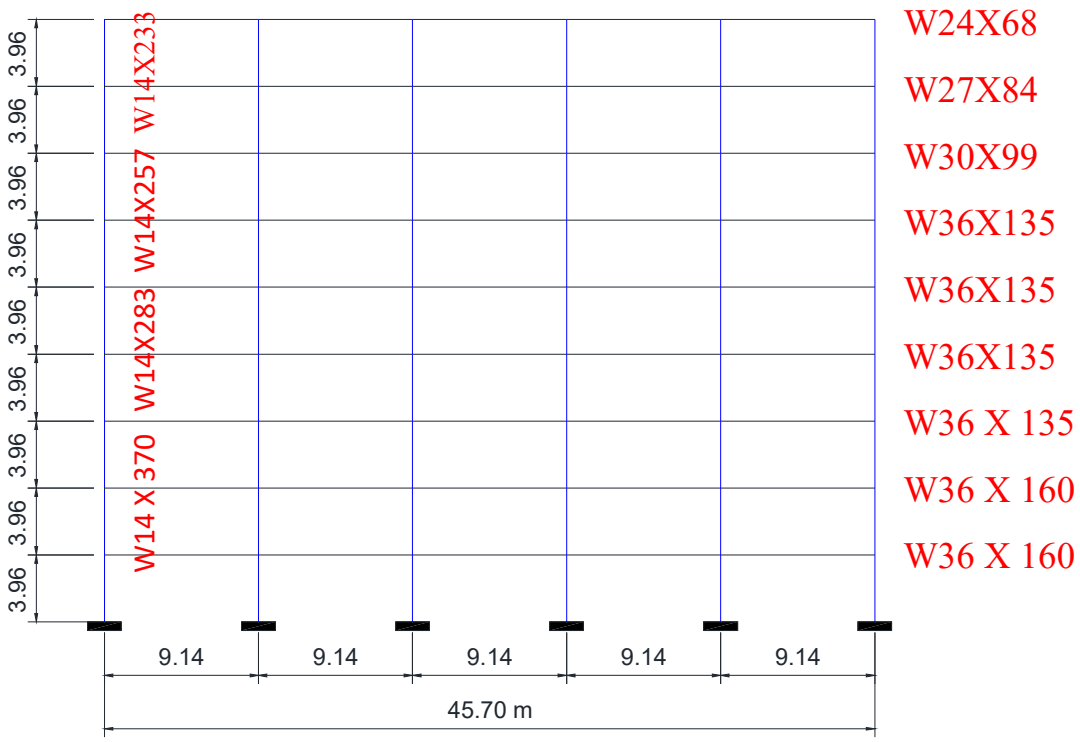


Figura 9: Diseño de estructura con columnas y trabes.

RESULTADOS DEL DISEÑO

Periodos obtenidos por entrepisos.

Periodos (T)
0.80761543
0.30804626
0.17346374
0.11692407
0.0855641
0.06548482
0.0529446
0.043562
0.03824664

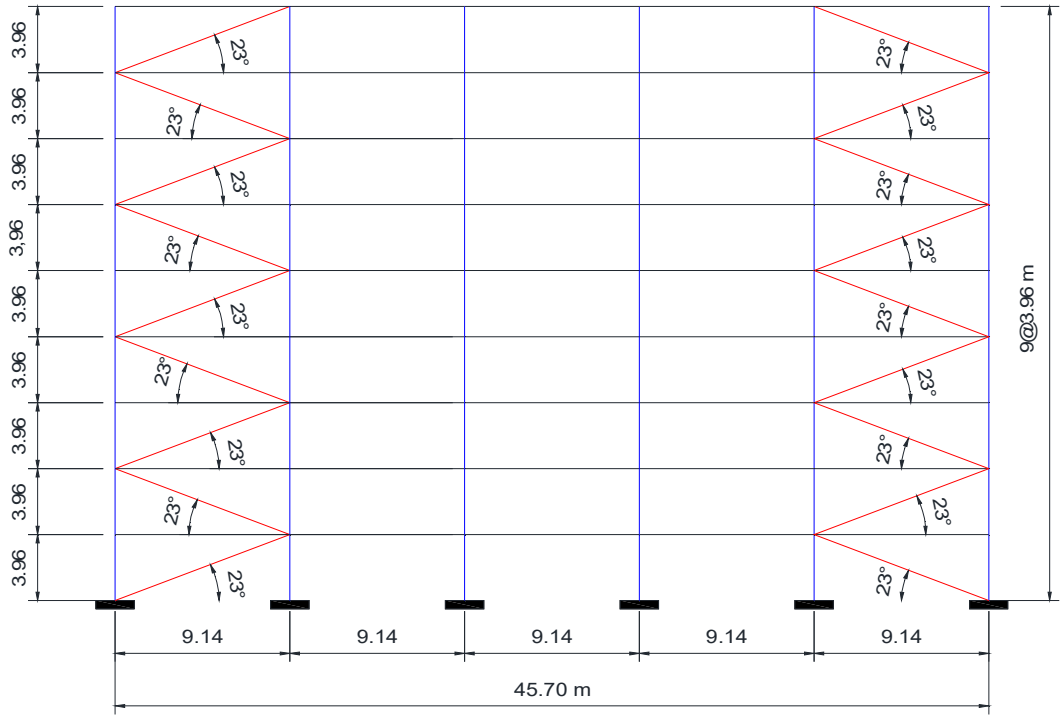


Figura 10: Estructura con amortiguadores diagonales en los extremos de la estructura.

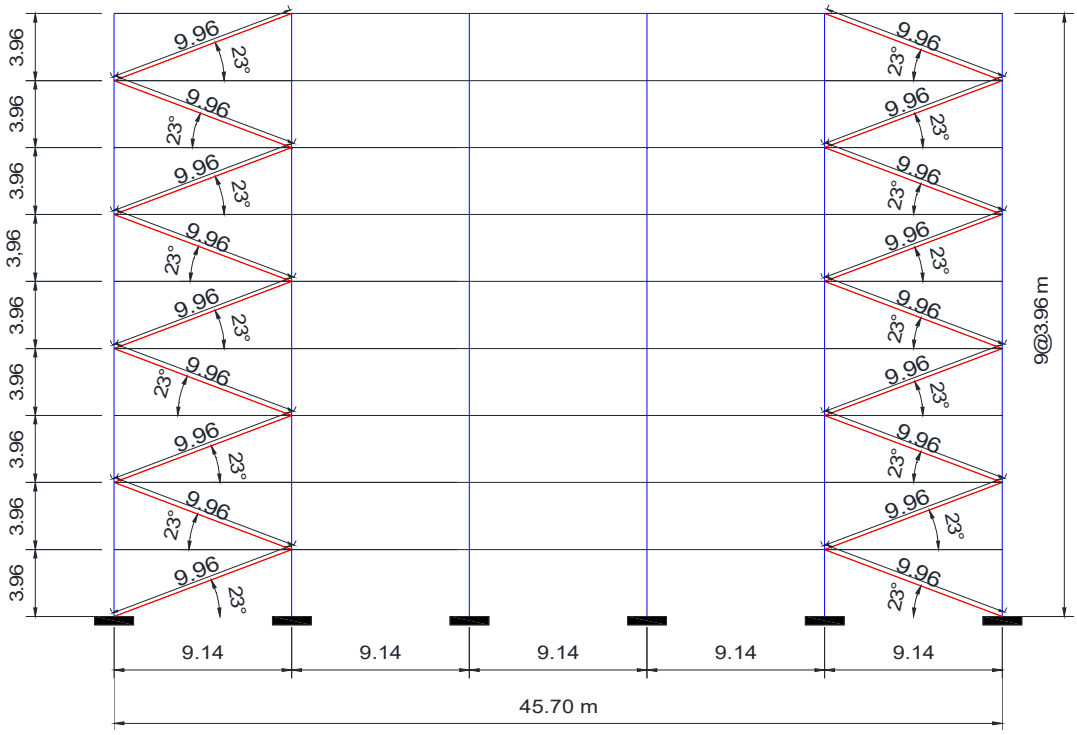


Figura 11: Dimensiones de amortiguadores

Número de entrepisos 9.

Amortiguador por entrepiso en los extremos de la estructura. Total, de 18 amortiguadores.

Longitud de 9.96 m

Ángulo de 23° en cada amortiguador.

Tablas de desplazamientos y distorsiones.

Tablas numéricas con valores máximos, mínimos y comparación directa entre valores de α.

ζ suplementario	α	Desplazamiento máximo	Distorsión máxima	C (KN*s/m)
5%	0.1	0.0635902	0.0567513	3.156
	0.2	0.0628119	0.0551242	5.176
	0.3	0.0620244	0.0534524	8.472
	0.4	0.0612231	0.0517512	13.847
	0.5	0.0603937	0.0499894	22.599
	0.6	0.0595076	0.0481421	36.835
	0.7	0.0586029	0.0462669	59.967
	0.8	0.0576376	0.0444095	97.515
	0.9	0.0566218	0.043166	158.406
	1	0.055516	0.0427307	257.065
10%	0.1	0.059958	0.001281301	6.313
	0.2	0.0587028	0.001251811	10.351
	0.3	0.0574377	0.001222449	16.944
	0.4	0.0561024	0.001192372	27.693
	0.5	0.0547287	0.001158776	45.198
	0.6	0.0533357	0.001123112	73.671
	0.7	0.0518754	0.001066556	119.934
	0.8	0.0503645	0.00101977	195.03
	0.9	0.0488068	0.000972908	316.812
	1	0.0472181	0.000925485	514.13
15%	0.1	0.0567513	0.001196327	9.469
	0.2	0.0551242	0.001159464	15.527
	0.3	0.0534524	0.001119286	25.416
	0.4	0.0517512	0.001072577	41.54
	0.5	0.0499894	0.001018699	67.797
	0.6	0.0481421	0.000960332	110.506
	0.7	0.0462669	0.000899566	179.902
	0.8	0.0444095	0.000842704	292.545
	0.9	0.043166	0.000771403	475.218
	1	0.0427307	0.000762883	771.195

Tabla 4: Distribución Uniforme.

ζ suplementario	α	Desplazamiento máximo	Distorsión máxima	C (KN*s/m)
5%	0.1	0.0636301	0.001381556	2.399
	0.2	0.0628301	0.001361199	3.925
	0.3	0.0620403	0.0013425	6.412
	0.4	0.061234	0.001324209	10.458
	0.5	0.0603853	0.001305638	17.033
	0.6	0.0595143	0.001287474	27.708
	0.7	0.0586171	0.001267908	45.02
	0.8	0.0576589	0.001246122	73.07
	0.9	0.0566534	0.001223597	118.476
	1	0.0555589	0.001196939	191.915
10%	0.1	0.0599839	0.001295408	4.798
	0.2	0.0587128	0.001265077	7.851
	0.3	0.0574291	0.001237041	12.824
	0.4	0.056095	0.001206735	20.915
	0.5	0.0547232	0.001175026	34.066
	0.6	0.0533513	0.001142602	55.416
	0.7	0.051926	0.001096429	90.04
	0.8	0.0504431	0.001054643	146.14
	0.9	0.0489043	0.001012321	236.951
	1	0.0473502	0.000969796	383.831
15%	0.1	0.0567452	0.001220816	7.198
	0.2	0.0550915	0.001183112	11.776
	0.3	0.0534072	0.001143801	19.236
	0.4	0.0517155	0.001100714	31.373
	0.5	0.0499941	0.001052679	51.1
	0.6	0.0481884	0.000999668	83.124
	0.7	0.0463375	0.000945918	135.061
	0.8	0.0445183	0.000895459	219.21
	0.9	0.0432368	0.000794821	355.427
	1	0.0428024	0.000786531	575.746

Tabla 5: Distorsión Modal.

ζ suplementario	α	Desplazamiento máximo	Distorsión máxima	C (KN*s/m)
5%	0.1	0.0637892	0.001415612	5.457
	0.2	0.0630043	0.001395765	8.942
	0.3	0.0622113	0.001374821	14.627
	0.4	0.0613878	0.001353061	23.889
	0.5	0.0605336	0.001331071	38.958
	0.6	0.0596364	0.00130898	63.447
	0.7	0.0587221	0.001288827	103.2
	0.8	0.0577612	0.0012675	167.665
	0.9	0.0567452	0.001245077	272.101
	1	0.055687	0.00122176	441.138
10%	0.1	0.0602628	0.001335638	10.914
	0.2	0.0589418	0.00130551	17.884
	0.3	0.0576279	0.001274133	29.255
	0.4	0.0562257	0.001241658	47.778
	0.5	0.0548386	0.001210204	77.916
	0.6	0.053407	0.001177628	126.894
	0.7	0.0520186	0.001152704	206.4
	0.8	0.050677	0.001124821	335.33
	0.9	0.0492705	0.001094974	544.202
	1	0.0477807	0.001064617	882.276
15%	0.1	0.0571619	0.001275918	16.371
	0.2	0.0553537	0.001233444	26.826
	0.3	0.0535453	0.001191786	43.882
	0.4	0.0517845	0.001152092	71.667
	0.5	0.0500228	0.001113189	116.875
	0.6	0.0483352	0.001077194	190.341
	0.7	0.0466436	0.001040561	309.601
	0.8	0.0449187	0.001003954	502.995
	0.9	0.0436124	0.000848699	816.303
	1	0.0431113	0.000837832	1323

Tabla 6: Cortante Basal.

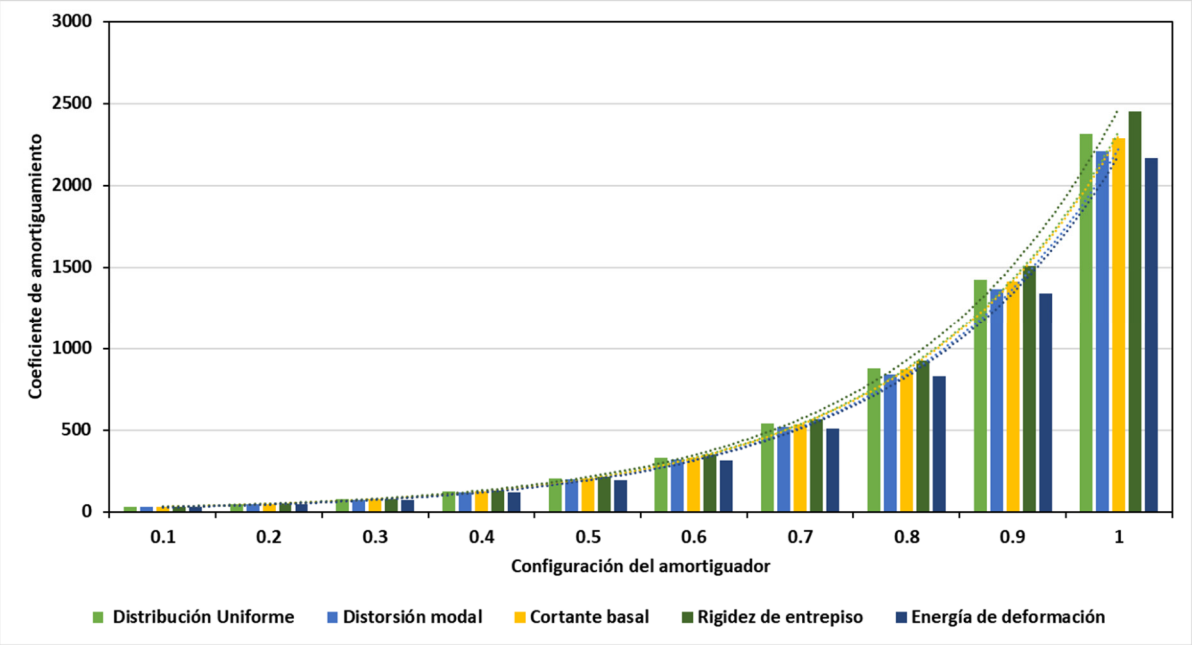
ζ suplementario	α	Desplazamiento máximo	Distorsión máxima	C (KN*s/m)
5%	0.1	0.0637961	0.00141301	8.039
	0.2	0.0630206	0.001393852	13.216
	0.3	0.0622416	0.001373673	21.69
	0.4	0.0614238	0.001352398	35.53
	0.5	0.0605708	0.001330536	58.131
	0.6	0.0596854	0.00130898	94.957
	0.7	0.0587717	0.001289107	154.908
	0.8	0.0578123	0.001267959	252.393
	0.9	0.0567936	0.001245893	410.749
	1	0.0557354	0.001223214	667.73
10%	0.1	0.0605111	0.001346837	16.078
	0.2	0.0591422	0.001311071	26.433
	0.3	0.0578021	0.001277015	43.379
	0.4	0.0563835	0.001242883	71.071
	0.5	0.0549874	0.001210587	116.261
	0.6	0.053554	0.001178776	189.914
	0.7	0.0521472	0.001152423	309.815
	0.8	0.0507956	0.001124923	504.786
	0.9	0.0493721	0.001095153	821.498
	1	0.0478676	0.001064872	1335
15%	0.1	0.057555	0.001285077	24.117
	0.2	0.0557128	0.001237423	39.649
	0.3	0.053863	0.001192551	65.069
	0.4	0.0520638	0.001151378	106.606
	0.5	0.05028	0.001112781	174.392
	0.6	0.0485625	0.001077296	284.872
	0.7	0.0468496	0.001041352	464.723
	0.8	0.0450953	0.001004923	757.18
	0.9	0.0436083	0.000847628	1232
	1	0.043105	0.000837194	2003

Tabla 7: Rigidez de Entrepiso.

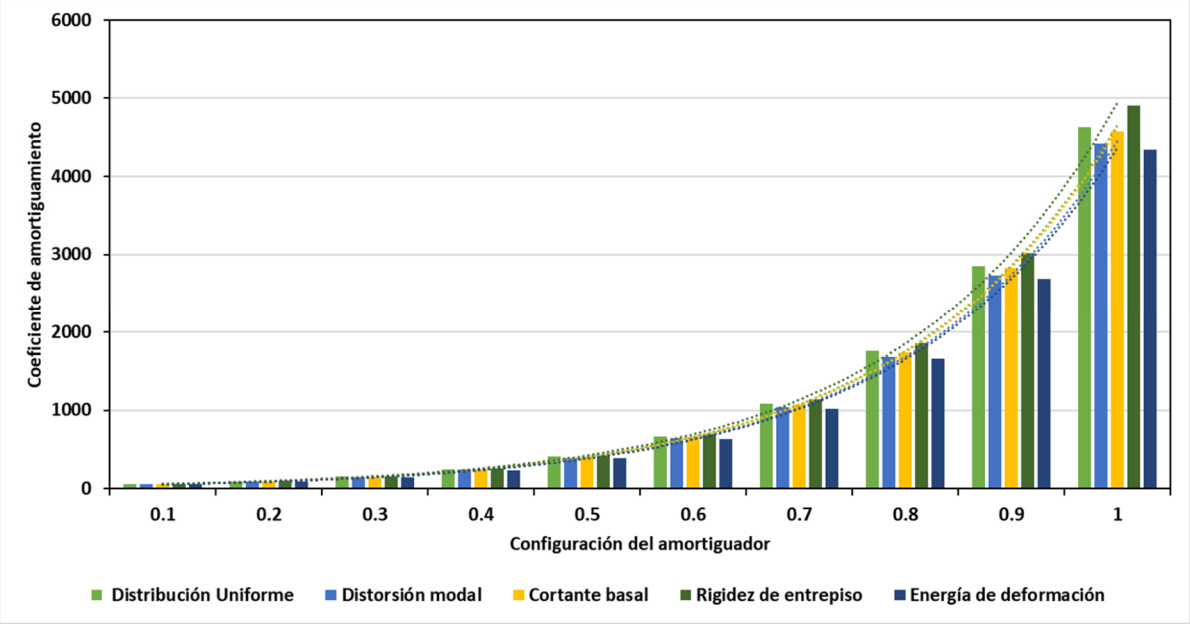
ζ suplementario	α	Desplazamiento máximo	Distorsión máxima	C (KN*s/m)
5%	0.1	0.0638172	0.00141977	3.596
	0.2	0.0630294	0.001399898	5.877
	0.3	0.062232	0.001378827	9.589
	0.4	0.0612231	0.001318444	15.623
	0.5	0.0603937	0.00129875	25.417
	0.6	0.0595076	0.001279235	41.3
	0.7	0.0586029	0.001258214	67.026 2
	0.8	0.0576376	0.001234949	108.657
	0.9	0.0566218	0.001210357	175.964
	1	0.055516	0.001181122	284.69
10%	0.1	0.0602694	0.001337704	7.192
	0.2	0.0589434	0.001307117	11.754
	0.3	0.0576375	0.001275944	19.178
	0.4	0.056236	0.001243316	31.246
	0.5	0.0548605	0.001211276	50.835
	0.6	0.0534405	0.001179235	82.599
	0.7	0.0520841	0.001155995	134.051
	0.8	0.0507651	0.001129031	217.313
	0.9	0.0493795	0.001100561	351.929
	1	0.0479201	0.001070638	569.385
15%	0.1	0.0570559	0.001264592	10.787
	0.2	0.0552989	0.001228827	17.631
	0.3	0.0535359	0.001191556	28.768
	0.4	0.0518106	0.001154388	46.869
	0.5	0.0500782	0.001117066	76.252
	0.6	0.0484194	0.001082066	123.899
	0.7	0.0467571	0.001046046	201.077
	0.8	0.0450785	0.001010383	325.97
	0.9	0.0436107	0.00085	527.893
	1	0.04312	0.000839133	854.077

Tabla 8: Energía de deformación cortante por entrepiso.

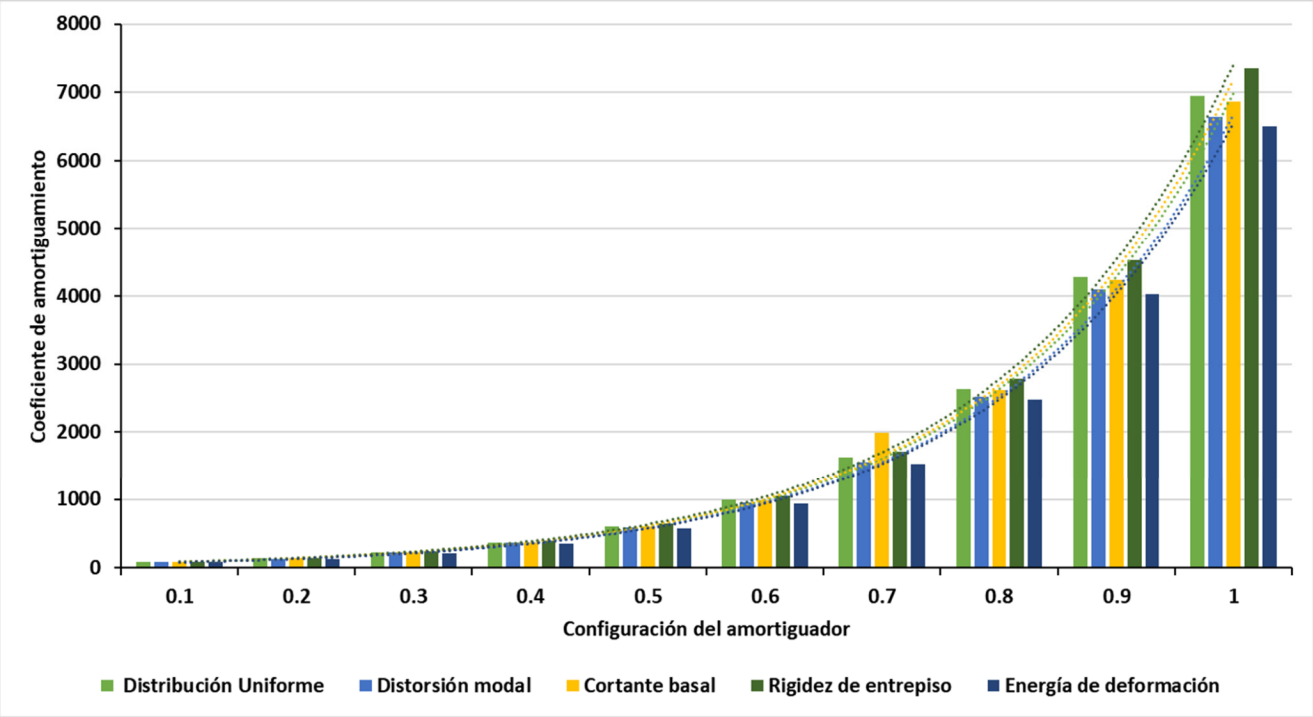
Graficas de configuraciones de amortiguadores.



Grafica 1. Configuraciones con un amortiguamiento suplementario de 0.05.



Grafica 2. Configuraciones con un amortiguamiento suplementario de 0.10.

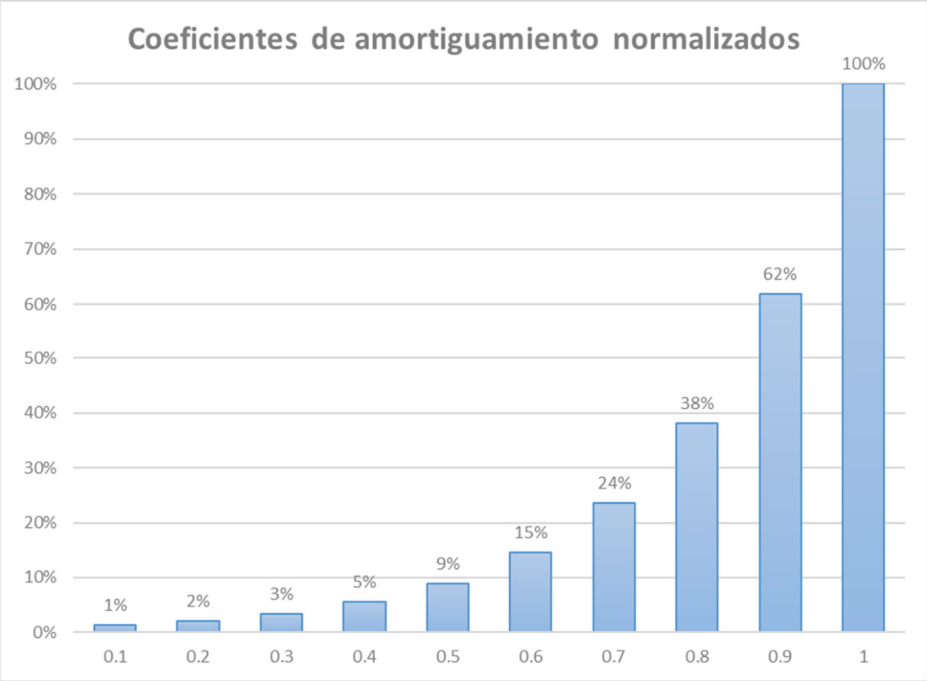


Grafica 3. Configuraciones con un amortiguamiento suplementario de 0.15.

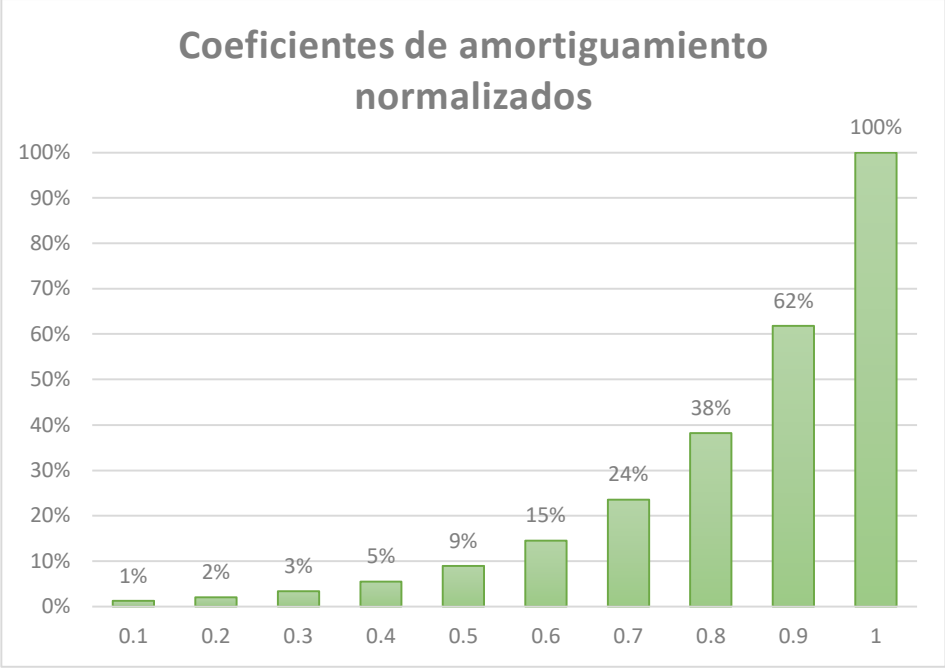
En las gráficas se muestra que no sigue una tendencia lineal, sino una exponencial, lo cual indica que no es proporcional. Así mismo se normalizaron los coeficientes de amortiguamiento para las distintas configuraciones y se encontró que no hay mucha diferencia, siendo la de $\alpha = 0.1$ el de menor tamaño.

Entre las configuraciones no cambia significativamente, conforme disminuye el valor de α cambia el valor del coeficiente de amortiguamiento.

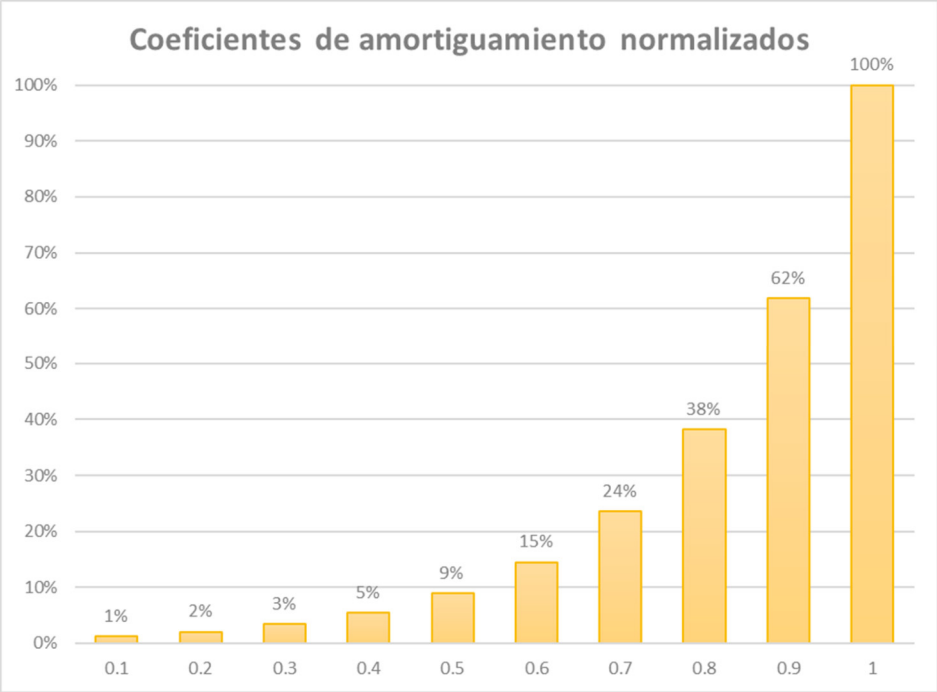
Graficas de coeficientes de amortiguamiento normalizados.



Grafica 4. Coeficientes de amortiguamiento normalizado para 0.05.

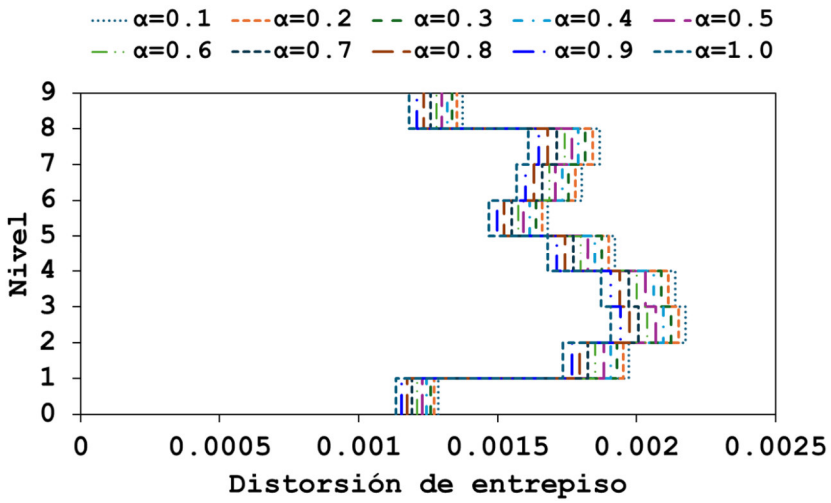


Grafica 5. Coeficientes de amortiguamiento normalizado para 0.10.

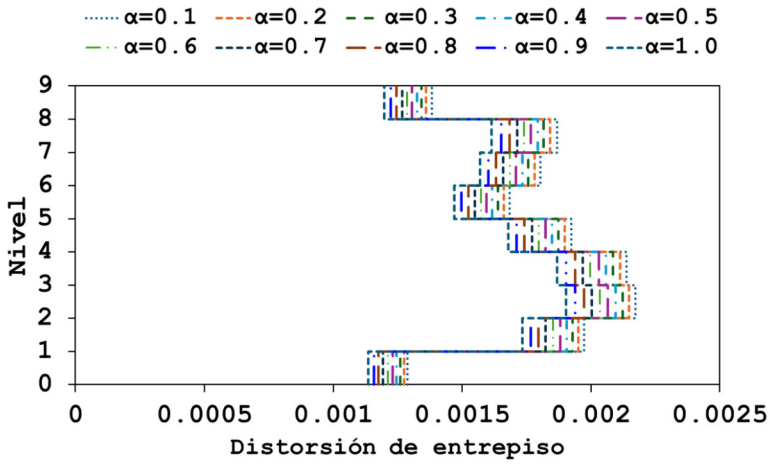


Grafica 5. Coeficientes de amortiguamiento normalizado para 0.15.

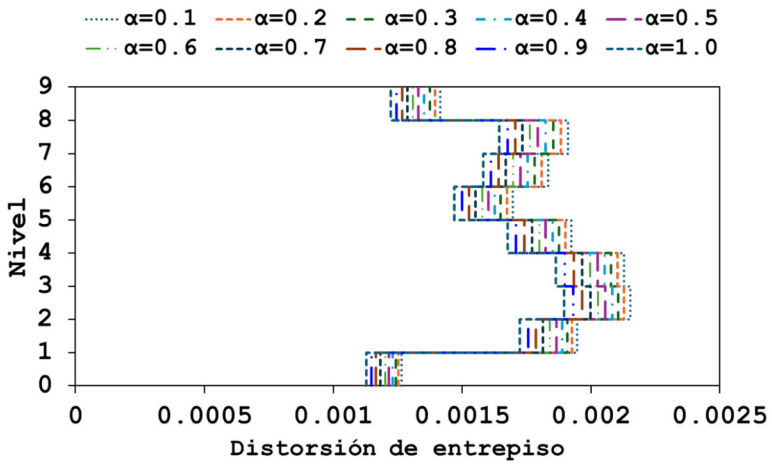
Resultados de distorsiones con un amortiguamiento suplementario de 0.05.



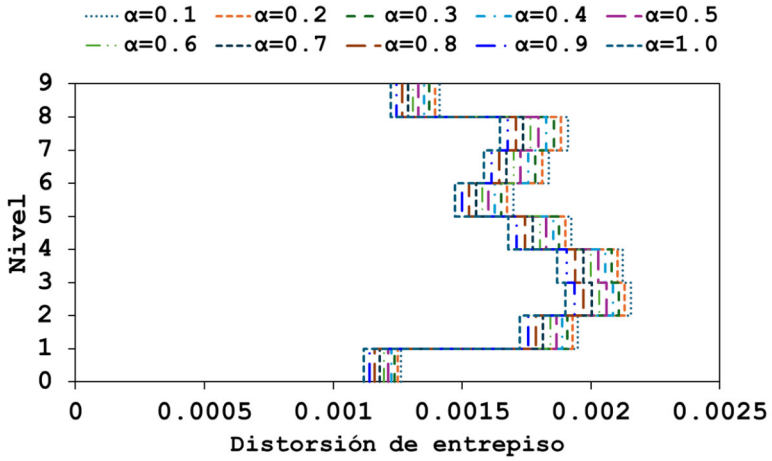
1) Distribución Uniforme.



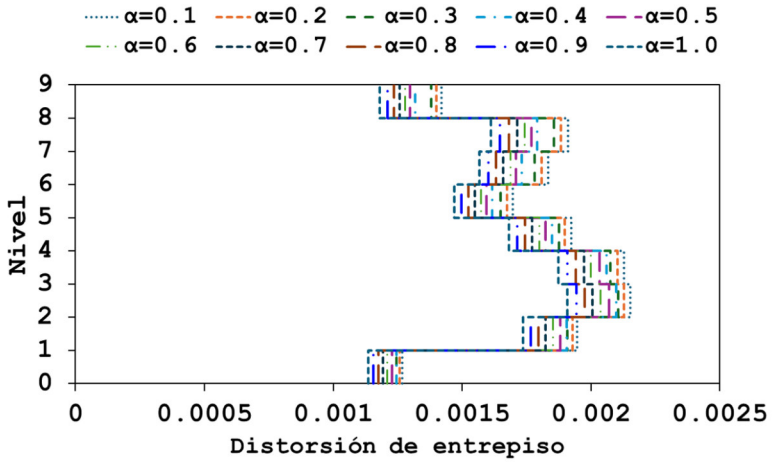
2) Distorsión Modal.



3) Cortante Basal.



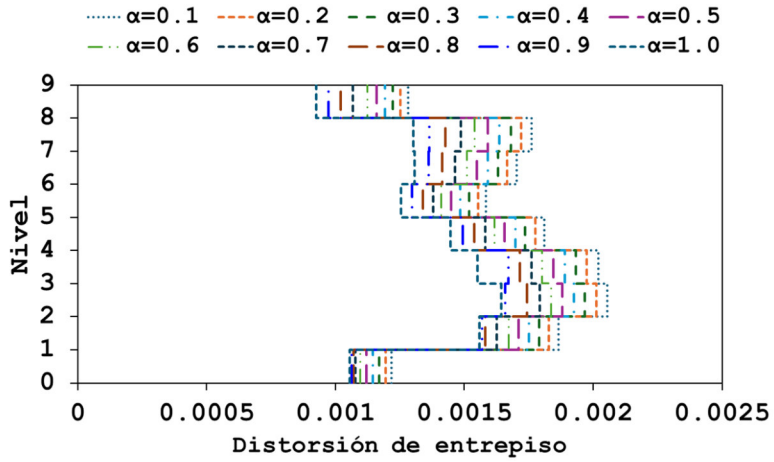
4) Rigidez de entrepiso.



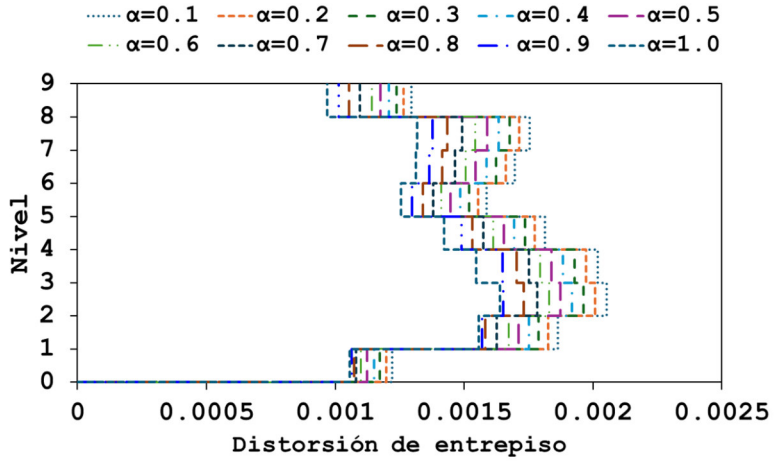
5) Energía de deformación cortante por entrepiso.

Figura 12: Distorsiones de entrepisos con un amortiguamiento suplementario de 0.05.

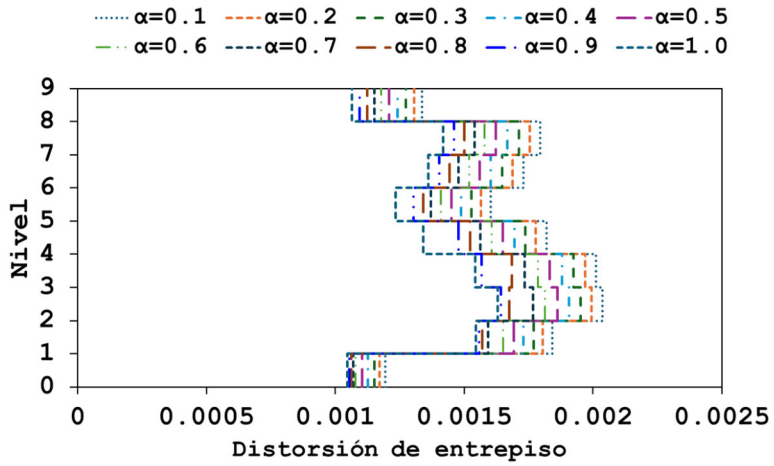
Resultados de distorsiones con un amortiguamiento suplementario de 0.10.



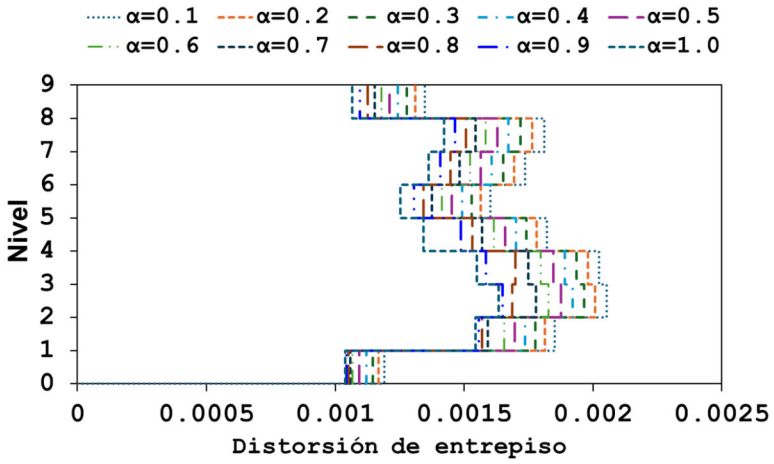
1) Distribución Uniforme.



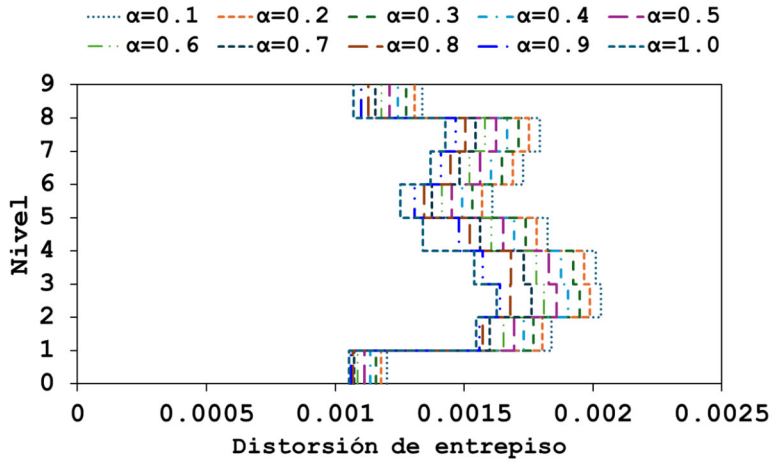
2) Distorsión Modal.



3) Cortante Basal.



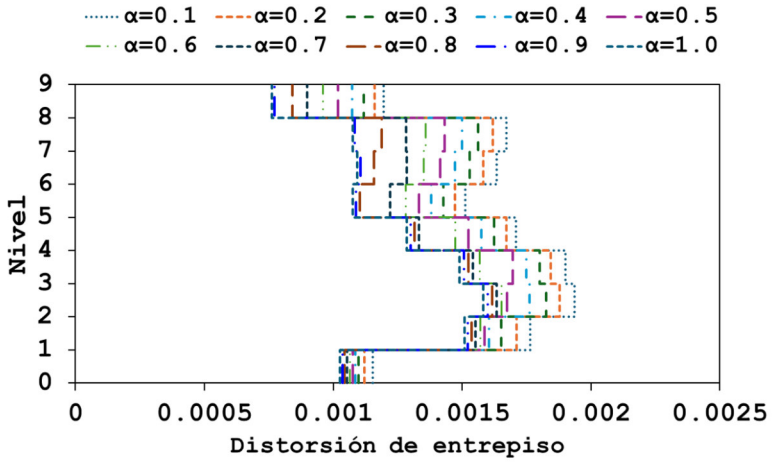
4) Rigidez de entrepiso.



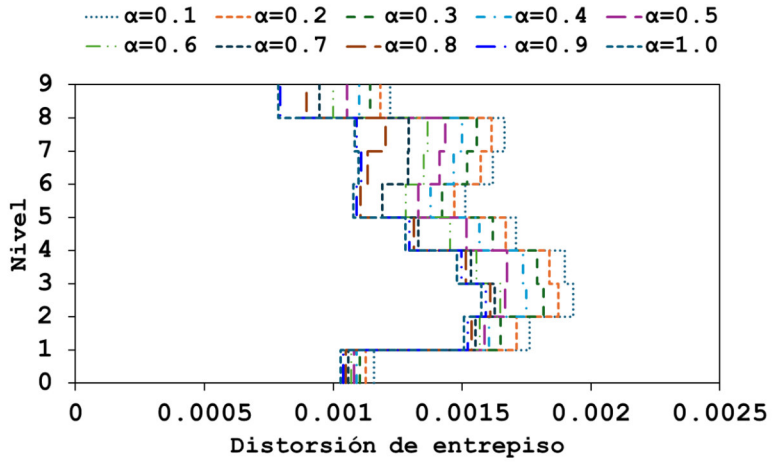
5) Energía de deformación cortante por entrepiso.

Figura 13: Distorsiones de entrepisos con un amortiguamiento suplementario de 0.10.

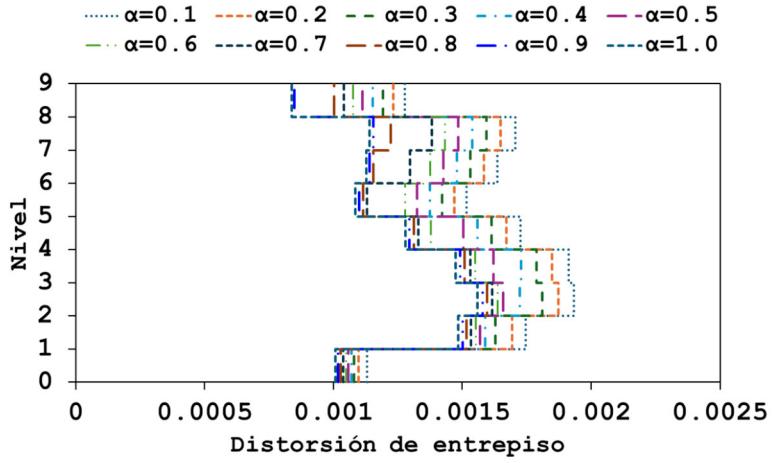
Resultados de distorsiones con un amortiguamiento suplementario de 0.15.



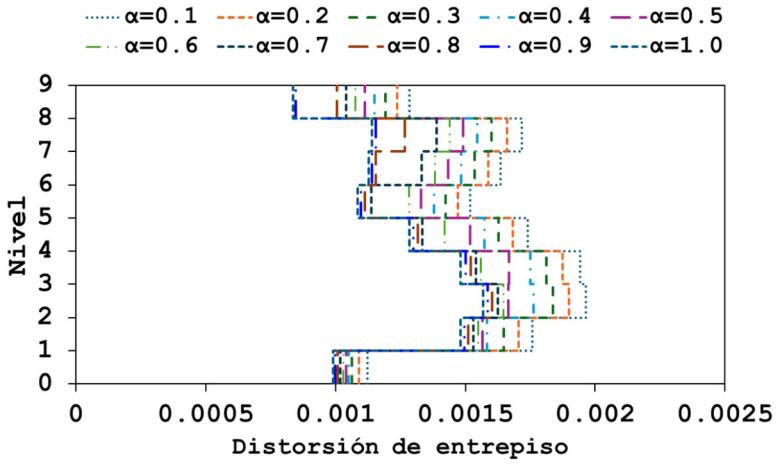
1) Distribución Uniforme.



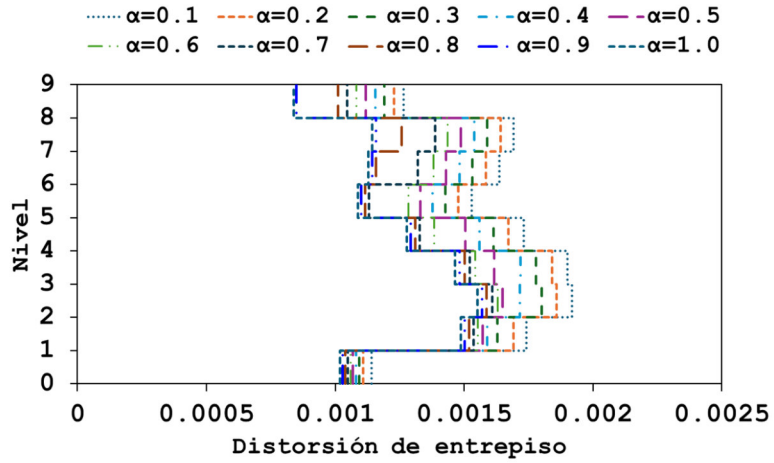
2) Distorsión Modal.



3) Cortante Basal.



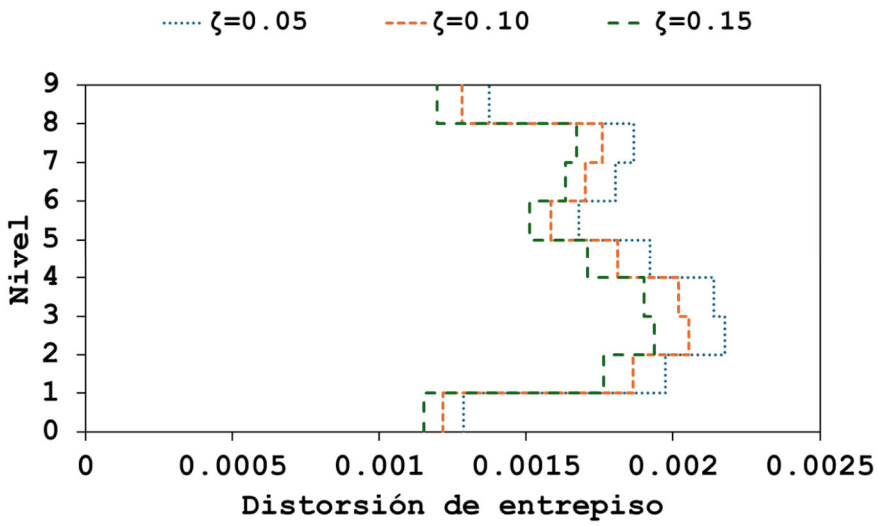
4) Rigidez de entrepiso.



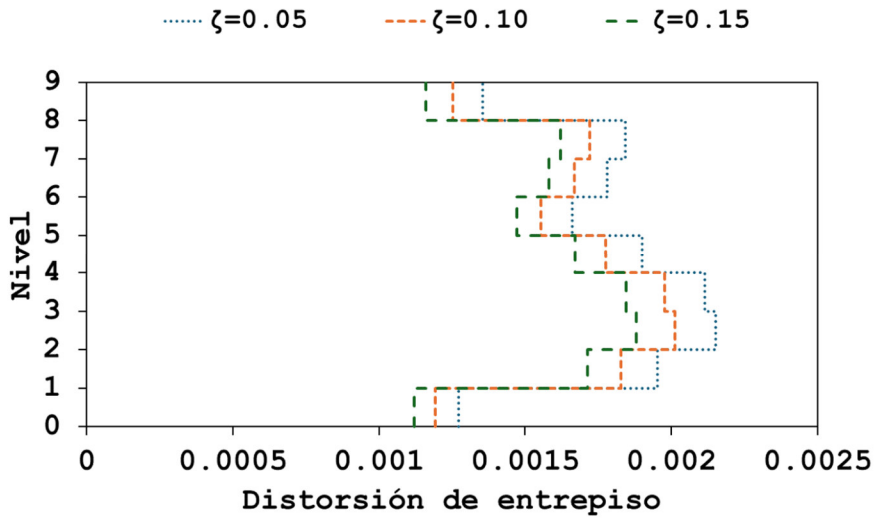
5) Energía de deformación cortante por entrepiso.

Figura 14: Distorsiones de entrepisos con un amortiguamiento suplementario de 0.15.

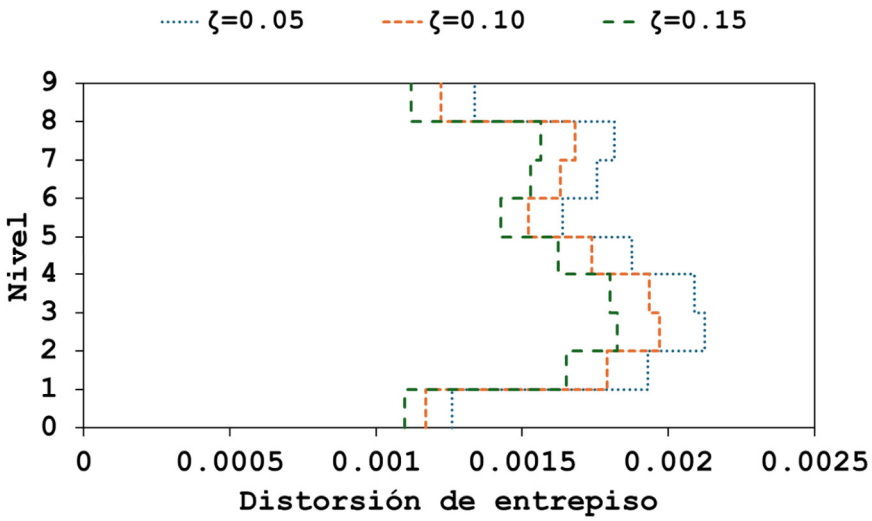
Resultados de distorsiones comparando parámetros de α, con los diferentes valores de amortiguamiento suplementario de 0.05, 0.10 y 0.15.



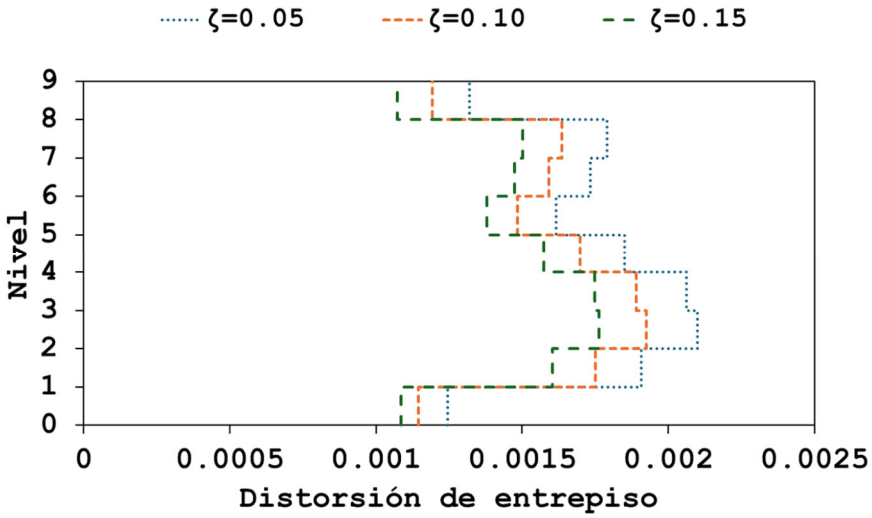
1) α = 0.1.



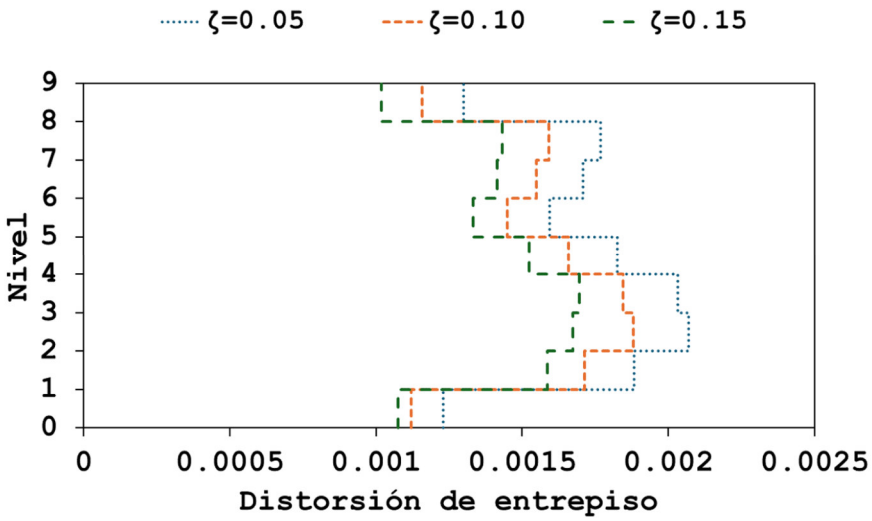
2) α = 0.2



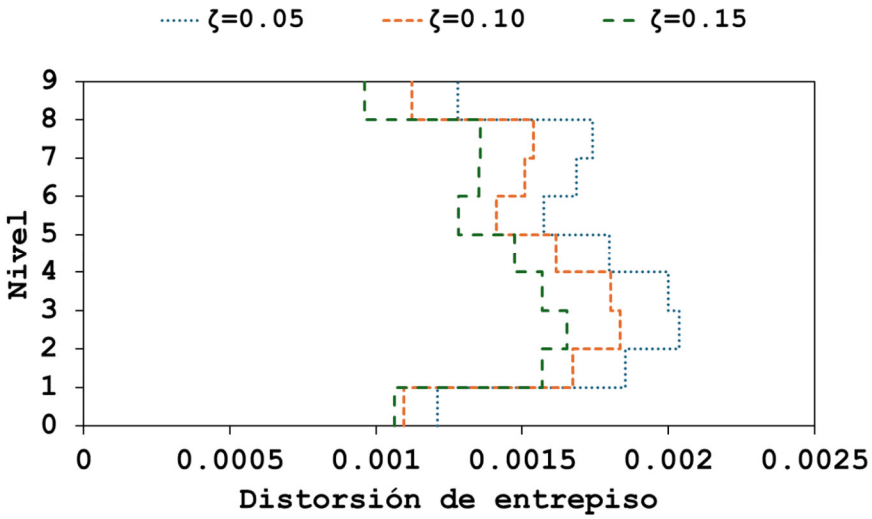
3) $\alpha = 0.3$



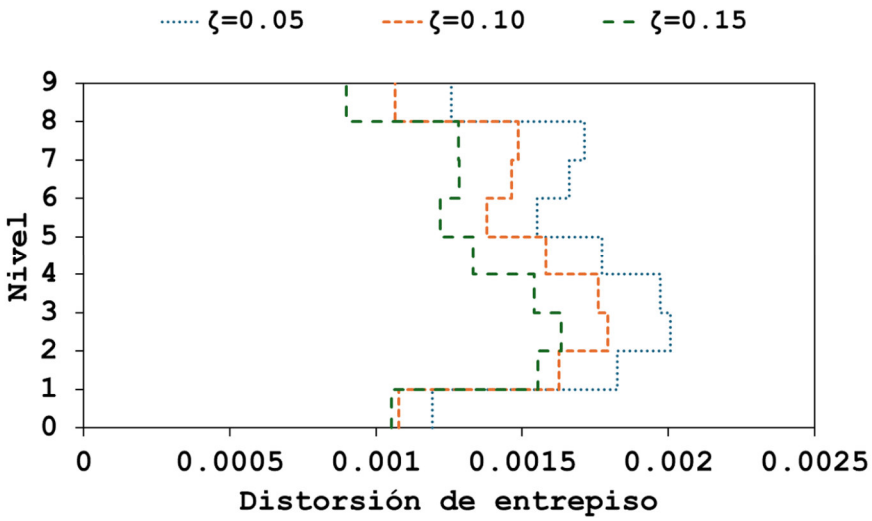
4) $\alpha = 0.4$


ζ=0.05
ζ=0.10
ζ=0.15
Nivel
9
8
7
6
5
4
3
2
1
0
0
0.0005
0.001
0.0015
0.002
0.0025
Distorsión de entrepiso

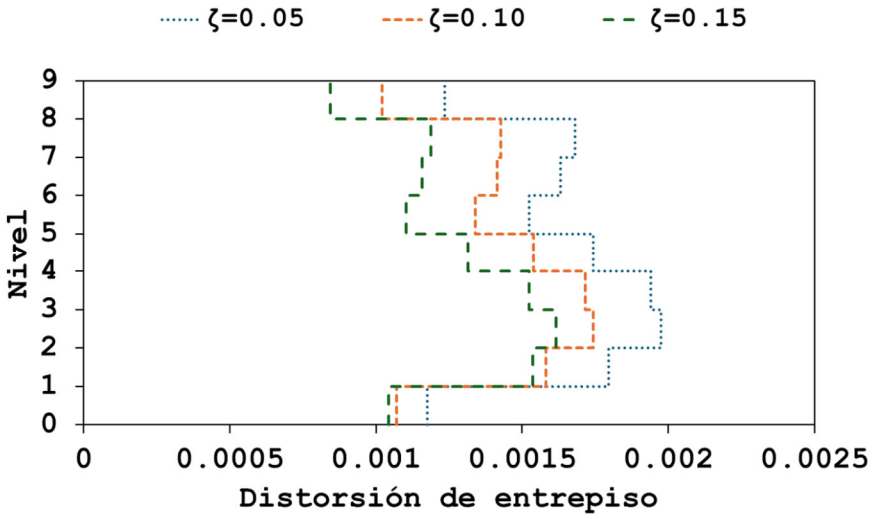
5) α = 0.5.


ζ=0.05
ζ=0.10
ζ=0.15
Nivel
9
8
7
6
5
4
3
2
1
0
0
0.0005
0.001
0.0015
0.002
0.0025
Distorsión de entrepiso

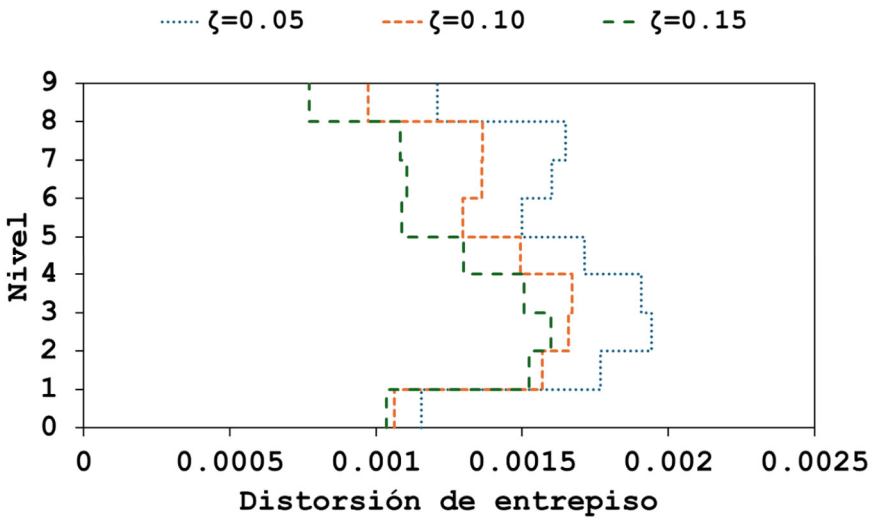
6) α = 0.6.



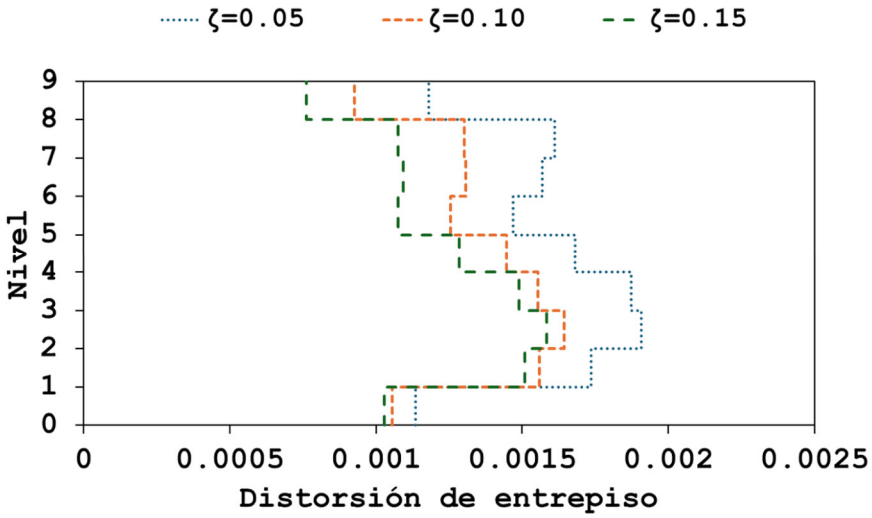
7) $\alpha = 0.7$



8) $\alpha = 0.8$



9) α = 0.9



10) α = 1.0

Figura 15: Distorsiones comparando parámetros de α, con los diferentes valores de amortiguamiento suplementario de 0.05, 0.10 y 0.15.

.

Coeficiente de variación.

El coeficiente de variación refleja la dispersión espacial de los desplazamientos entre niveles o configuraciones analizadas, no la variabilidad registro-a-registro de la demanda sísmica.

Representado con la fórmula:

$$CV = (s / \bar{x}) \times 100\ \%$$

Donde:

s = desviación estándar.

$\bar{x}$ = media aritmética.

CV = coeficiente de variación.

Datos

Varianza	0.0003294
Desviación estándar	0.0181486
Media aritmética	0.0337464
Coeficiente de variación	0.5377933

$$CV = (0.0181486/0.0337464) \times 100\ \%$$

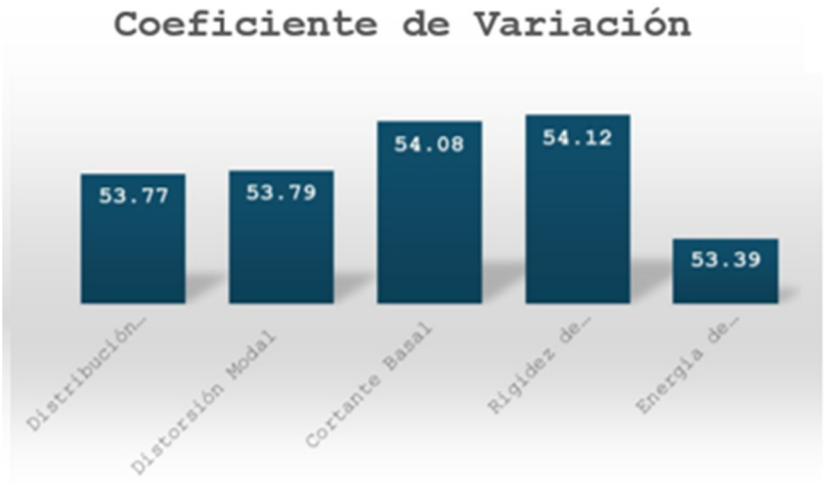
$$CV = 53\ \%$$

De acuerdo a los desplazamientos obtenidos se obtuvo el coeficiente de variación ya que permite comparar la dispersión o variabilidad. Un coeficiente de variación del 53 % en los desplazamientos de una estructura con amortiguadores indica una alta dispersión de los resultados respecto al valor medio.

Interpretación.

- CV < 10 %: variabilidad baja, resultados muy consistentes.

- 10 % ≤ CV < 30 %: variabilidad moderada.
- 30 % ≤ CV < 50 %: variabilidad alta.
- CV > 50 %: variabilidad muy alta.



Por lo tanto, un coeficiente de variación de 53 % sugiere que los desplazamientos obtenidos presentan una dispersión considerable alrededor de la media.

Un coeficiente de variación de 53 % puede indicar que:

La respuesta estructural es muy sensible a las características de los registros sísmicos utilizados, produciendo desplazamientos significativamente diferentes entre eventos.

Los amortiguadores reducen los desplazamientos promedio, pero la efectividad varía de un sismo a otro.

Existe una incertidumbre importante en la demanda sísmica, por lo que conviene evaluar no solo el promedio, sino también valores máximos, mínimos y percentiles.

Discusión.

Los resultados obtenidos muestran que la incorporación de amortiguamiento suplementario mediante amortiguadores de fluido viscoso produce una reducción de los desplazamientos laterales en la estructura de acero. A medida que el nivel de amortiguamiento aumenta de 0.05 a 0.10 y posteriormente a 0.15, se observa una disminución progresiva de las demandas de desplazamiento, lo que evidencia una mayor capacidad de disipación de energía durante la acción sísmica.

El incremento del amortiguamiento de 0.05 a 0.10 genera una ligera reducción de los desplazamientos, mientras que al aumentar a 0.15 se continúa mejorando el desempeño estructural, aunque con una tasa de reducción menor, indicando la posible existencia de rendimientos decrecientes para niveles elevados de amortiguamiento. Esto sugiere que, a partir de cierto valor, los beneficios adicionales en la disminución de desplazamientos pueden no ser proporcionales al incremento del amortiguamiento instalado.

Para los casos analizados, el amortiguamiento suplementario de 0.15 proporciona control de desplazamientos; sin embargo, la selección del nivel óptimo debe considerar también aspectos de costo, factibilidad constructiva y la relación beneficio-desempeño obtenida para cada configuración estructural.

En términos de desempeño sísmico, los sistemas con amortiguamiento presentan un mejor control de la respuesta dinámica, reduciendo la probabilidad de daños estructurales y no estructurales asociados a derivas laterales. Por lo tanto, la implementación de amortiguadores viscosos constituye una estrategia eficaz para mejorar la seguridad y funcionalidad de las estructuras de acero sometidas a excitaciones sísmicas.

El coeficiente de variación de 53 % obtenido en los desplazamientos indica una alta dispersión de la respuesta estructural respecto al valor promedio. Este resultado evidencia que, aunque los amortiguadores de fluido viscoso contribuyen a la reducción de los desplazamientos, la magnitud de dicha reducción depende significativamente de las características dinámicas de los registros sísmicos analizados. Por tanto, la respuesta estructural presenta una variabilidad considerable, reflejando la influencia de la incertidumbre inherente a la excitación sísmica.

En la evaluación del desempeño de estructuras de acero equipadas con amortiguadores de fluido viscoso no lineal, los desplazamientos constituyen uno de los principales indicadores de la efectividad del sistema de control sísmico. La comparación de los desplazamientos obtenidos para distintos valores del parámetro α permite analizar cómo la no linealidad del amortiguador influye en la respuesta estructural.

Los valores bajos de α tienden a producir una respuesta fuerza-velocidad más rectangular, lo que permite desarrollar fuerzas importantes incluso para velocidades moderadas. Esto puede mejorar la disipación de energía, pero también puede modificar la demanda máxima en los dispositivos y sus conexiones. Por ello, la selección de α no debe basarse únicamente en la reducción de desplazamientos, sino también en las fuerzas máximas, energía disipada y viabilidad constructiva.

Recomendaciones.

La aplicación eficiente de amortiguadores de fluido viscoso no lineales en estructuras de acero requiere un diseño integral que combine criterios estructurales, dinámicos y constructivos. Cuando se implementan correctamente, estos dispositivos permiten reducir significativamente la demanda sísmica, mejorar el desempeño estructural ante eventos sísmicos severos.

A partir de los resultados obtenidos se recomiendan los siguientes puntos:

- Usar más de un registro sísmico representativo del Valle de México.
- Escalar registros a un mismo nivel de intensidad.
- Reportar distorsiones máximas y no solo desplazamientos.
- Incluir fuerza máxima y energía disipada por amortiguador.
- Evaluar la sensibilidad de los resultados al amortiguamiento inherente.
- Comparar distribución uniforme, modal, cortante basal, rigidez y energía con tablas cuantitativas.
- Verificar que los dispositivos y conexiones sean constructivamente viables.
- Incorporar límites de distorsión conforme al reglamento o criterio de desempeño.
- Considere un análisis paramétrico del exponente α, debido a que este parámetro influye directamente en la capacidad de disipación de energía y en la reducción de desplazamientos y derivas estructurales.
- Para proyectos ubicados en zonas de alta sismicidad, se sugiere evaluar valores de α menores que la unidad, ya que estos pueden proporcionar una respuesta más eficiente en términos de control de desplazamientos y mejora del desempeño sísmico global de la estructura.

- La selección del valor óptimo de α debe realizarse considerando simultáneamente criterios de desempeño estructural, niveles de amortiguamiento alcanzados, demandas de fuerza en los dispositivos y viabilidad económica de la implementación.
- Se recomienda complementar los análisis con un conjunto amplio de registros sísmicos representativos de la amenaza sísmica local, con el fin de evaluar la variabilidad de la respuesta estructural y obtener resultados estadísticamente más confiables.
- Se sugiere analizar el comportamiento de amortiguadores viscosos no lineales en estructuras de acero de diferentes alturas, configuraciones geométricas e irregularidades estructurales para ampliar el alcance de los resultados obtenidos.
- Se recomienda validar los resultados numéricos que permitan verificar el comportamiento real de los amortiguadores de fluido viscoso no lineal bajo diferentes niveles de excitación sísmica.
- Para aplicaciones prácticas, se sugiere incorporar criterios basados en desempeño sísmico que permitan relacionar los distintos valores del parámetro α con objetivos específicos de desempeño, tales como ocupación inmediata, seguridad de vida o prevención del colapso.
- Finalmente, se recomienda fomentar la incorporación de sistemas de disipación de energía mediante amortiguadores de fluido viscoso no lineal en estructuras de acero, debido a su capacidad para reducir las demandas sísmicas y mejorar significativamente el comportamiento estructural ante eventos sísmicos severos.

Asimismo, se determina que la ubicación estratégica de los amortiguadores es un factor determinante en el desempeño global del sistema. Una distribución adecuada en altura y en los marcos con mayor demanda permite una disipación de energía

más uniforme, evitando concentraciones excesivas de deformación y reduciendo las derivas entre piso de manera significativa.

La correcta selección del coeficiente de amortiguamiento y del exponente de no linealidad es fundamental para lograr un equilibrio entre la reducción de desplazamientos y el control de fuerzas internas. Valores inadecuados pueden generar demandas excesivas en los elementos estructurales y en las conexiones.

Conclusiones

En primer lugar, se concluye que la efectividad de los amortiguadores depende directamente de su integración con el sistema estructural. Su aplicación resulta más eficiente en estructuras de acero con mecanismos claros de deformación, como marcos resistentes a momento, donde los dispositivos pueden aprovechar adecuadamente las velocidades relativas inducidas por la excitación sísmica.

La incorporación de amortiguadores de fluido viscoso no lineales en estructuras de acero constituye una estrategia eficaz de control pasivo de vibraciones orientada a mejorar el desempeño sísmico de edificaciones sometidas a excitaciones dinámicas severas. A partir de los estudios realizados, se observa reducción de desplazamientos uno de los efectos más relevantes de la instalación de amortiguadores de fluido viscoso no lineales. Al disipar parte significativa de la energía sísmica inducida, los AFV-NL limitan la respuesta inelástica de la estructura, reduciendo la probabilidad de daño tanto en elementos estructurales como no estructurales. Esta reducción de derivas contribuye al cumplimiento de los límites establecidos por reglamentos sísmicos y criterios de diseño basado en desempeño.

La implementación de amortiguadores de fluido viscoso no lineales incrementa la capacidad de disipación de energía mediante fuerzas dependientes de la velocidad relativa entre extremos, siguiendo una relación fuerza velocidad, donde existe el coeficiente de amortiguamiento y α (exponente de no linealidad).

Este comportamiento permite que los dispositivos se activen de manera más eficiente durante sismos de mayor intensidad, absorbiendo una fracción significativa de la energía que, en una estructura convencional, sería disipada mediante daño inelástico en vigas y columnas.

En conjunto, la implementación de amortiguadores de fluido viscoso no lineales en estructuras de acero permite mejorar de manera significativa el comportamiento sísmico, reducir daños estructurales y no estructurales. Por ello, estos dispositivos representan una solución eficiente y técnicamente viable para el diseño y reforzamiento sísmico de estructuras modernas bajo criterios de desempeño.

Cuando se emplean valores menores de α (por ejemplo, $\alpha < 1$), el amortiguador presenta un comportamiento más no lineal, generando fuerzas significativas incluso para velocidades moderadas. Esto favorece una mayor disipación de energía durante la excitación sísmica y, en consecuencia, una reducción más eficiente de los desplazamientos laterales.

Por otro lado, al aumentar el valor de α y acercarse a un comportamiento lineal ($\alpha \approx 1$), la capacidad de disipación depende más directamente de la velocidad de respuesta de la estructura. En estos casos, aunque los desplazamientos continúan siendo menores que los de la estructura sin control, la reducción puede resultar menos pronunciada en comparación con configuraciones de menor α.

El parámetro α constituye una variable fundamental en el diseño y desempeño de los amortiguadores de fluido viscoso no lineal, debido a su influencia sobre la relación fuerza–velocidad y, por consecuencia, sobre la capacidad de disipación de energía del sistema. La evaluación de diferentes valores de α permitió identificar que su efecto debe analizarse conjuntamente con el amortiguamiento suplementario, ya que la combinación de ambos parámetros determina la magnitud de los desplazamientos y distorsiones de entrepiso. En consecuencia, una adecuada selección de α puede contribuir a optimizar el control de la respuesta sísmica de estructuras de acero sometidas a excitaciones dinámicas.

Los resultados obtenidos indican que la incorporación de amortiguadores viscosos no lineales mejora significativamente el desempeño sísmico de la estructura de acero al limitar los desplazamientos máximos y reducir las demandas de deriva entre pisos. Asimismo, la tendencia observada demuestra que la selección adecuada del parámetro α influye directamente en la eficiencia del sistema de disipación de energía, permitiendo optimizar la respuesta estructural frente a diferentes niveles de excitación sísmica.

Se concluye también que la modelación numérica no lineal, particularmente mediante análisis historia–tiempo, es indispensable para evaluar de forma realista el comportamiento de estructuras equipadas con amortiguadores de fluido viscoso no lineales. Este tipo de análisis permite identificar la interacción entre la disipación adicional de energía y la respuesta inelástica del sistema estructural de acero.

La incorporación de amortiguadores de fluido viscoso redujo la respuesta lateral del marco de acero respecto al modelo sin dispositivos, lo que confirma la efectividad del amortiguamiento suplementario como estrategia de control sísmico pasivo. Sin embargo, la magnitud de la reducción depende del nivel de amortiguamiento considerado y del valor del exponente α, por lo que ambos parámetros deben evaluarse conjuntamente.

Referencias

ASCE/SEI. (7-2022). Minimum Design Loads and Associated Criteria. *Buildings and Other Structures*.

C&E, E. P. (26 de Feb de 2017). *EFE-PRIMA-CE*. Obtenido de https://www.efeprimace.co/sistemas-control-respuesta-sismica-edificaciones/

Constantinou, M., & Symans, M. (1992). *Experimental and analytical investigation of seismic response of structures with supplemental fluid viscous dampers. .* New York at Buffalo: University at Buffalo.

Detek. (Enero de 2026). *Detek Internacional* . Obtenido de https://www.detek.com.mx/automotriz/construccion/aisladores-s%C3%ADsmicos

Disipa. (Nov de 2025). *http://www.nuyuntek.cl/producto/amortiguador-o-disipador-viscoso/*. Obtenido de https://www.disipaing.com/disipadores-energia/

Lin, & Chopra. (2002). *Seleemah y Constantinou.* USA: Terenzi.

Marsh, P., & Fazio. (1980). *ResearchGate*. Obtenido de https://www.researchgate.net/figure/Figura-217-Dispositivo-de-friccion-desarrollado-por-Pall-Marsh-Fazio-1980_fig7_352106868

McKenna, F. F., & Scott, M. (Noviembre de 2000). *OpenSees*. Obtenido de https://opensees.berkeley.edu/v

Nuyuntek. (Nov de 2025). *Amortiguador o Disipador Viscoso*. Obtenido de http://www.nuyuntek.cl/producto/amortiguador-o-disipador-viscoso/

Rene, Z., & Roberto, U. (2017). *Design, testing and implementation of tadas devices in three rc buildings with shear walls and coupling beams.*

Rodriguez, M. (Febrero de 2026). *Sismica Institute*. Obtenido de https://sismica-institute.com/sistemas-de-proteccion-sismica/

- Bañuelos G. (2019). Desarrollo y validación de un procedimiento de diseño sísmico basado en desplazamientos y control de daño para edificios considerando disipación pasiva de energía, México, D.F.
- Chopra A. K. Dynamics of structures: theory and applications to earthquake engineering, volume 1. Prentice - Hall, Inc., Englewood Cliffs. N.J., 2012.
- Constantinou M. C. and Symans M. D. Experimental and analytical investigation of seismic response of structures with supplemental fluid viscous dampers. Technical Report NCEER-92-0032, National Center for Earthquake Engineering Research, State University of New York at Buffalo, 1992.
- Christopoulos, C, y A Filiatrault (2006), Principles of passive supplemental damping and seismic isolation, Pavia, Italia: Imprenta del IUSS.
- Lin W. H. and Chopra A. K. Earthquake response of elastic sdf systems with non-linear fluid viscous dampers. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 31(9):1623–1642, 2002
- Seleemah A. A. and Constantinou M. C. Investigation of seismic response of buildings with linear and nonlinear fluid viscous dampers. Technical report, State University of New York at Buffalo, New York NY, 1997.
- Terenzi, G (1999), "Dynamics of SDOF systems with non-linear viscous damping", Journal of Engineering Mechanics, (ASCE)