



**Aporte de disipadores sísmicos en la ecuación de equilibrio dinámico. Una revisión bibliográfica, 2025**

Jaime Eduardo Grecco Herrera  
Santiago Bermúdez Urrego

Monografía presentada para optar al título de Especialista en Análisis y Diseño de Estructuras

Asesor

Juan Fernando Velásquez Bedoya,  
Magíster (MSc) en Ciencias de la Ingeniería Sísmica

Universidad de Antioquia  
Facultad de Ingeniería  
Especialización en Análisis y Diseño de Estructuras  
Medellín, Antioquia, Colombia  
2025

<b>Cita</b>	(Grecco & Bermúdez, 2025)
<b>Referencia</b>	Grecco Herrera, J., & Bermúdez Urrego, S. (2025). <i>Aporte de disipadores sísmicos en la ecuación de equilibrio dinámico. Una revisión bibliográfica, 2025</i> [Trabajo de grado especialización]. Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.
<b>Estilo APA 7 (2020)</b>	



Especialización en Análisis y Diseño de Estructuras, cohorte 2024-I.



Seleccione biblioteca, CRAI o centro de documentación UdeA (A-Z)

**Repositorio Institucional:** <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - [www.udea.edu.co](http://www.udea.edu.co)

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

## Dedicatoria

*A mi pequeña Emma,*

*por traer un nuevo significado a mis días y ser la motivación detrás de cada paso en este camino. Que este trabajo sobre estructuras seguras sea también un símbolo del amor y protección que siempre te acompañarán.*

*Con todo mi corazón,*

*Jaime Grecco*

*A mi madre, mi mayor inspiración, quien con su amor y sabiduría me ha enseñado que las estructuras más fuertes se construyen con pasión y determinación. A mi padre, cuya fortaleza y responsabilidad me ha inspirado a construir mis sueños. Este trabajo es un reflejo de su apoyo constante y su fe en mí. Gracias por ser el cimiento de mis logros.*

*Santiago Bermúdez*

## Agradecimientos

Queremos dedicar un agradecimiento especial a nuestras familias, quienes con su amor incondicional y apoyo constante nos brindaron la fuerza y el aliento necesarios para alcanzar esta meta. Gracias por estar presentes en cada paso, por sus palabras de ánimo, y por entender las horas de dedicación que este proyecto requirió.

## Tabla de contenido

<b>Resumen</b> .....	<b>9</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>10</b>
<b>Introducción</b> .....	<b>11</b>
<b>1. Planteamiento del problema</b> .....	<b>14</b>
<b>2. Antecedentes</b> .....	<b>14</b>
<b>3. Justificación</b> .....	<b>16</b>
<b>4. Objetivos</b> .....	<b>16</b>
<b>5. Hipótesis</b> .....	<b>17</b>
<b>6. Marco teórico</b> .....	<b>18</b>
<b>6.1. Aisladores</b> .....	<b>19</b>
<b>6.2. Disipadores</b> .....	<b>23</b>
<b>6.2.1. Dispositivos dependientes del desplazamiento o histeréticos</b> .....	<b>26</b>
<b>6.2.1.1. Dispositivos que disipan energía por fluencia del material:</b> .....	<b>26</b>
<b>6.2.1.2. Disipadores por fricción:</b> .....	<b>30</b>
<b>6.2.2. Dispositivos dependientes de la velocidad</b> .....	<b>32</b>
<b>6.2.3. Dispositivos dependientes del desplazamiento y la velocidad o mixtos.</b> .....	<b>33</b>
<b>7. Metodología</b> .....	<b>35</b>
<b>8. Resultados</b> .....	<b>36</b>
<b>8.1. Dispositivos dependientes del desplazamiento</b> .....	<b>36</b>
<b>8.2. Dispositivos dependientes de la velocidad</b> .....	<b>42</b>
<b>8.3. Dispositivos dependientes del desplazamiento y la velocidad</b> .....	<b>49</b>
<b>9. Discusión</b> .....	<b>54</b>
<b>10. Conclusiones</b> .....	<b>57</b>
<b>11. Recomendaciones</b> .....	<b>58</b>

**12. Referencias.....61**

## Lista de tablas

Tabla 1. Resultados de ambos modelos de rehabilitación vs estructura original. (Reyes & Rubiano, 2002).....	37
Tabla 2. Desplazamientos máximos con y sin disipadores. (Rodríguez, Aguilar, & Medina, 2014).....	40
Tabla 3. Número de rotulas plásticas con y sin disipadores. (Rodríguez, Aguilar, & Medina, 2014).....	41
Tabla 4. Factores de sobre resistencia. (Rodríguez, Aguilar, & Medina, 2014).....	42
Tabla 5. Porcentaje de disipación de energía en la edificación con disipadores de fluido viscoso. (Villareal & Díaz, 2016).....	45
Tabla 6. Ventajas y desventajas de los disipadores sísmicos. (Genatios & Lafuente, 2016).....	56

## Lista de figuras

Figura 1. Clasificación de los sistemas de control estructural. (elaboración propia).....	18
Figura 2. Clasificación de los sistemas de control pasivo. (elaboración propia) .....	19
Figura 3. Clasificación de aisladores. (elaboración propia).....	20
Figura 4. Aislador elástomérico. (Recuperado de <a href="https://civildigital.com/base-isolation-system-outline-on-principles-types-advantages-applications/base-isolation-for-a-building/">https://civildigital.com/base-isolation-system-outline-on-principles-types-advantages-applications/base-isolation-for-a-building/</a> ) .....	20
Figura 5. Aislamiento en la base (Genatios & Lafuente, 2016).....	21
Figura 6. Modificación del período mediante aisladores sísmicos. (elaboración propia).....	23
Figura 7. Concentración de daño con y sin disipadores. ....	24
Figura 8. Clasificación de los disipadores de energía. ....	24
Figura 9. Incremento en el amortiguamiento debido al uso de disipadores sísmicos. (elaboración propia) .....	25
Figura 10. Clasificación de dispositivos histeréticos. ....	26
Figura 11. Disipadores histeréticos. Fuente: (Genatios & Lafuente, 2013).....	27
Figura 12. Disipador ADAS-TADAS sobre contraviento chevrón. (Aguiar, Rodríguez, & Mora, 2016).....	28
Figura 13. Diagrama de histéresis de un disipador ADAS o TADAS. (Aguiar, Rodríguez, & Mora, 2016).....	28
Figura 14. Disipador a cortante. (Mayorga Vela, 2011) .....	29
Figura 15. Disipador por extrusión. (Mayorga Vela, 2011).....	30
Figura 16. Amortiguador de fricción. (Genatios & Lafuente, 2016) .....	31
Figura 17. Respuesta histerética de un disipador por fricción tipo Pall. (Mayorga Vela, 2011) ...	31
Figura 18. Corte de un disipador viscoso. (Villareal Castro & Oviedo Sarmiento, 2009) .....	32
Figura 19. Funcionamiento de un disipador viscoso.....	32
Figura 20. Disipador viscoelástico. ....	33

Figura 21. Amortiguador de masa sintonizada. (Martínez, Blandón, & Lara, 2022) .....	34
Figura 22. Respuesta registrada vs respuesta analítica. (Reyes & Rubiano, 2002) .....	36
Figura 23. Conexión típica del BRBF. (Rodríguez, Aguilar, & Medina, 2014) .....	38
Figura 24. Planta de la edificación estudiada. (Rodríguez, Aguilar, & Medina, 2014) .....	38
Figura 25. Localización de los BRBF en planta. (Rodríguez, Aguilar, & Medina, 2014) .....	39
Figura 26. Curvas demanda-capacidad para los 2 primeros modos de vibración. ....	42
Figura 27. Piso típico y corte de la edificación modelada con disipadores viscosos. (Villareal & Díaz, 2016) .....	43
Figura 28. Ubicación de disipadores viscosos en la dirección X. (Villareal & Díaz, 2016) .....	44
Figura 29. Valores de rigidez y coeficiente de amortiguamiento de los disipadores viscosos calculados. (Villareal & Díaz, 2016) .....	44
Figura 30. (Villareal & Díaz, 2016). ....	45
Figura 31. Desplazamientos máximos absolutos en los C.M. de cada piso con el uso de disipadores viscosos (Dirección X-X). (Villareal & Díaz, 2016) .....	46
Figura 32. Derivas de entrepiso con el uso de disipadores viscosos (Dirección X-X). (Villareal & Díaz, 2016) .....	46
Figura 33. Edificio con disipadores de fluido viscoso y detalle de disipador viscoso evaluados. (Oviedo R. , 2010) .....	47
Figura 34. Desplazamiento relativo de los pisos y desplazamiento de entrepiso vs tiempo. (Oviedo R. , 2010) .....	48
Figura 35. Derivas en dirección X y derivas en dirección Y. (Oviedo R. , 2010) .....	48
Figura 36. Energía edificio sin disipadores y con disipadores. (Oviedo R. , 2010) .....	49
Figura 37. Disposición estructural de los casos estudiados. (Rueda & Inaudi, 2022) .....	50
Figura 38. Ubicación del TMD en el modelo de estudio. (Rueda & Inaudi, 2022) .....	51
Figura 39. Aceleraciones máximas de piso para diferentes valores de razón de masas en el TMD para el caso 1. (Rueda & Inaudi, 2022) .....	52
Figura 40. Aceleraciones máximas de piso para diferentes valores de razón de masas en el TMD para el caso 2. (Rueda & Inaudi, 2022) .....	52

## Resumen

Los disipadores sísmicos son dispositivos desarrollados en la ingeniería estructural para mejorar la seguridad estructural y reducir el riesgo de daños significativos en edificaciones durante sismos. Estos dispositivos se clasifican en hysteréticos y a cortante, los cuales ofrecen beneficios específicos para la reducción de daños estructurales durante eventos sísmicos. Los hysteréticos aprovechan las propiedades de deformación inelástica de materiales, como el acero, para absorber la energía sísmica. Los disipadores a cortante funcionan mediante la plastificación de metales en secciones específicas de la estructura, como los brazos excéntricos o paneles cortantes. Estos dispositivos permiten una gran capacidad disipativa al generar ciclos de histéresis estables, absorbiendo la energía sísmica y reduciendo el impacto en la estructura principal (Villareal & Oviedo, 2009). Su capacidad para aumentar el amortiguamiento y reducir las aceleraciones y desplazamientos de la estructura contribuye a una mayor estabilidad y menor daño a largo plazo. Estudios recientes han demostrado que el uso de disipadores puede disminuir la energía absorbida por la estructura en un 7.61% a 31.41%, dependiendo del tipo de disipador utilizado (Villareal & Oviedo, 2009). Esto no solo protege la integridad de la estructura, sino que también facilita una recuperación más rápida y económica después de eventos sísmicos. Se muestra la clasificación, funcionamiento y la forma en como algunos de estos dispositivos afectan la ecuación de equilibrio dinámico.

*Palabras clave:* disipadores sísmicos, energía, estructuras, solicitaciones sísmicas, ecuación de equilibrio dinámico, revisión bibliográfica, sistemas de control de respuesta sísmica.

## Abstract

Seismic dampers are devices developed in structural engineering to enhance structural safety and reduce the risk of significant building damage during earthquakes. These devices are classified into hysteretic and shear types, each offering specific benefits for reducing structural damage during seismic events. Hysteretic dampers utilize the inelastic deformation properties of materials such as steel to absorb seismic energy. Shear dampers operate by plastification of metals in specific structure sections, such as eccentric braces or shear panels. These devices allow for significant energy dissipation by generating stable hysteresis cycles, absorbing seismic energy, and reducing the impact on the main structure (Villareal & Oviedo, 2009). Their ability to increase damping and reduce accelerations and displacements of the structure contributes to greater stability and less long-term damage. Recent studies have shown that dampers can reduce the energy absorbed by the structure by 7.61% to 31.41%, depending on the type of damper used (Villareal & Oviedo, 2009). It protects the structural integrity and facilitates a faster and more cost-effective recovery after seismic events. These devices' classification, operation, and effects on the dynamic equilibrium equation are discussed.

*Keywords:* seismic dissipators, energy, structures, seismic stresses, dynamic equilibrium equation, literature review, seismic response control systems.

## Introducción

La ocurrencia de eventos naturales en América Latina y el Caribe afecta a nuestras sociedades e incide en el desarrollo sostenible de nuestros pueblos. Haití y Chile sufrieron en 2010 los embates de fuertes terremotos y respondieron según su nivel de preparación, a las repercusiones que tales acontecimientos tuvieron en sus economías. En el caso de Haití, el valor total de los daños y pérdidas, ocasionados por el terremoto rondó el 120% de su PIB (año 2009). En el caso chileno, aunque con menor impacto en cuanto a daños de infraestructura y pérdidas humanas lamentables, fue necesaria la reconstrucción de un significativo número de viviendas, carreteras, aeropuertos y puentes, así como la reparación de estructuras estratégicas, hospitales y escuelas, lo cual representó cerca de un cuarto de su PIB. (Genatios & Lafuente, 2016)

Estos casos con diferentes grados de preparación nos muestran la necesidad de estar aún más capacitados para minimizar las pérdidas ocasionadas por los desastres naturales y disminuir el riesgo generado por la acción del hombre al modificar el territorio que habita. (Genatios & Lafuente, 2016)

En los últimos tiempos, el diseño de estructuras ha ido transformándose lentamente en una competencia por reducir costos, donde los grandes constructores suelen optar por el diseño más económico, sin considerar plenamente las posibles consecuencias o repercusiones que podrían surgir si estos diseños, frecuentemente al límite de las normas, enfrentan un evento sísmico significativo.

Con el objetivo de lograr diseños más económicos que no comprometan la seguridad, se han desarrollado sistemas de control de respuesta sísmica, los cuales buscan mitigar los efectos de los sismos en las estructuras. Por lo tanto, nos corresponde estudiar las alternativas disponibles, comprender su funcionamiento y analizar los resultados experimentales derivados de su aplicación.

En el campo de la ingeniería civil, los sismos son frecuentemente idealizados como cargas estáticas “equivalentes” de determinada magnitud que deben ser resistidas por la estructura. Esto ha sentado las bases de varios códigos de diseño desde los inicios del siglo 20. Asimismo, dado que las cargas horizontales no son estáticas, se pueden lograr importantes mejoras al analizarlas desde una perspectiva dinámica. Como resultado de este punto de vista dinámico, varias innovaciones para la protección estructural han sido propuestas. Una amplia gama de estrategias

consideradas consiste en la incorporación de elementos externos a la estructura para mitigar su respuesta dinámica, y la parte de la mecánica estructural que maneja estos conceptos es denominada control estructural. (Oviedo, 2010)

El control estructural ante solicitaciones sísmicas se está planteando como una alternativa al diseño sismorresistente convencional, con lo cual se generan los sistemas sismorresistentes avanzados; los cuales tienen por objetivo el control de desplazamientos de una estructura. La clasificación de estos sistemas parte de la ecuación de equilibrio dinámico, ya que dependiendo de cómo afecten la ecuación, será la clasificación de estos. (Oviedo, 2010)

La ecuación 1.1 muestra la relación de la conservación de la energía en un sistema estructural expuesto a una excitación sísmica. (Villareal & Oviedo, 2009)

$$E_L = E_K + E_S + E_A + E_D$$

*Ecuación 1. Ecuación de equilibrio dinámico.*

Dónde:

EL-Energía absoluta de entrada del movimiento sísmico.

EK-Energía cinética.

ES-Energía de deformación elástica recuperable.

EA-Energía de amortiguamiento.

ED-Energía irrecuperable disipada por el sistema estructural a través de la inelasticidad.

Para que el sistema estructural sea capaz de soportar las solicitaciones sísmicas, la capacidad de respuesta de esta debe ser mayor que la demanda sísmica. En pocas palabras la energía de entrada (EL) debe ser absorbida o disipada por la suma de la energía cinética (EK), elástica (ES), de amortiguamiento (EA) e inelástica (ED). (Villareal & Oviedo, 2009)

Asumiendo que la energía de entrada es constante, será evidente que el desempeño estructural puede ser optimizado de dos formas:

- A través del método convencional, es decir, aumentando la rigidez y la ductilidad en el sistema, incrementando así la energía por deformación elástica (ES) e inelástica (ED).
- Incrementando el amortiguamiento interno (EA) mediante la incorporación de dispositivos suplementarios colocados en lugares estratégicos.

La primera alternativa representa al diseño clásico, en donde se trabaja en función de la resistencia y la ductilidad de la estructura para que soporte las diferentes sollicitaciones sísmicas producidas por un movimiento telúrico. (Villareal & Oviedo, 2009)

La segunda alternativa consiste en anexar a la estructura dispositivos suplementarios, los cuales tienen el propósito de maximizar el amortiguamiento del sistema, reduciendo la demanda de disipación de energía a través de la inelasticidad (ED) en los diferentes elementos estructurales, tales como columnas y placas, evitando así posibles fallas o daños en los mismos. (Villareal & Oviedo, 2009)

La finalidad de esta monografía es explicar los tipos de sistemas de control pasivo de respuesta sísmica comúnmente utilizados, los cuales debido a sus menores costos son los más aplicables a nuestro contexto social. Nos enfocaremos principalmente en los disipadores sísmicos, su funcionamiento, como afectan la ecuación de equilibrio dinámico y describir algunos ejemplos ya sea de modelación o reales en los cuales se pueda ver la aplicación de estos y los posibles beneficios que tendría su uso.

## 1. Planteamiento del problema

Más del 85% de la población colombiana se localiza en zona de convergencia de placas tectónicas, expuesta a una amenaza sísmica entre intermedia y alta. La amenaza sísmica no constituye un riesgo si no es acompañada por edificaciones vulnerables. (Oviedo & Duque, 2006)

De aquí que es indispensable diseñar y construir las edificaciones para que resistan eventos sísmicos grandes sin colapsar y eventos sísmicos recurrentes sin daños en la estructura y daños mínimos o nulos en los elementos no estructurales.

Las técnicas convencionales de disipación de energía se han complementado con sistemas adicionales a los componentes estructurales de la edificación, los cuales modifican las características dinámicas de la estructura, controlando o disipando parte de la energía impuesta por el sismo. El uso de estas técnicas de control de respuesta sísmica tiene como objetivo reducir la demanda sísmica de la propia estructura controlando su deformación y, por lo tanto, su daño. (Oviedo & Duque, 2006)

Los diseños convencionales requieren estructuras robustas para cumplir con las derivas máximas permisibles impuestas por las solicitaciones dinámicas exigidas por la norma. Como resultado, es común en nuestro medio tener estructuras pesadas y sobredimensionadas frente a las cargas verticales.

## 2. Antecedentes

A continuación, se hace una breve revisión acerca del origen y algunas investigaciones y documentos que han sido realizadas en nuestro contexto social en el tema de disipadores sísmicos:

En los años 70 Skinner (Skinner, 1975) investigaba en nueva Zelanda acerca de los sistemas de control de respuesta sísmica, y de cómo estos dispositivos incrementaban la resistencia sísmica de las estructuras.

En el 93 Constantinou (Constantinuo, 1993) realizó una revisión de los dispositivos de amortiguación usados para el control de la respuesta sísmica de las estructuras, en el cual los describía y concluía que estos son capaces de generar reducciones considerables en la deriva de entrepiso y que estos son apropiados para la rehabilitación de estructuras existentes. Determinó que, mediante el uso de estos dispositivos, el comportamiento de las estructuras pasaba de ser el

de un pórtico resistente a momentos a un pórtico arriostrado, y que estos inducían fuerzas axiales adicionales en las columnas.

En 2002 Reyes y Rubiano (Reyes & Rubiano, 2002) ilustran los conceptos más relevantes de disipadores y plantean una metodología de análisis y diseño. En particular, se enfatiza sobre disipadores de energía de fácil fabricación e instalación en nuestro país. Para tal efecto, se realizó un ensayo de laboratorio para definir las características de un dispositivo histerético metálico y se analizó su comportamiento e incidencia. Encontraron que la utilización de estos dispositivos presenta numerosas ventajas entre las que vale la pena resaltar: el impacto menor sobre la operatividad del edificio durante la rehabilitación, la limpieza de la construcción, la velocidad de construcción, la industrialización, la libertad arquitectónica y costos similares a los obtenidos cuando se incorporan muros estructurales.

En 2009, Villareal y Oviedo (Villareal Castro & Oviedo Sarmiento, 2009) estudiaron los sistemas avanzados de control de respuesta dinámica, analizando el desempeño de los sistemas de control pasivo, como los dispositivos histeréticos y viscoelásticos. Además, realizaron el análisis de un modelo con disipadores de energía y compararon los resultados con un modelo sin estos dispositivos. En sus estudios encontraron reducciones de hasta un 58% en la energía de la primera forma de vibración, así como disminuciones en los desplazamientos máximos del 10% al 40%, en las fuerzas axiales del 14% al 22%, en los cortantes del 9% al 12%, en los momentos flectores máximos del 9% al 12%, y en los momentos torpores del 31% al 47%.

En 2016, Villareal y Díaz (Villareal & Díaz, 2016) realizaron un análisis similar para disipadores de energía viscosos, encontrando que estos no modifican la rigidez de la estructura, pero reducen la energía sísmica inelástica (ED) absorbida por la estructura al aumentar la energía de amortiguamiento, lo que disminuye los daños estructurales. Sus modelos lograron una reducción del 41% en los desplazamientos máximos y de entre el 36% y el 50% en las derivas de entrepiso. Además, observaron disminuciones en las fuerzas internas de las columnas de hasta un 41%, en el cortante de hasta un 60% y en los momentos flectores de hasta un 60%, logrando una disipación de energía del 50.7%.

### **3. Justificación**

Dado el alto costo del sistema estructural en construcciones ubicadas en zonas de amenaza sísmica media y alta, es prudente conocer las tecnologías disponibles para optimizar tanto el rendimiento como los costos de las edificaciones. Por ello, nos interesa conocer los sistemas de control de respuesta sísmica más utilizados, centrándonos en los disipadores sísmicos, su clasificación, funcionamiento y cómo influyen en la ecuación de equilibrio dinámico, ya que el uso de estos dispositivos puede permitir una reducción en las dimensiones de los elementos estructurales al incrementar el amortiguamiento inherente de las estructuras.

### **4. Objetivos**

#### **3.1 Objetivo general**

Analizar la influencia de los distintos tipos de disipadores sísmicos en la ecuación de equilibrio dinámico.

#### **3.2 Objetivos específicos**

Contextualizar y analizar el funcionamiento de los disipadores sísmicos, describiendo los tipos de dispositivos más utilizados y sus principales características.

Describir de acuerdo con la literatura como los disipadores sísmicos afectan la ecuación de equilibrio dinámico en términos de la reducción de la energía externa total que le llega a la estructura.

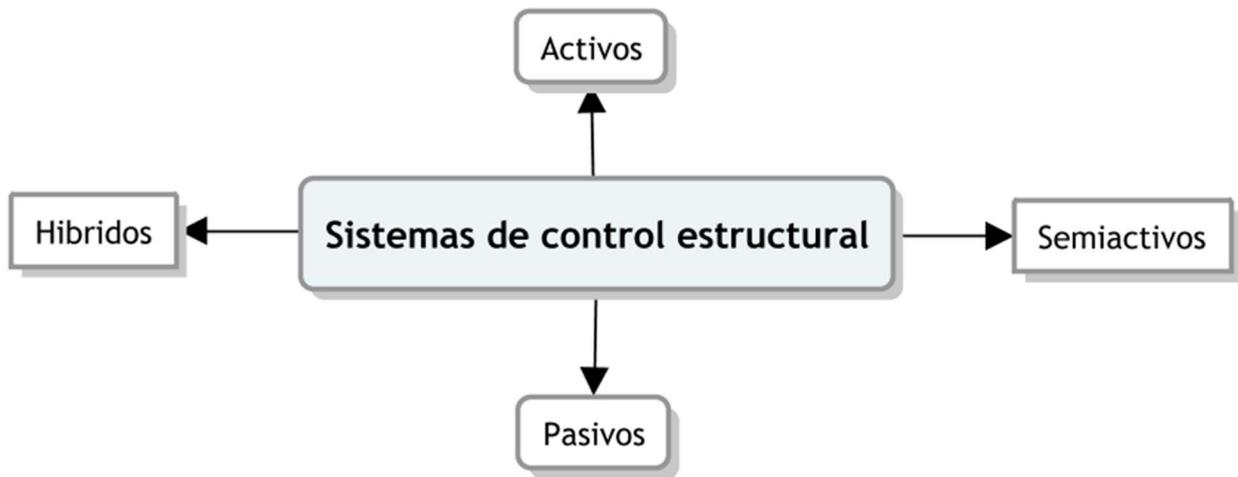
## 5. Hipótesis

El uso de disipadores sísmicos influye en la respuesta dinámica de una estructura al reducir la cantidad de energía disipada por el sistema principal de resistencia sísmica. Esto resulta en una disminución de las deformaciones inelásticas del sistema estructural.

- a. *Variables.* La energía sísmica o exterior que ingresa al sistema, la energía de amortiguamiento del sistema y la energía de deformación inelástica del sistema.

## 6. Marco teórico

Los sistemas de control estructural pueden ser, sistemas activos, pasivos, híbridos y semiactivos como se muestra en la **Figura 1**: (Villareal & Oviedo, 2009)



*Figura 1. Clasificación de los sistemas de control estructural. (elaboración propia)*

Los sistemas activos contrarrestan directamente los efectos del sismo mediante sistemas complejos que incluyen sensores de movimiento, sistemas de control, procesamiento de datos y actuadores dinámicos. Usualmente se colocan acelerógrafos en puntos estratégicos de la estructura, a través de un software evalúan las fuerzas recibidas, las procesan mediante un modelo matemático y envían a los actuadores fuerzas equivalentes de valor contrario para contrarrestar el movimiento debido al sismo. La gran demanda de energía que comporta su actuación ante un sismo severo y la complejidad de los algoritmos de control los convierte en sistemas complejos. (Villareal & Oviedo, 2009)

Los sistemas híbridos son muy similares a los sistemas activos, sin embargo, en ellos intervienen elementos pasivos que permiten reducir el consumo energético del sistema ante un sismo. (Villareal & Oviedo, 2009)

Los sistemas semiactivos emplean dispositivos de control pasivo sin consumo energético, cuyas características resistentes permiten ser modificadas y controladas a tiempo real mediante

actuadores de bajo consumo a través de sistemas de control parecidos a los empleados en los sistemas activos e híbridos. (Villareal & Oviedo, 2009)

Los sistemas de control pasivo se basan en elementos que responden de forma inercial a la acción sísmica y no precisan de aporte energético para funcionar. Los sistemas pasivos se clasifican en sistemas de aislamiento de base y de disipación de energía, esto se muestra en la **Figura 2** . (Villareal & Oviedo, 2009)

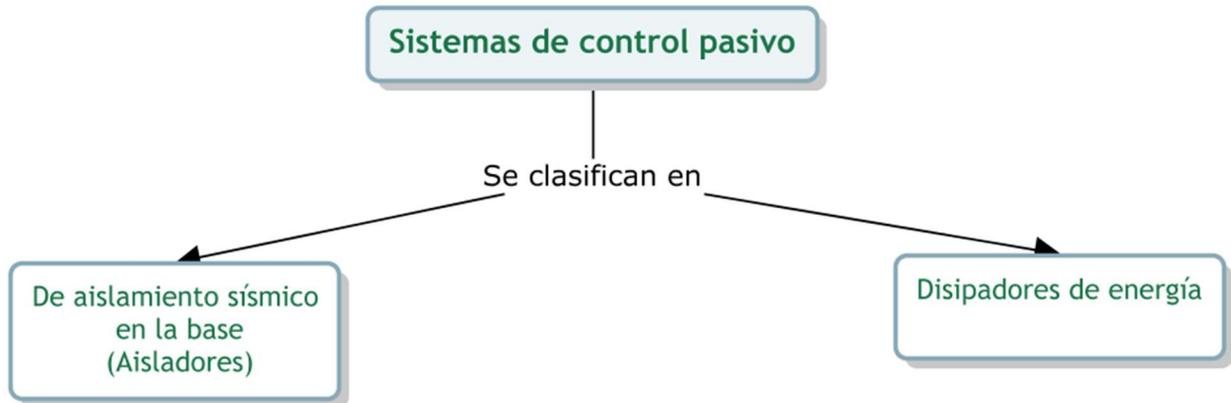


Figura 2. Clasificación de los sistemas de control pasivo. (elaboración propia)

En general los sistemas de control pasivo tienen como objetivos principales mantener la funcionalidad de la estructura, mejorar el confort de los ocupantes en caso de sismos, y proporcionar protección sísmica adicional en la ocurrencia de eventos severos. (Genatios & Lafuente, 2016)

### 6.1. Aisladores

El funcionamiento de un aislador sísmico se basa en generar una discontinuidad en la transmisión del movimiento de la fundación a la estructura. De esta manera no se transfiere la totalidad de la energía del sismo a la estructura; sólo se transmite una pequeña porción de ese movimiento de la fundación, por lo que la estructura sufre pequeñas deformaciones y se limitan los daños (Genatios & Lafuente, 2016)

Los aisladores de base son situados sobre la cimentación y soportando al edificio, desacoplan parcialmente al edificio del suelo, disminuyendo la energía de entrada y por consiguiente su respuesta estructural. Los más comunes son los elastoméricos y los deslizadores (**Figura 3**). (Villareal Castro & Oviedo Sarmiento, 2009)



*Figura 3. Clasificación de aisladores. (elaboración propia)*

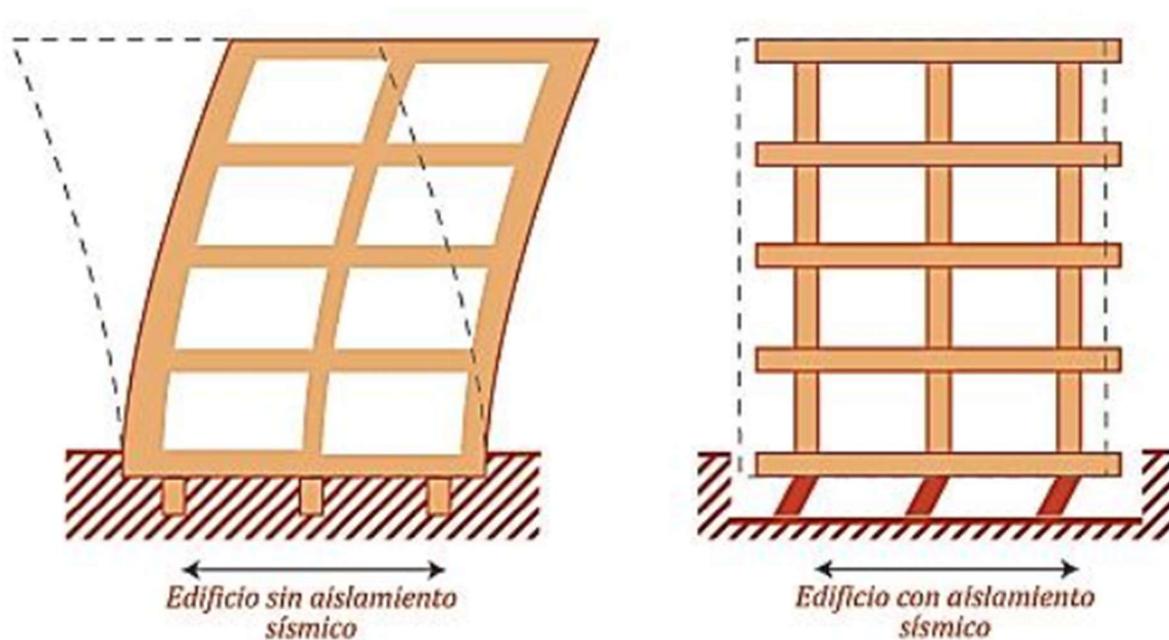
En la **Figura 4** se presenta un ejemplo de aislador elástico, el cual está compuesto por una serie de láminas alternadas de goma natural y acero, adheridas entre sí. Este dispositivo está diseñado para soportar la carga de una columna o placa, mientras permite la deformación lateral. Para limitar el movimiento relativo y disipar energía, los aisladores deben generar altos niveles de amortiguamiento, lo cual puede lograrse mediante la inclusión de núcleos de plomo que permiten grandes deformaciones y proporcionan un alto grado de amortiguamiento. (Disipa, 2024)



*Figura 4. Aislador elástico. (Recuperado de <https://civildigital.com/base-isolation-system-outline-on-principles-types-advantages-applications/base-isolation-for-a-building/>)*

En un evento sísmico el suelo comienza a moverse y las estructuras sobre este reaccionan con un movimiento en dirección opuesta debido a la inercia. Durante este desplazamiento un edificio no aislado tiende a deformarse, cambiando su forma de un rectángulo a un paralelogramo, como se muestra en la **Figura 5**. Esta deformación es la principal causa de daño sísmico en los edificios. Por otro lado, en un edificio con aislamiento sísmico las fuerzas de inercia que actúan sobre la estructura no son transmitidas completamente a esta, y por esto estos conservan su forma original y rectangular (**Figura 5**), y al evitar la deformación se minimizan los daños. De hecho, experimentos y observaciones de edificios con aislamiento de base durante terremotos muestran que estos experimentan solo una cuarta parte de la aceleración en comparación con edificios de base fija. (Molina, 2018)

Esta reducción en la aceleración se debe a que el sistema de aislamiento de base prolonga el período de vibración del edificio, es decir, el tiempo que tarda en oscilar de un lado a otro y regresar. En general, las estructuras con períodos de vibración más largos tienden a reducir la aceleración, mientras que aquellas con períodos más cortos tienden a amplificarla. (Molina, 2018)



*Figura 5. Aislamiento en la base (Genatios & Lafuente, 2016)*

Se encuentra entonces que los aisladores como su nombre lo indica intentan aislar o disminuir la aceleración basal de la estructura, es decir, disminuyen el término  $EL$  en la  $\int Error! No se encuentra el origen de la referencia.$ , lo que disminuye la demanda en las estructuras, es decir, genera una modificación del período natural de la estructura aislada como se muestra en la **Figura 6**.

$$E_L = E_K + E_S + E_A + E_D$$

Ecuación 1. *Ecuación de equilibrio dinámico.*

Dónde:

EL-Energía absoluta de entrada del movimiento sísmico.

EK-Energía cinética.

ES-Energía de deformación elástica recuperable.

EA-Energía de amortiguamiento.

ED-Energía irrecuperable disipada por el sistema estructural a través de la inelasticidad

$$\begin{array}{ccc}
 EL & = & \text{Constante} \\
 \downarrow & & \\
 \text{Demanda disminuye} & = & \text{Capacidad permanece constante.}
 \end{array}$$

En la Figura 6 se observa como el período de vibración de una estructura incrementa mediante el uso de los aisladores, con lo cual la aceleración de la estructura disminuye.

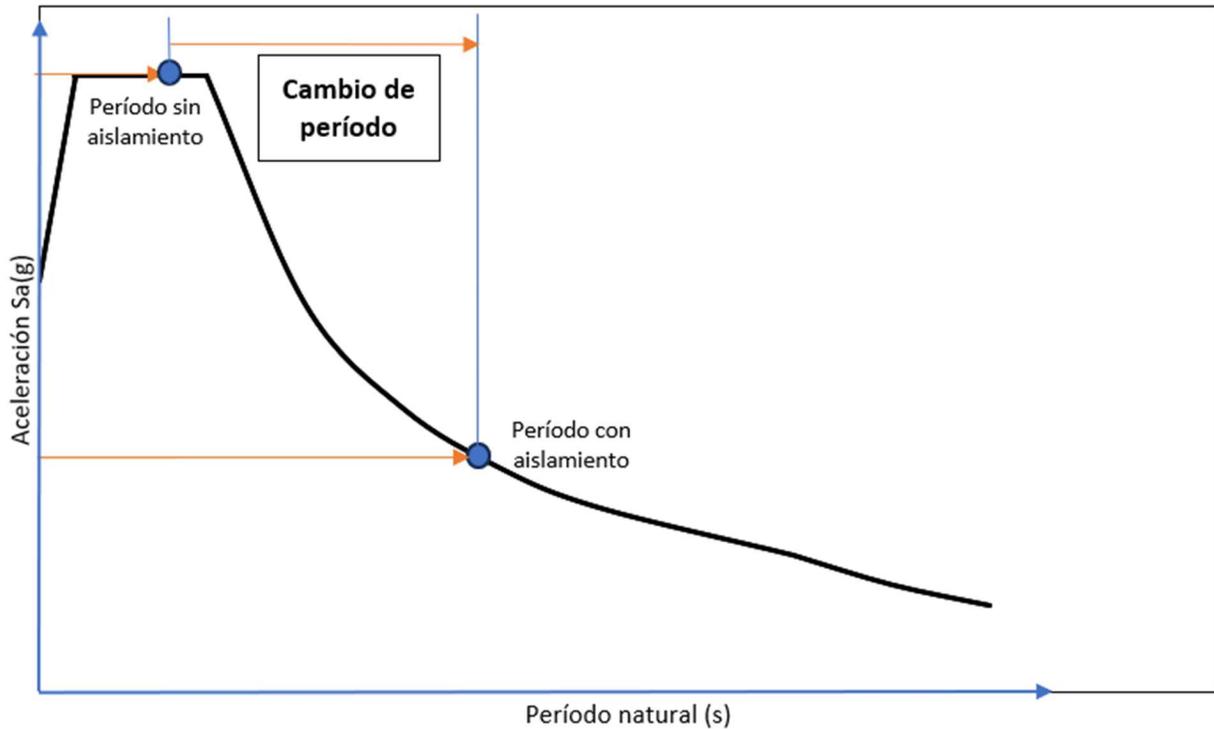


Figura 6. Modificación del período mediante aisladores sísmicos. (elaboración propia)

## 6.2. Disipadores

Por otro lado, los disipadores de energía no modifican la energía de entrada, la cual depende principalmente del período fundamental y la masa del edificio. Sin embargo, permiten aumentar el nivel de amortiguamiento de la estructura al absorber las sollicitaciones de origen dinámico, lo que protege y reduce los daños estructurales. Por esta razón, también se les conoce como amortiguadores. (Genatios & Lafuente, 2016)

Estos dispositivos están diseñados para que la deformación o daño provocado por las fuerzas sísmicas se concentre en ellos y no en los elementos del sistema estructural. Esto permite optimizar costos y tiempos de reparación, además de reducir la cantidad de energía que llega a los elementos principales de resistencia sísmica, como se ilustra en la Figura 7. (Dampo Systems S.A., 2020)

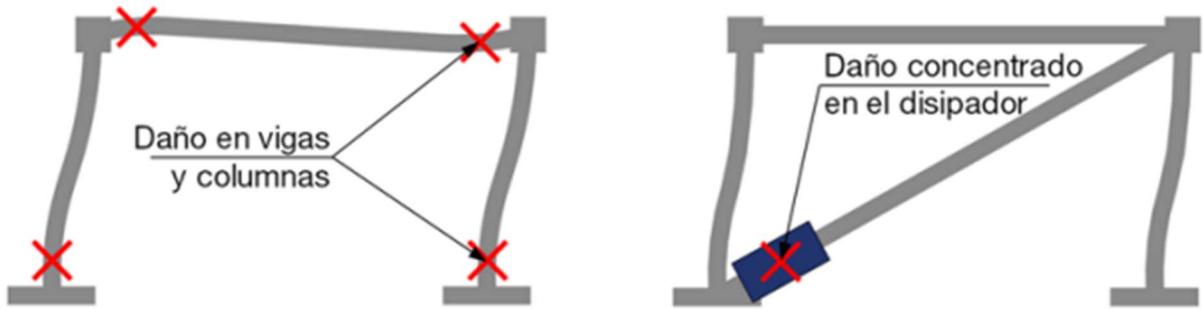


Figura 7. Concentración de daño con y sin disipadores. (Dampo Systems S.A., 2020)

Estos dispositivos se dividen en dependientes del desplazamiento, dependientes de la velocidad y mixtos, **Figura 8**. (ASCE 7-10, 13)

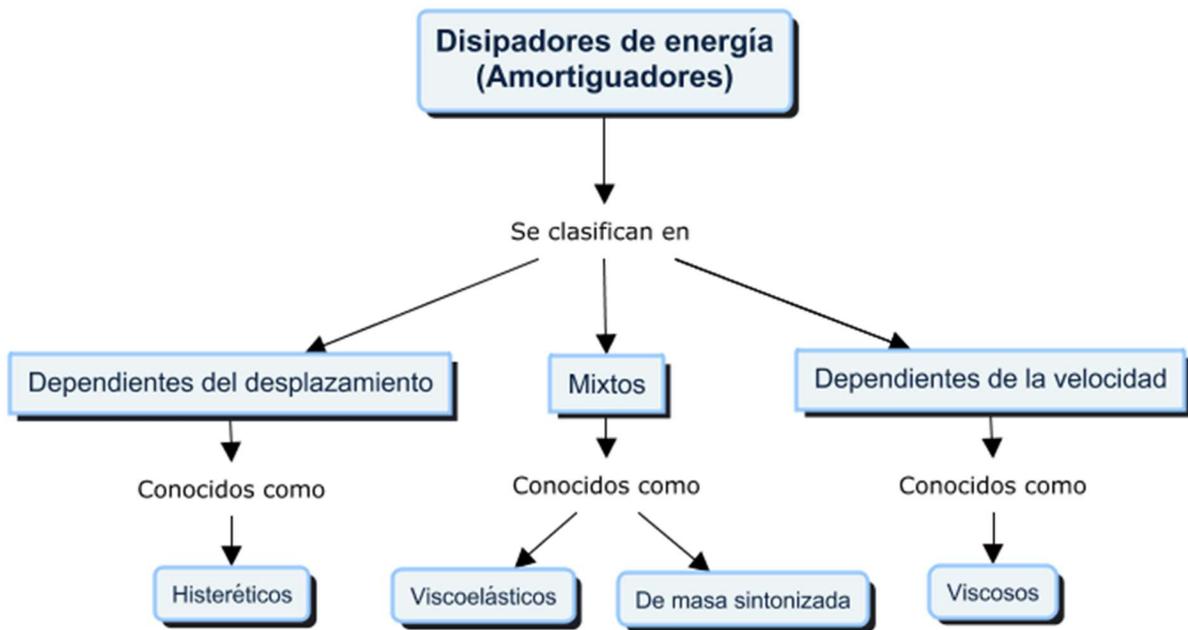


Figura 8. Clasificación de los disipadores de energía. (elaboración propia)

En la **Figura 9** se observa como al incrementar el grado de amortiguamiento de una estructura mediante el uso de disipadores se disminuye la aceleración que experimentan los elementos estructurales de esta, sin que esto implique un cambio en el período natural de la estructura.

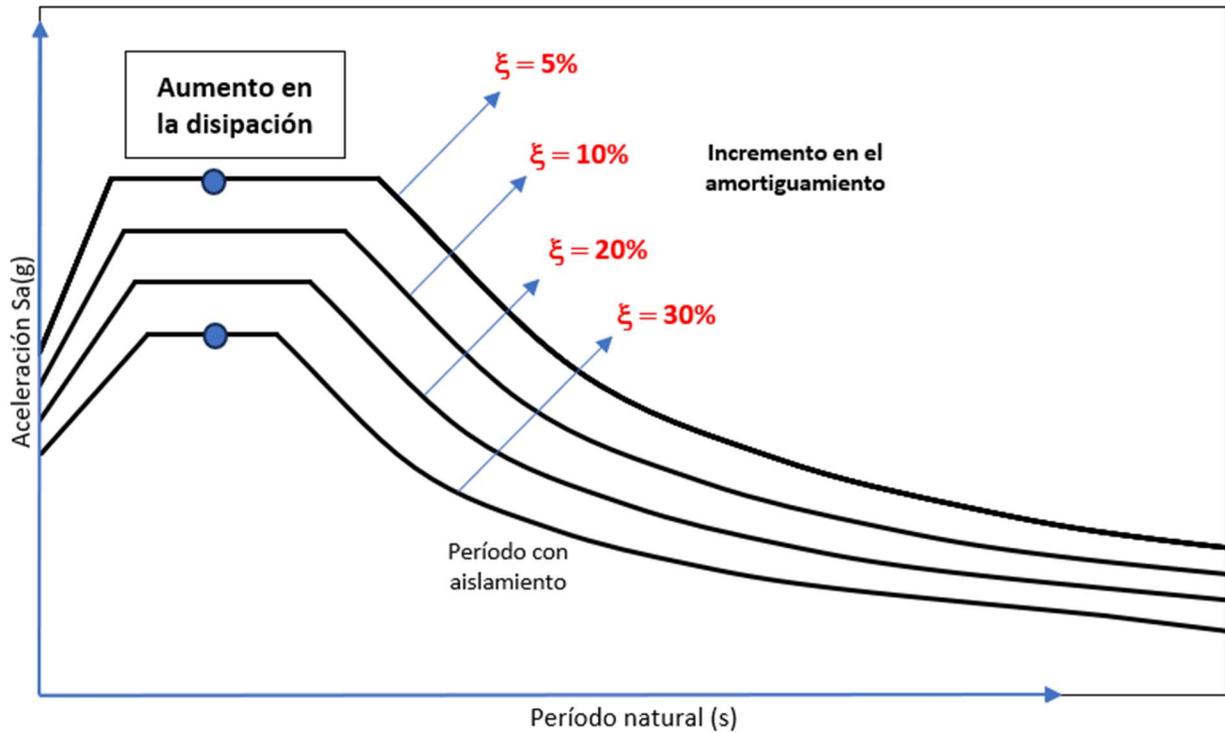


Figura 9. Incremento en el amortiguamiento debido al uso de disipadores sísmicos. (elaboración propia)

Los disipadores sísmicos modifican la energía de amortiguamiento de la estructura (término  $E_A$  de la  $E_L$ ), con lo cual, incrementa la capacidad global de esta.

$$E_L = E_K + E_S + E_A + E_D$$

*¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.. Ecuación de equilibrio dinámico.*

$$\text{Constante} = E_A$$

$$\text{Demanda Constante} = \text{Capacidad aumenta}$$

### 6.2.1. Dispositivos dependientes del desplazamiento o histeréticos

En estos dispositivos, la disipación de energía depende del desplazamiento, y su comportamiento se modela mediante curvas fuerza-desplazamiento, donde la energía disipada se cuantifica a través de los ciclos de histéresis característicos. Funcionan a través de la plastificación o fluencia de metales por flexión, cortante o extrusión, o por fricción entre superficies. (Villareal Castro & Oviedo Sarmiento, 2009)

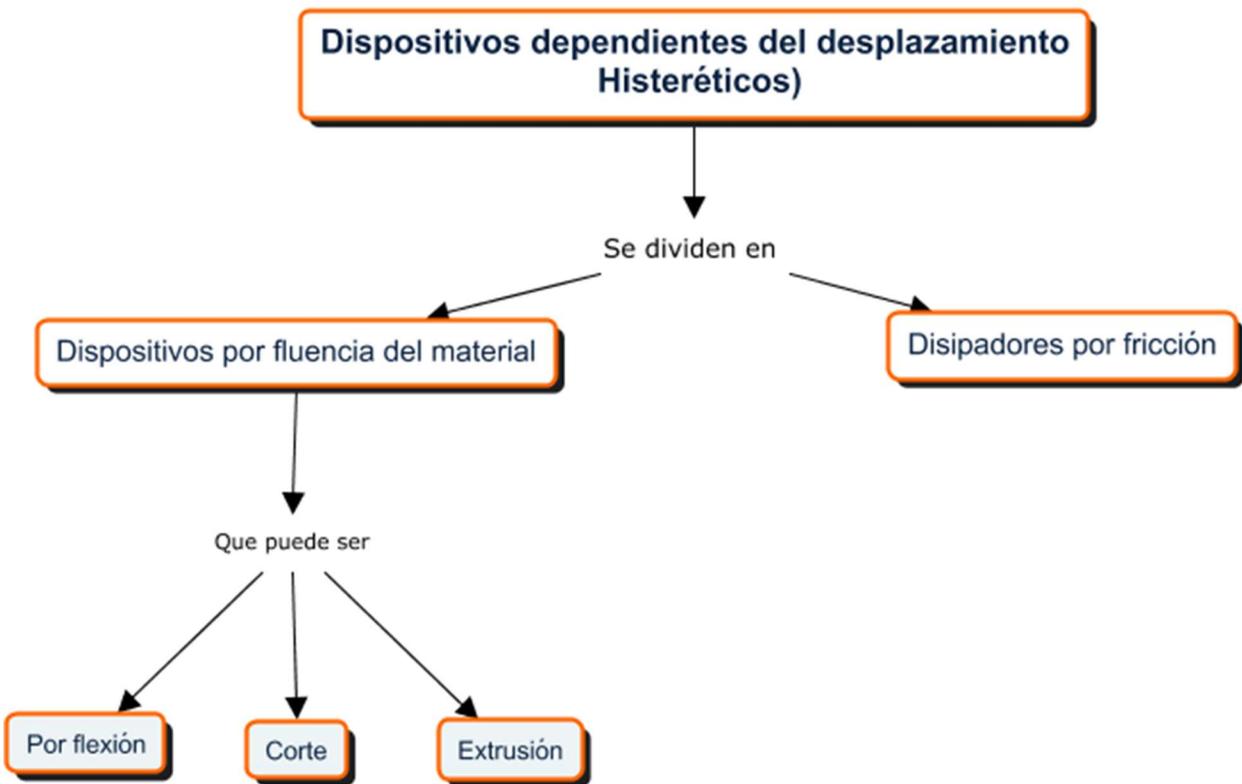


Figura 10. Clasificación de dispositivos histeréticos.(elaboración propia)

#### 6.2.1.1. Dispositivos que disipan energía por fluencia del material:

Estos dispositivos aprovechan las propiedades de deformación inelástica del material que los constituye, generalmente acero, debido a su alta homogeneidad, lo que facilita su caracterización mecánica. Algunos tipos comunes de disipadores metálicos incluyen placas a flexión, riostras metálicas, amortiguadores de barras, anillos, etc. (Genatios & Lafuente, 2016)

### I. Disipadores por flexión:

Un disipador ADAS (Added damping and stiffness) o TADAS (Triangular plate added damping and stiffness) como el que se muestra en la **Figura 11**, se diseña para disipar energía a partir de la cedencia en flexión de las placas de acero que lo conforman. Estos dispositivos están compuestos por placas de acero en forma de V o X que se deforman flexionalmente cuando la estructura se somete a cargas laterales, como las inducidas por un sismo. Al deformarse, las placas disipan energía a través de la flexión repetida, lo que contribuye a reducir las vibraciones y las fuerzas internas en la estructura. Estos se utilizan usualmente conectados a riostras diagonales concéntricas que aumentan la rigidez de la estructura. (Aguiar, Rodríguez, & Mora, 2016)



*Figura 11. Disipadores histeréticos. Fuente: (Genatios & Lafuente, 2013)*

En la **Figura 12** se presenta un disipador ADAS sobre un contraviento Chervrón en el cual la parte superior del disipador va anclada a la viga de la estructura y la inferior a la viga del contraviento. (Aguiar, Rodríguez, & Mora, 2016)

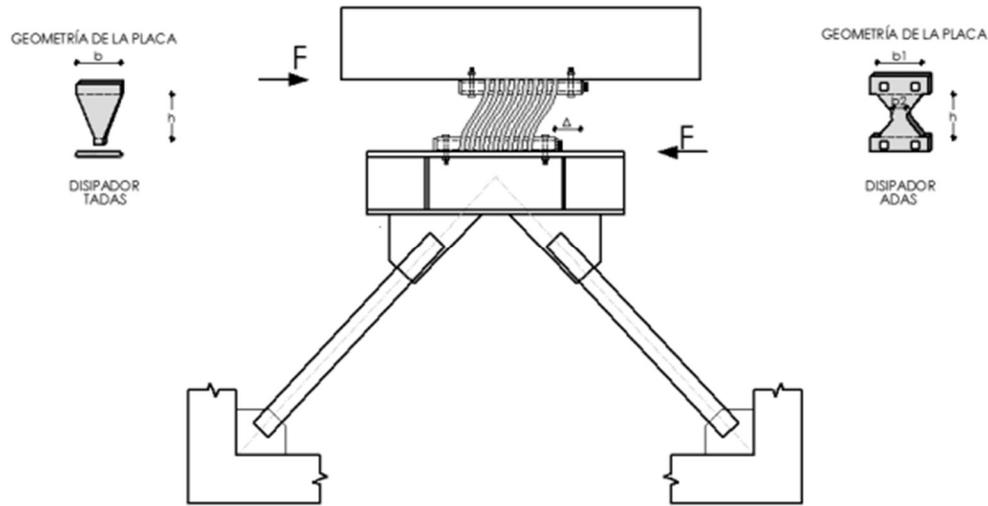


Figura 12. Disipador ADAS-TADAS sobre contraviento chevrón. (Aguiar, Rodríguez, & Mora, 2016)

El diagrama de histéresis de estos disipadores se considera aproximadamente bilineal y rectangular, como se ilustra en la **Figura 13**. En estos la plastificación se produce de forma uniforme y estable, esto los hace altamente eficientes en la disipación de energía. La energía disipada en un ciclo de histéresis equivale al área sombreada del diagrama. (Aguiar, Rodríguez, & Mora, 2016)

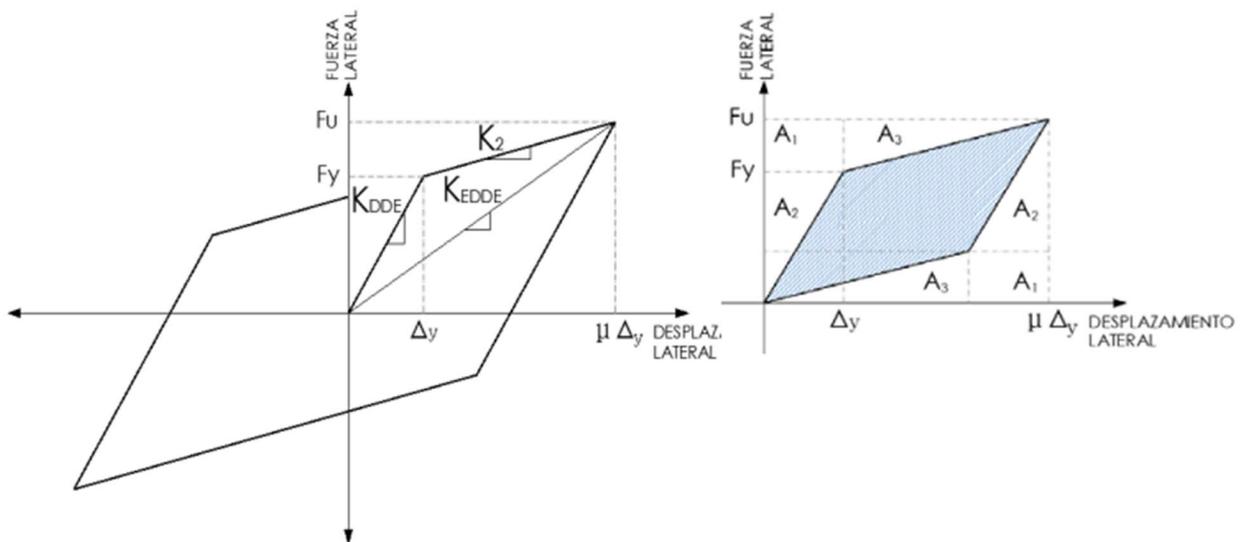


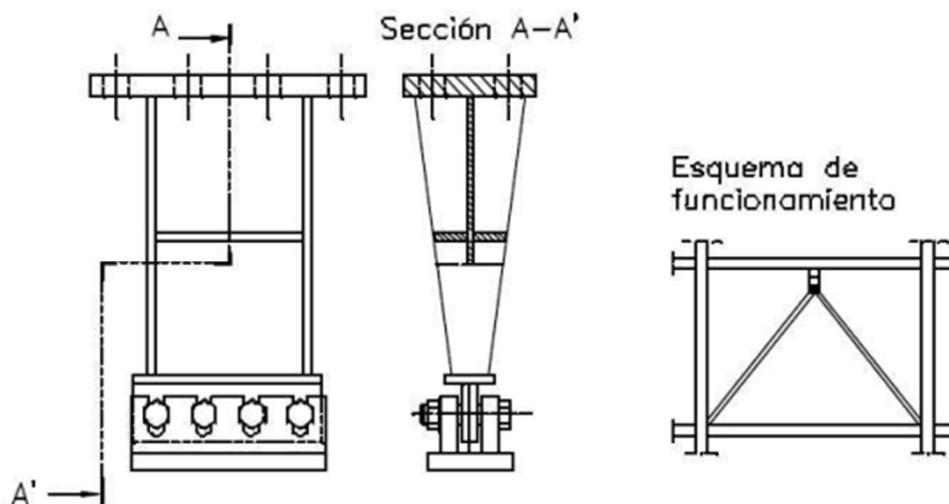
Figura 13. Diagrama de histéresis de un disipador ADAS o TADAS. (Aguiar, Rodríguez, & Mora, 2016)

## II. Disipadores por cortante:

Los disipadores por cortante son dispositivos de control sísmico que disipan energía mediante la deformación por cortante de sus componentes estructurales. Estos dispositivos están diseñados para absorber la energía de un sismo transformándola en deformación interna, lo que reduce las fuerzas que llegan a la estructura principal. Al disipar energía a través de la deformación por cortante, contribuyen a reducir los desplazamientos y las aceleraciones inducidos por el sismo. (Mayorga Vela, 2011)

Estos se colocan en puntos estratégicos de la estructura para maximizar su eficiencia en la absorción de las fuerzas sísmicas. El sistema estructural de los brazos excéntricos es el precursor de estos dispositivos y la mayoría de los disipadores adoptan una geometría similar: sección en doble T con alma rigidizada. Este sistema es de una gran ductilidad y permite ciclos histeréticos estables y de gran capacidad disipativa siempre que la rigidización sea correcta. (Mayorga Vela, 2011)

La **Figura 14** muestra un disipador por cortante con sección en doble T y alma rigidizada, diseñado para actuar como un enlace entre un pórtico y su arriostramiento en A. Su conexión con los brazos permite únicamente la acción horizontal, estando libre de momento y de cualquier acción vertical. (Mayorga Vela, 2011)

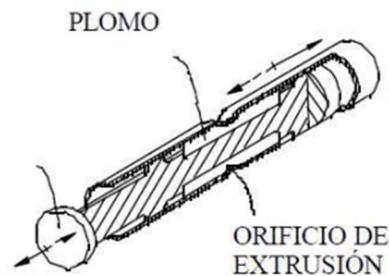


*Figura 14. Disipador a cortante. (Mayorga Vela, 2011)*

## III. Disipadores basados en la extrusión de metales:

En estos dispositivos la energía se disipa mediante la deformación plástica de materiales que se extruyen bajo la carga. En la **Figura 15** se muestra un dispositivo en el que el plomo pasa

por un orificio, y forzado a un cambio de sección disipa energía. En estos la respuesta histerética resulta muy estable tras muchos ciclos de desplazamiento. (Mayorga Vela, 2011)

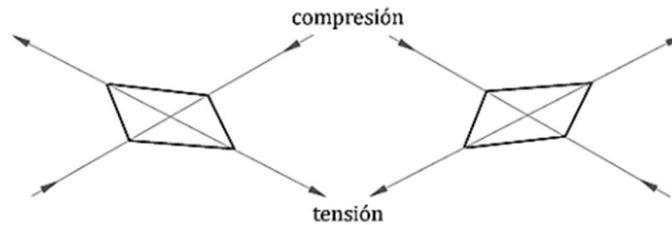
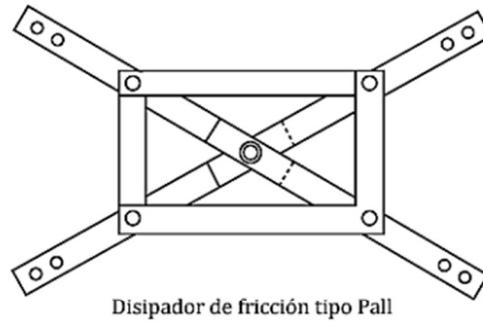


*Figura 15. Disipador por extrusión. (Mayorga Vela, 2011)*

#### 6.2.1.2. Disipadores por fricción:

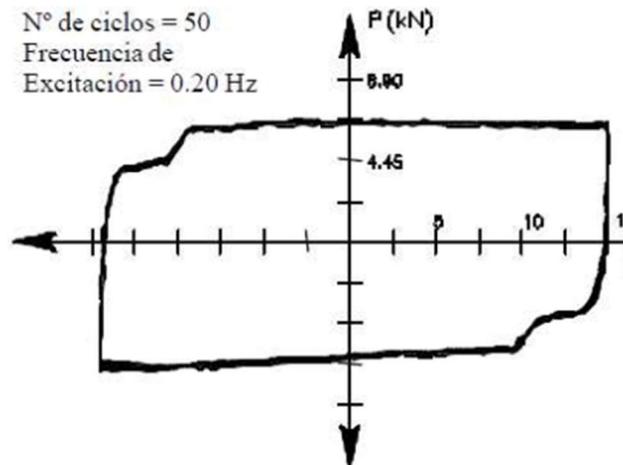
Los sistemas de fricción disipan energía mediante el rozamiento que se genera entre dos superficies en contacto bajo presión, las cuales se deslizan entre ellas. La fuerza de fricción en cada conexión es igual al producto de la fuerza normal por el coeficiente de rozamiento. Estos dispositivos disipan energía cuando se produce fricción a partir del desplazamiento relativo entre dos o más superficies en contacto. (Genatios & Lafuente, 2016)

En la **Figura 16** se muestra un ejemplo de amortiguador de fricción tipo Pall, que consiste en dos elementos diagonales dispuestos en forma de X. Este dispositivo se coloca en la intersección de un arriostramiento en X con una interfaz de fricción en el punto de intersección; El mecanismo desliza ante una carga predeterminada regulable a partir de la presión ejercida por unos pernos. (Mayorga Vela, 2011)



*Figura 16. Amortiguador de fricción. (Genatios & Lafuente, 2016)*

Sus curvas histeréticas presentan una forma prácticamente rectangular, como se observa en la **Figura 17**, lo que permite que la energía disipada por ciclo sea máxima para un valor específico de desplazamiento. (Mayorga Vela, 2011) Estos han sido usados en Canadá en la rehabilitación de estructuras dañadas por sismos. (Genatios & Lafuente, 2016)

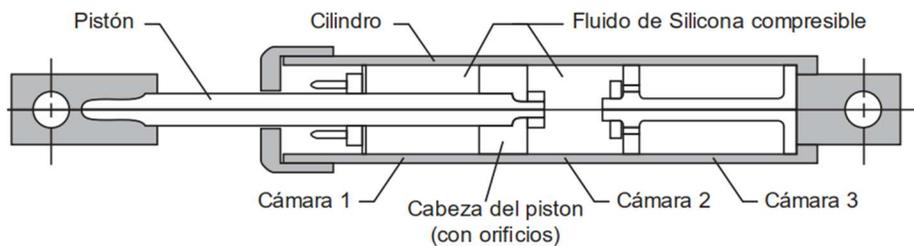


*Figura 17. Respuesta histerética de un disipador por fricción tipo Pall. (Mayorga Vela, 2011)*

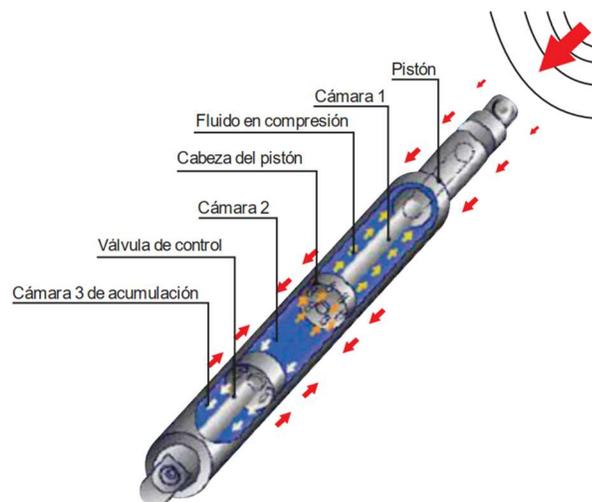
### 6.2.2. Dispositivos dependientes de la velocidad.

Los disipadores dependientes de la velocidad, también conocidos como **disipadores viscosos o de fluido viscoso**, se basan en el flujo forzado de un fluido, como aceite o silicona. Estos dispositivos utilizan la resistencia al flujo del fluido para controlar los movimientos de la estructura, ofreciendo una resistencia proporcional a la velocidad del movimiento. A medida que el fluido se desplaza a través del dispositivo, disipa la energía sísmica sin alterar la rigidez de la estructura ni incrementar los esfuerzos en los elementos estructurales. (Villareal & Oviedo, 2009)

Durante una excitación sísmica, el deslizamiento del pistón dentro del cilindro provoca el paso del fluido de una cámara a otra, lo que genera una presión diferencial. Esta presión es la que produce la fuerza de amortiguamiento. La **Figura 18** ilustra este proceso. (Villareal Castro & Oviedo Sarmiento, 2009)



*Figura 18. Corte de un disipador viscoso. (Villareal Castro & Oviedo Sarmiento, 2009)*

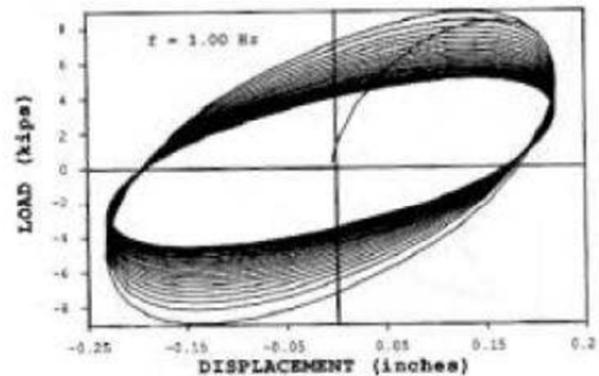
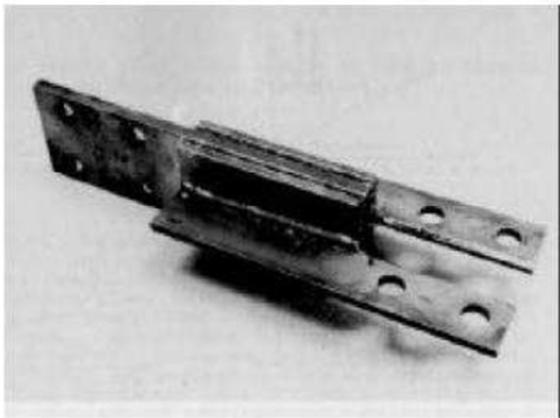


*Figura 19. Funcionamiento de un disipador viscoso. (Villareal Castro & Oviedo Sarmiento, 2009)*

### 6.2.3. Dispositivos dependientes del desplazamiento y la velocidad o mixtos.

#### I. Disipadores viscoelásticos.

Estos dispositivos combinan las propiedades de viscosidad de un fluido y elasticidad de un sólido, lo que les permite disipar energía y reducir las deformaciones de la estructura. Funcionan al deformarse bajo la acción de fuerzas externas, ofreciendo resistencia a la deformación y absorbiendo energía a lo largo del proceso. Generalmente, están hechos de polímeros o elastómeros que tienen propiedades viscoelásticas, lo que significa que el material responde tanto como un sólido elástico (almacenando energía) como un fluido viscoso (disipando energía). Un ejemplo de estos está formado por chapas metálicas unidas por capas finas de material viscoelástico y presentan unos ciclos histeréticos característicamente elípticos como el de la **Figura 20**. (Mayorga Vela, 2011)



*Figura 20. Disipador viscoelástico. (Mayorga Vela, 2011)*

#### II. Amortiguadores de masa sintonizada (AMS):

En este caso, la estructura se acopla a una masa adicional para formar un sistema de resonancia. Su funcionamiento se basa en que dicha masa oscila en respuesta a los desplazamientos de la estructura principal, generando una fuerza opuesta que contrarresta las vibraciones. El sistema consta de una masa, un resorte y un amortiguador viscoso, colocados en el sistema vibrante principal para atenuar la vibración indeseada a una frecuencia específica, así como se ilustra en la **Figura 21**. La frecuencia natural del amortiguador se sintoniza con la frecuencia natural de la estructura principal, lo que provoca que el amortiguador entre en resonancia, disipando la energía

absorbida mediante los mecanismos de amortiguamiento del sistema de masa sintonizada (AMS). Al ajustar la frecuencia natural de este sistema, se logra minimizar la respuesta sísmica. La energía vibracional se transfiere a la masa adicional, reduciendo la amplitud de los movimientos de la estructura (Ambrosini, Cuitiño, & Rebeco, 2004)

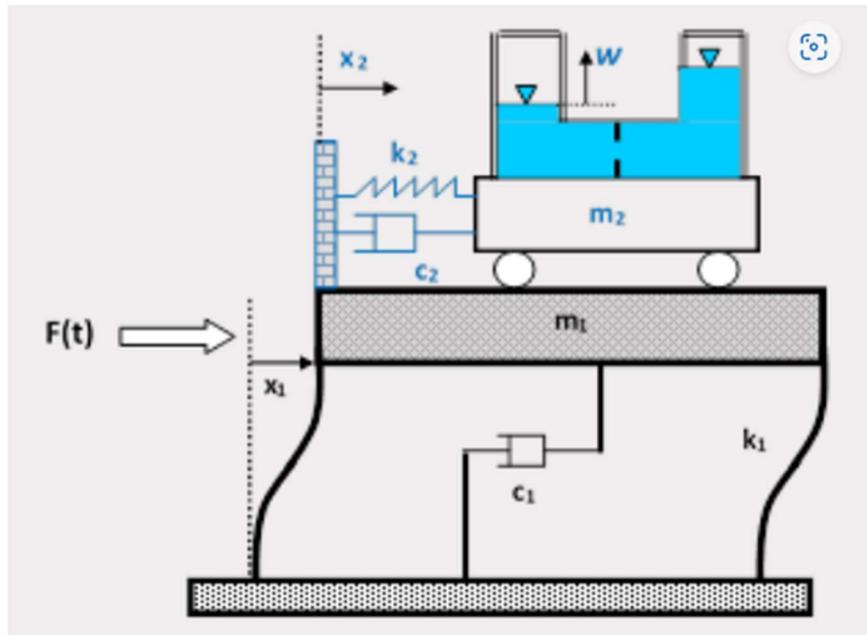


Figura 21. Amortiguador de masa sintonizada. (Martínez, Blandón, & Lara, 2022)

## 7. Metodología

La  $E_L$  muestra la relación de la conservación de la energía en un sistema estructural expuesto a una excitación sísmica. (Villareal & Oviedo, 2009)

$$E_L = E_K + E_S + E_A + E_D$$

*Ecuación 1. Ecuación de equilibrio dinámico.*

Dónde:

EL-Energía absoluta de entrada del movimiento sísmico.

EK-Energía cinética.

ES-Energía de deformación elástica recuperable.

EA-Energía de amortiguamiento.

ED-Energía irrecuperable disipada por el sistema estructural a través de la inelasticidad.

Para que el sistema estructural sea capaz de soportar las sollicitaciones sísmicas, la capacidad de respuesta de esta debe ser mayor que la demanda sísmica. En pocas palabras la energía de entrada (EL) debe ser absorbida o disipada por la suma de la energía cinética (EK), elástica (ES), de amortiguamiento (EA) e inelástica (ED). (Villareal & Oviedo, 2009)

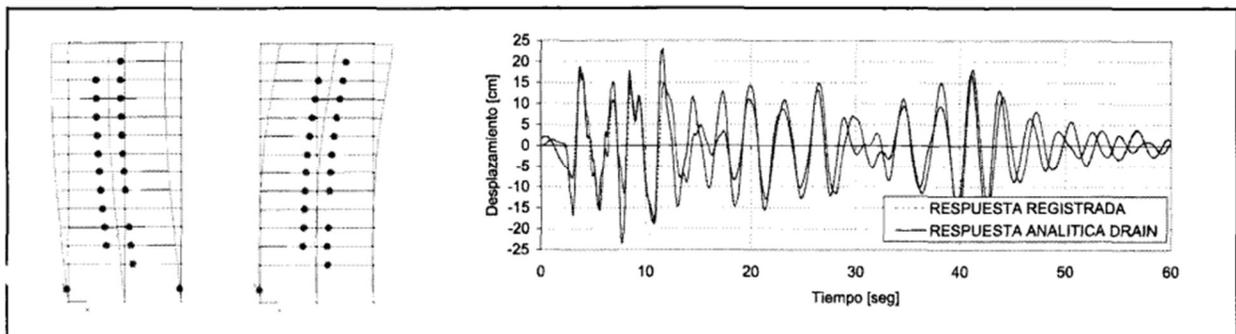
Se busca analizar, a través de una revisión bibliográfica, en qué medida los diferentes tipos de disipadores sísmicos afectan la ecuación de equilibrio dinámico, en función de la cantidad de energía de deformación absorbida por las estructuras al variar el nivel de amortiguamiento.

## 8. Resultados

A continuación, se presentarán algunos resultados representativos recientes encontrados en la revisión bibliográfica para los tipos de dispositivos disipadores mencionados en el marco teórico, agrupándolos de acuerdo con su dependencia del desplazamiento, la velocidad o una combinación de ambos:

### 8.1. Dispositivos dependientes del desplazamiento

- I. En 2002, Reyes y Rubiano (Reyes & Rubiano, 2002) analizaron el edificio Sherman Oaks, una construcción comercial de 15 pisos ubicada en Los Ángeles, Estados Unidos, con una planta rectangular de 58.83 m x 22.86 m, que requería ser rehabilitada. Se realizaron modelos elásticos e inelásticos utilizando los programas SAP 2000 y DRAIN-2DX, sometiendo la estructura al sismo de Northridge, registrado por 15 acelerógrafos instalados en el propio edificio. Los resultados del modelo se compararon con el comportamiento real observado durante el sismo, logrando una coincidencia aproximada en los períodos de la estructura. En la **Figura 22** se presenta una comparación entre las respuestas registradas y las obtenidas analíticamente. (Reyes & Rubiano, 2002)



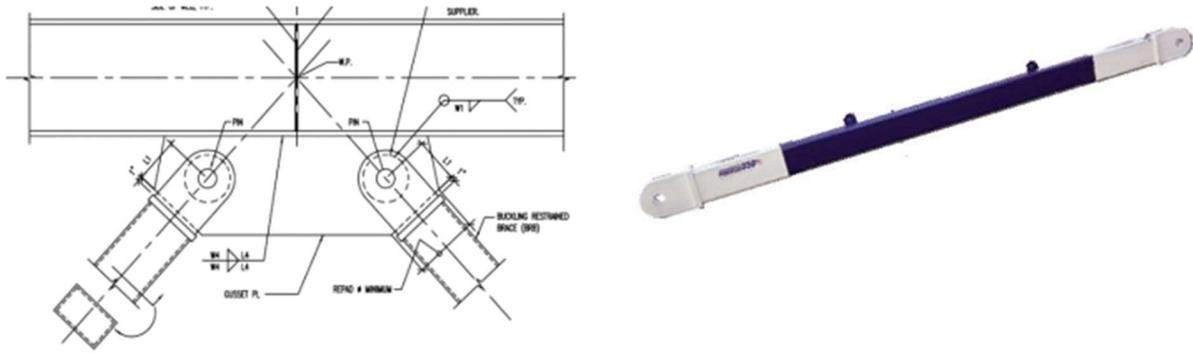
*Figura 22. Respuesta registrada vs respuesta analítica. (Reyes & Rubiano, 2002)*

Una vez verificado el modelo inicial, se procedió a realizar un análisis de rehabilitación utilizando dos enfoques: mediante muros estructurales y con disipadores de energía metálicos. En la **Tabla 1** se observa que los desplazamientos y las fuerzas cortantes son menores al utilizar disipadores de energía en comparación con los muros de concreto, y adicionalmente se tiene que el costo de implementar ambas alternativas es muy similar. (Reyes & Rubiano, 2002)

*Tabla 1. Resultados de ambos modelos de rehabilitación vs estructura original. (Reyes & Rubiano, 2002)*

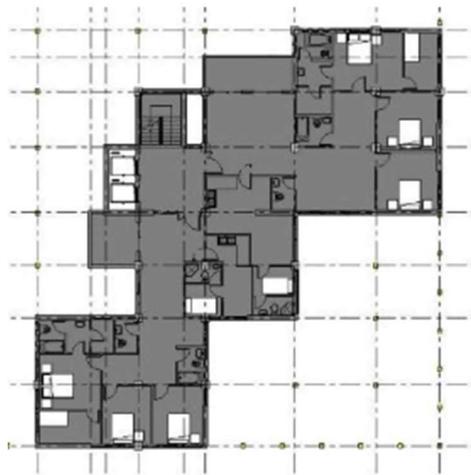
Modelo	Sismo	Método estático no lineal		Método dinámico no lineal	
		Cortante [kN]	Desplaz. [cm]	Cortante [kN]	Desplaz. [cm]
Estructura original	Northridge	10 000	23	10 190	23.53
Estructura original	San Fernando	13 370	45	13 154	45.72
Estructura original	Kobe	14 900	64	17 800	58.52
Con muros	San Fernando	14 000	30	14 205	29.72
Con muros	Kobe	19 000	64	20 970	61.26
Con disipadores	San Fernando	15 916	22	12 706	22.43
Con disipadores	Kobe	19 306	52	23 033	53.34

- II. En 2014, Rodríguez, Aguilar y Medina (Rodríguez, Aguilar, & Medina, 2014) investigaron el uso de barras de pandeo restringido (**Buckling Restrained Braced Frames**, BRBF) como disipadores sísmicos en un edificio ubicado en Bucaramanga, Colombia. Los BRBF son elementos diseñados para evitar el pandeo de una barra central de acero, la cual disipa energía a través de ciclos estables de fluencia bajo tracción y compresión. Para lograrlo, la barra central se encuentra dentro de un tubo de acero relleno de hormigón o mortero, con una capa de deslizamiento entre la barra de acero y el hormigón. Esta capa elimina la transferencia de corte durante la elongación y contracción de la barra, permitiendo que las cargas axiales sean absorbidas únicamente por la barra central, y acomoda su expansión lateral cuando trabaja en compresión. En la **Figura 23** se muestra la conexión típica de un BRBF. (Rodríguez, Aguilar, & Medina, 2014)



*Figura 23. Conexión típica del BRBF. (Rodríguez, Aguilar, & Medina, 2014)*

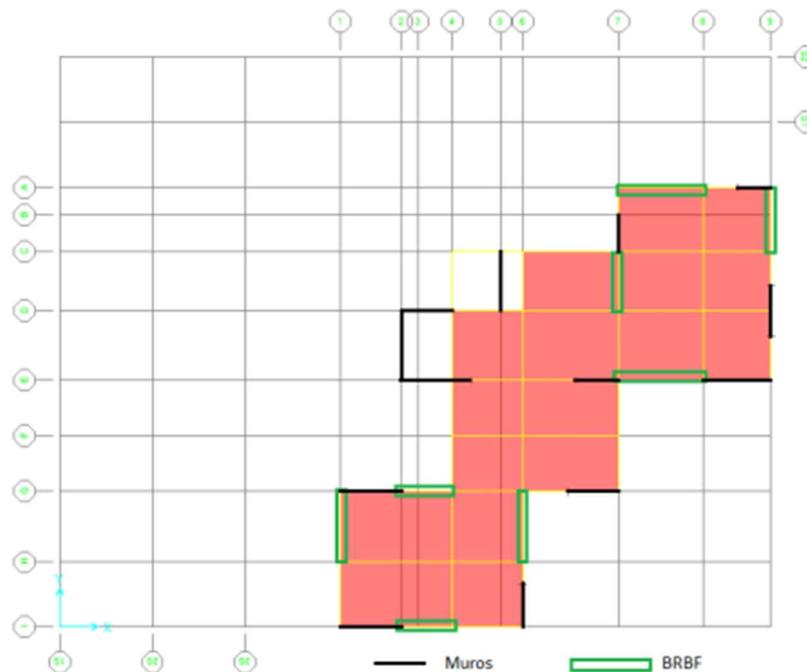
El edificio analizado cuenta con 25 pisos y presenta irregularidades geométricas en planta (**Figura 24**). La modelación se realizó utilizando SAP2000 v15. Debido a inconvenientes en la ubicación de los dispositivos sísmicos debido a la configuración arquitectónica original, fue necesario modificar la estructura, pasando de un sistema de muros estructurales a una estructura combinada. Este cambio permitió optimizar las condiciones para la incorporación de los dispositivos y reducir la rigidez de la estructura. (Rodríguez, Aguilar, & Medina, 2014)



*Figura 24. Planta de la edificación estudiada. (Rodríguez, Aguilar, & Medina, 2014)*

Se desarrollaron cinco modelos tridimensionales con diferentes ubicaciones de los BRBF para evaluar el posible incremento en la disipación de energía. Con el fin de simplificar el proceso, se utilizó un modelo estructural de 7 pisos, con pórticos y geometrías irregulares, variando las

orientaciones de los BRBF. La configuración que ofreció el mejor desempeño se muestra en la **Figura 25**. (Rodríguez, Aguilar, & Medina, 2014)



*Figura 25. Localización de los BRBF en planta. (Rodríguez, Aguilar, & Medina, 2014)*

En la **Tabla 2** se presentan los resultados de 7 ejes que fueron objeto de análisis debido a que mostraban los mayores desplazamientos dentro de la estructura. Se observaron reducciones de hasta el 52% en los desplazamientos. (Rodríguez, Aguilar, & Medina, 2014)

En este orden de ideas se encontró que las velocidades relativas para la dirección X disminuyeron gracias a la inclusión de los BRBF, donde se encontraron velocidades máximas de 0.95 m/s para el Eje A8-SD en la dirección -X y una velocidad mínima de 0.64 m/s en la dirección +X para el Eje D6-CD. Para la dirección Y se evidenció que las velocidades no sufrieron grandes cambios. No obstante, se encontró que la dirección -Y obtuvo los menores valores de la velocidad relativa presentados. En esta dirección se encontraron aceleraciones de 0.79 m/s SD (Eje C9) y de 0.74 m/s CD (Eje C9). (Rodríguez, Aguilar, & Medina, 2014)

Tabla 2. Desplazamientos máximos con y sin disipadores. (Rodríguez, Aguilar, & Medina, 2014)

Comparaciones de los Desplazamientos Máximos (mm)					
TIPO	Eje	Dirección X		Dirección Y	
		X+	X-	Y+	Y-
CD	A-7	271.57	254.08	206.26	220.45
SD		460.37	534.35	302.50	226.39
$\Delta$ Desplazamientos		188.80	280.27	96.25	5.95
% de Reducción		41%	52%	32%	3%
CD	A-8	271.57	254.17	230.06	231.48
SD		460.41	534.51	343.00	263.66
$\Delta$ Desplazamientos		188.84	280.34	112.94	32.19
% de Reducción		41%	52%	33%	12%
CD	C-4	270.52	255.63	148.21	170.10
SD		443.59	503.91	205.95	156.28
$\Delta$ Desplazamientos		173.07	248.29	57.74	-13.83
% de Reducción		39%	49%	28%	-9%
CD	C-8	269.88	255.82	230.09	231.39
SD		442.82	503.97	343.02	263.57
$\Delta$ Desplazamientos		172.94	248.15	112.93	32.18
% de Reducción		39%	49%	33%	12%
CD	C-9	269.81	255.89	252.69	242.87
SD		442.75	504.05	377.07	294.74
$\Delta$ Desplazamientos		172.93	248.16	124.38	51.87
% de Reducción		39%	49%	33%	18%
CD	D-6	260.48	259.08	171.44	189.72
SD		422.77	479.51	242.91	178.54
$\Delta$ Desplazamientos		162.28	220.44	71.47	-11.18
% de Reducción		38%	46%	29%	-6%
CD	H-1	257.51	269.82	140.04	148.29
SD		314.38	360.84	161.77	144.70
$\Delta$ Desplazamientos		56.87	91.01	21.73	-3.59
% de Reducción		18%	25%	13%	-2%

Cd: con disipadores

Sd; sin disipadores

Con el objetivo de analizar el comportamiento de la estructura, se determinaron las deformaciones inelásticas, las cuales se manifiestan en forma de rótulas plásticas. Estas rótulas son el resultado del aumento de la flexibilidad y la disipación de energía. En este contexto, se identificaron las rótulas plásticas para los modelos SD y CD, obteniendo un total de 215 rótulas plásticas en la estructura SD. Por otro lado, en la estructura CD se contabilizaron un total de 17

rótulas plásticas. Estos resultados indican que la inclusión de los BRBF contribuyó a disminuir significativamente los efectos de deformación inelástica, tal como se muestra en los resultados de la **Tabla 3**. (Rodríguez, Aguilar, & Medina, 2014)

*Tabla 3. Número de rotulas plásticas con y sin disipadores. (Rodríguez, Aguilar, & Medina, 2014)*

Nivel de Referencia	Piso	Numero de rotulas por piso		% Disminución
		SD	CD	
Nivel +0 m	0	10	2	80%
Nivel +3.13 m	1	6	0	100%
Nivel +6.13 m	2	12	0	100%
Nivel +9.13 m	3	14	0	100%
Nivel +12.13 m	4	24	2	92%
Nivel +15.13 m	5	26	2	92%
Nivel +18.13 m	6	54	6	89%
Nivel +24.13 m	8	70	4	94%
Nivel +30.13 m	10	66	4	94%
Nivel +36.13 m	12	52	8	85%
Nivel +42.13 m	14	36	4	89%
Nivel +48.13 m	16	22	2	91%
Nivel +54.13 m	18	16	0	100%
Nivel +60.13 m	20	20	0	100%
Nivel +66.13 m	22	2	0	100%

Para el análisis comparativo de la disipación de energía, se elaboraron las curvas de capacidad de demanda mediante un análisis de Pushover modal (MP) para los primeros dos modos de vibración, los cuales representan el 52.2% de la masa total. Es importante señalar que el análisis MP puede llevarse a cabo utilizando todos los modos de vibración; sin embargo, para el presente estudio, se optó por centrarse en los primeros dos modos con el fin de verificar que el modelo desarrollado respondiera adecuadamente dentro del rango no lineal. La **Figura 26** ilustra las Curvas de Demanda Capacidad correspondientes a los modos de vibración m1 y m2. (Rodríguez, Aguilar, & Medina, 2014)

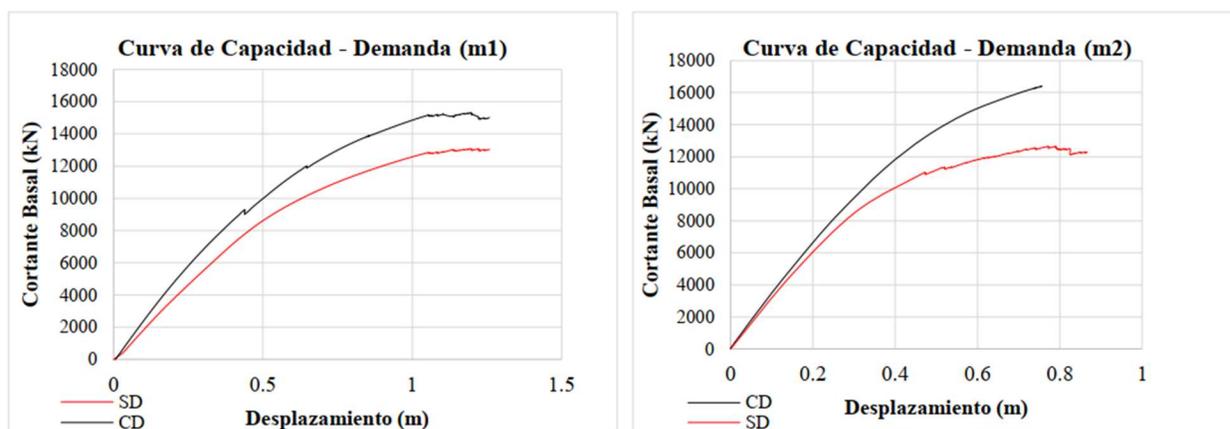


Figura 26. Curvas demanda-capacidad para los 2 primeros modos de vibración. (Rodríguez, Aguilar, & Medina, 2014)

En la **Tabla 4**, se presentan los resultados, donde se encontró que el coeficiente de capacidad de disipación de Energía aumento un 27.0% gracias a la incorporación de los BRBF. (Rodríguez, Aguilar, & Medina, 2014)

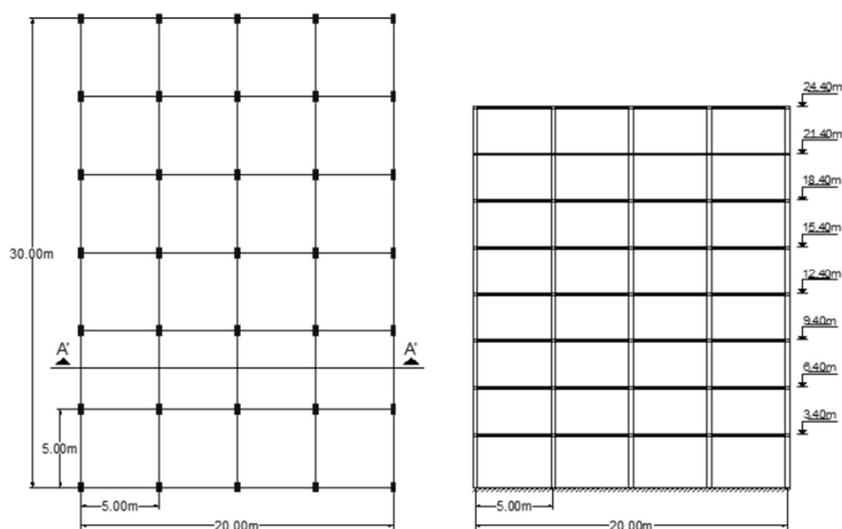
Tabla 4. Factores de sobre resistencia. (Rodríguez, Aguilar, & Medina, 2014)

<b>Factor de Sobrerresistencia</b>		
Valor	CD	SD
$R\Omega$	2.496	1.987
$R\Omega$ ATC	2.496	1.987
<b>Factor de Redundancia</b>		
$R_r$	0.91	0.86
<b>Factor de Reducción (Análisis No lineal)</b>		
$R_\mu$	4.90	4.64
<b>Coficiente de Capacidad de Disipación de Energía</b>		
$R$	10.29	7.51

## 8.2. Dispositivos dependientes de la velocidad

- III. En 2016, Villareal y Díaz (Villareal & Díaz, 2016) presentan una metodología para el cálculo de edificaciones que incorporan disipadores de energía de fluido viscoso. Señalan que la mejor ubicación de estos dispositivos se determina a través de procesos iterativos, en los cuales el diseñador debe probar diversos modelos y

posiciones, siguiendo las recomendaciones generales establecidas en el capítulo 18 de la norma ASCE-7-10. Su metodología se aplicó a un edificio de oficinas de concreto armado, de 8 pisos, con una configuración regular tanto en planta como en elevación. El edificio cuenta con dimensiones en planta de 20 m x 30 m (**Figura 27**) y un sistema estructural de pórticos con vigas y columnas en ambas direcciones. Las alturas de entrepiso son de 3 m, el espesor de la losa es de 15 cm, las columnas tienen dimensiones de 0.3 m x 0.6 m, y las vigas presentan un espesor de 0.3 m y un peralte de 0.6 m. (Villareal & Díaz, 2016)



*Figura 27. Piso típico y corte de la edificación modelada con disipadores viscosos. (Villareal & Díaz, 2016)*

El modelado se realizó en SAP2000 v.17, empleando disipadores únicamente en el eje X-X, ya que era el que no cumplía con las derivas máximas permitidas por la normativa peruana. Villareal y Díaz determinan el amortiguamiento efectivo necesario para cumplir con las derivas permitidas, y a partir de este valor, calculan el amortiguamiento viscoso requerido por los disipadores, descontando el amortiguamiento inherente de la estructura, que usualmente es del 5% en estructuras de concreto armado. Esto da como resultado un amortiguamiento viscoso de 18.12%. La disposición inicial de los disipadores se presenta en la **Figura 28**. (Villareal & Díaz, 2016)

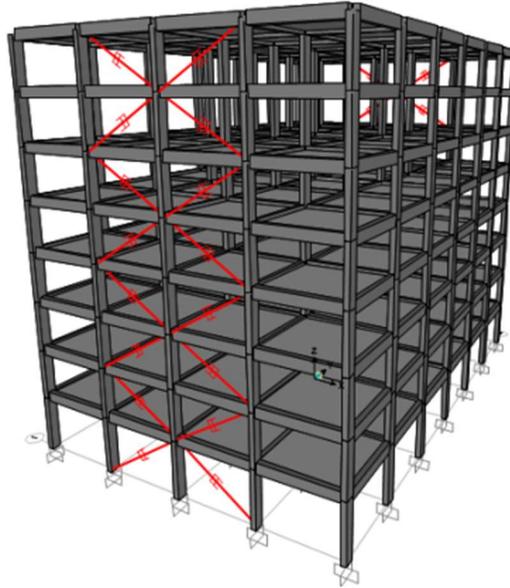


Figura 28. Ubicación de disipadores viscosos en la dirección X. (Villareal & Díaz, 2016)

Se calcula la rigidez del brazo metálico (K) y el coeficiente de amortiguamiento de los disipadores (C), los cuales fueron:

<u>Primer piso</u>	<u>2do al 8avo piso</u>
$C_j = 85 \frac{T.s}{m}$	$C_j = 85 \frac{T.s}{m}$
$K = 25776.53 T/m^2$	$K = 26878.09 T/m^2$
$\alpha = 0.5$	$\alpha = 0.5$

Figura 29. Valores de rigidez y coeficiente de amortiguamiento de los disipadores viscosos calculados. (Villareal & Díaz, 2016)

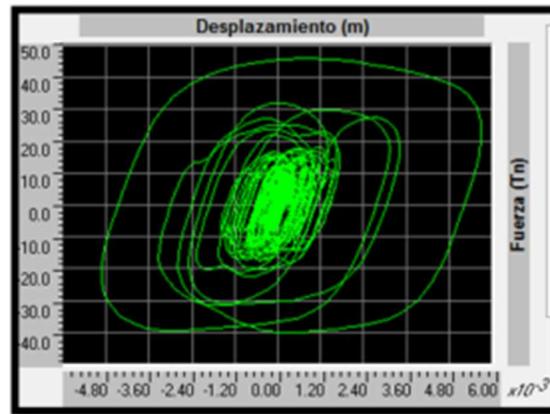
Se corre el modelo y se determina el porcentaje de disipación de energía de acuerdo con la

**Ecuación 2:**

$$\%disipación\ de\ energía = \frac{Energía\ del\ sistema\ de\ amortiguamiento}{Energía\ de\ entrada\ del\ sismo}$$

*Ecuación 2. Ecuación de % de disipación de energía (Villareal & Díaz, 2016)*

Analizando un disipador se obtiene el comportamiento histerético en forma elíptica propio de los disipadores viscosos mostrado en la **Figura 30**. (Villareal & Díaz, 2016)



*Figura 30. (Villareal & Díaz, 2016).*

Se obtuvieron los siguientes resultados mostrados en la **Tabla 5** para el modelo planteado:

*Tabla 5. Porcentaje de disipación de energía en la edificación con disipadores de fluido viscoso. (Villareal & Díaz, 2016)*

Energía(T.m)		
Entrada	Inherente de la estructura	Disipadores
289.72	142.78	146.94
100%	49.28%	50.72%

Se determinó que la mitad de la energía de entrada al sistema es absorbida por los disipadores, lo cual se atribuye a la gran cantidad de dispositivos utilizados (32 en total). Como resultado, se logra una reducción en los desplazamientos de piso en la dirección X-X en un rango del 41% al 43%, tal como se muestra en la **Figura 31**. (Villareal & Díaz, 2016)

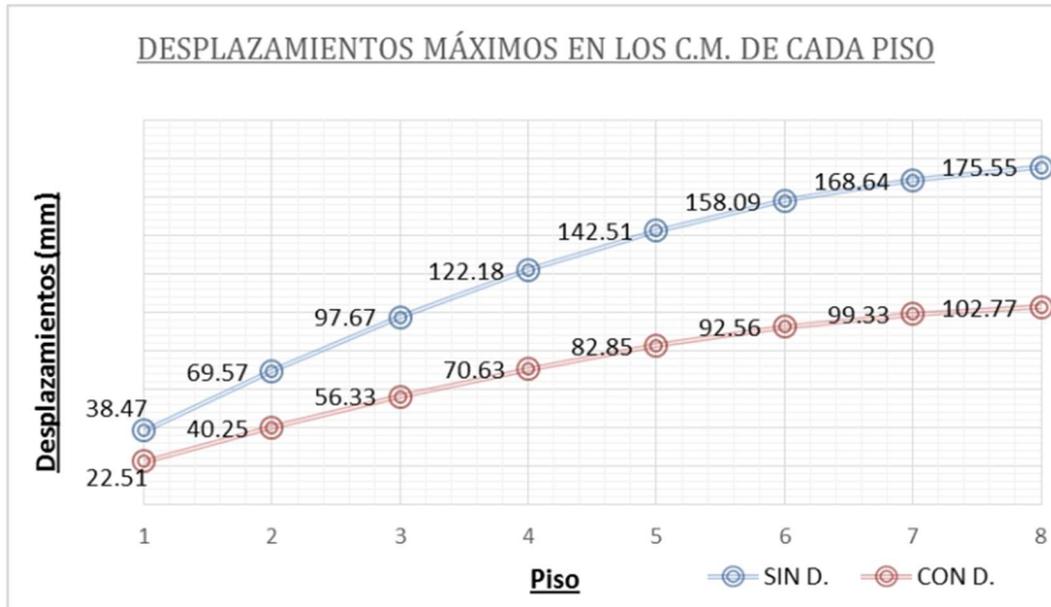


Figura 31. Desplazamientos máximos absolutos en los C.M. de cada piso con el uso de disipadores viscosos (Dirección X-X). (Villareal & Díaz, 2016)

Del mismo modo, las derivas de entrepiso en la dirección X-X se redujeron en un rango del 36% al 51%, como se muestra en la **Figura 32**. Además, se observó una reducción significativa en las fuerzas internas de las columnas. (Villareal & Díaz, 2016)

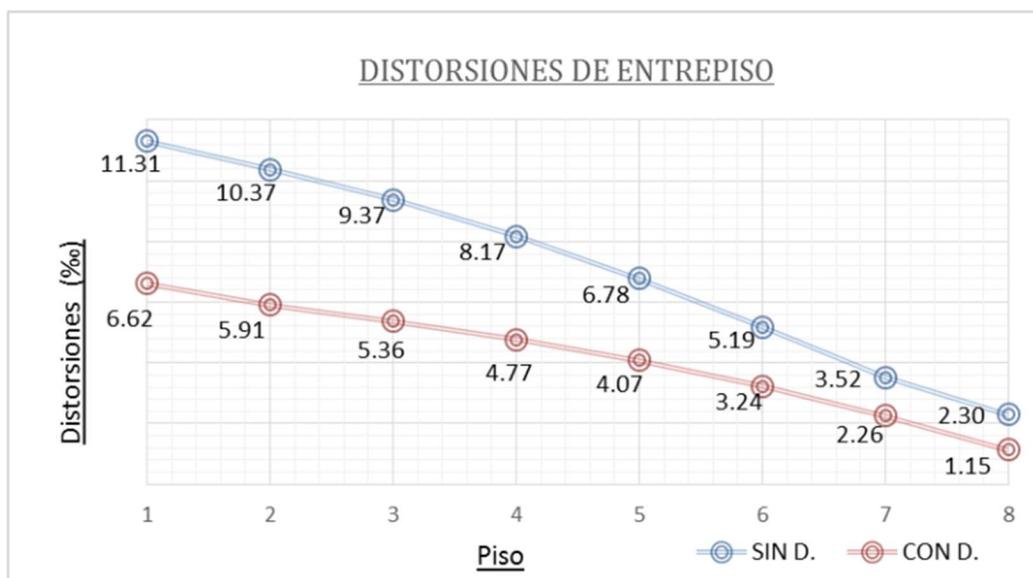
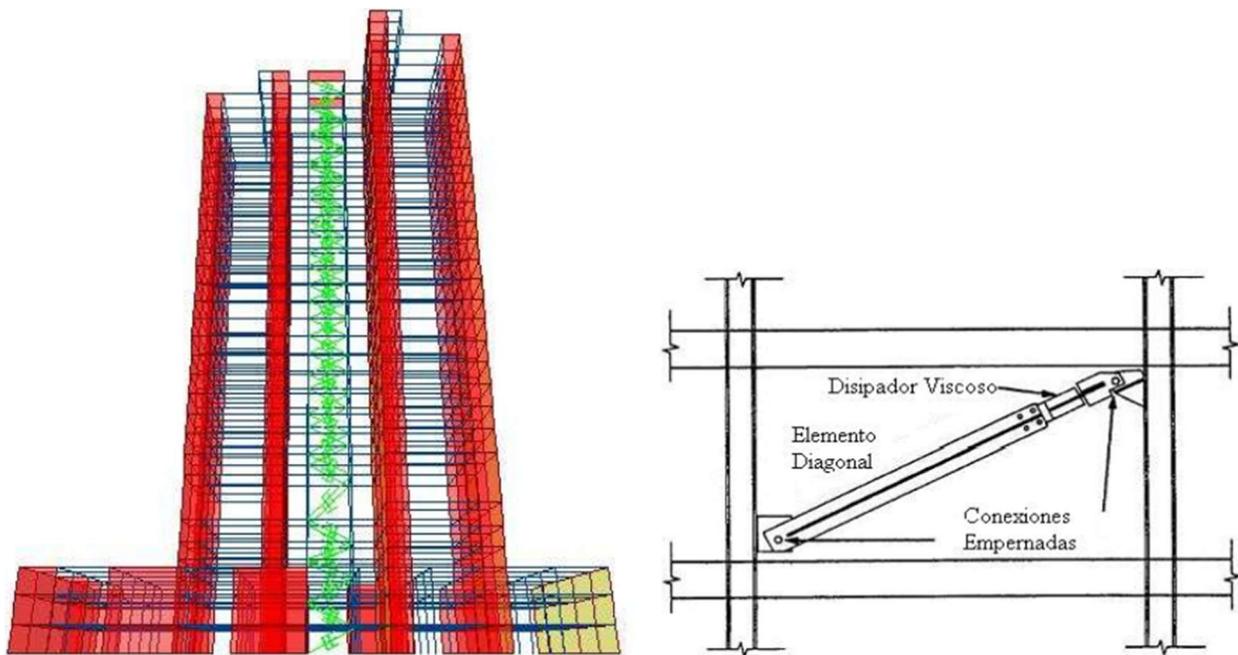


Figura 32. Derivas de entrepiso con el uso de disipadores viscosos (Dirección X-X). (Villareal & Díaz, 2016)

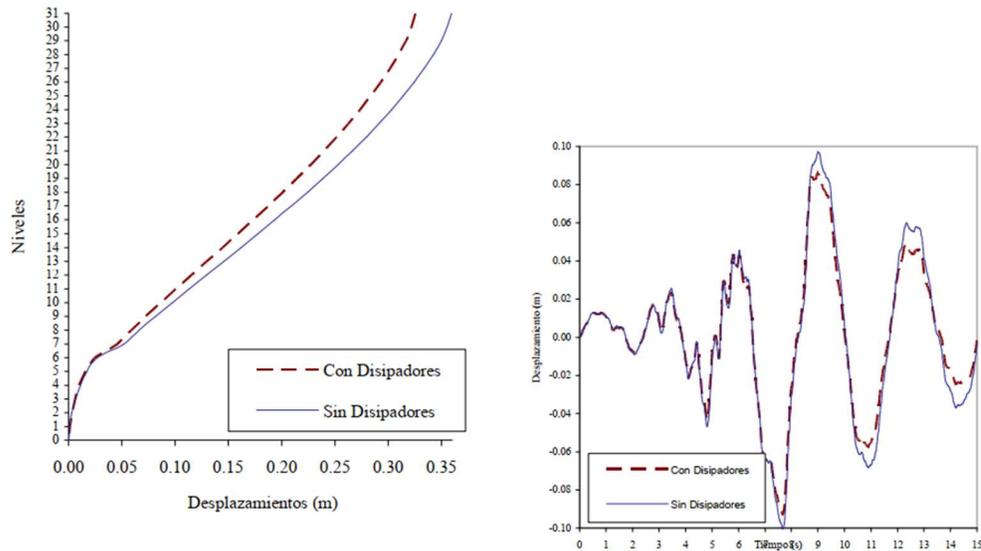
- I. En el estudio titulado *Control de la respuesta sísmica de edificios utilizando disipadores de energía*, (Oviedo R. , 2010) analiza y evalúa el comportamiento inelástico de un edificio tridimensional de concreto armado, con una altura total de 109.66 metros, modelado con disipadores de fluido viscoso mediante el programa SAP2000 v8.2.5. La **Figura 33** ilustra las condiciones mencionadas. Para el análisis, se utilizó un registro sísmico del evento ocurrido en octubre de 1966 en Lima, Perú, con una duración de 15 segundos. Se incorporaron 2 disipadores por nivel (un total de 60 unidades) con el objetivo de obtener un amortiguamiento adicional del 15% en el sistema. (Oviedo R. , 2010)



*Figura 33. Edificio con disipadores de fluido viscoso y detalle de disipador viscoso evaluados. (Oviedo R. , 2010)*

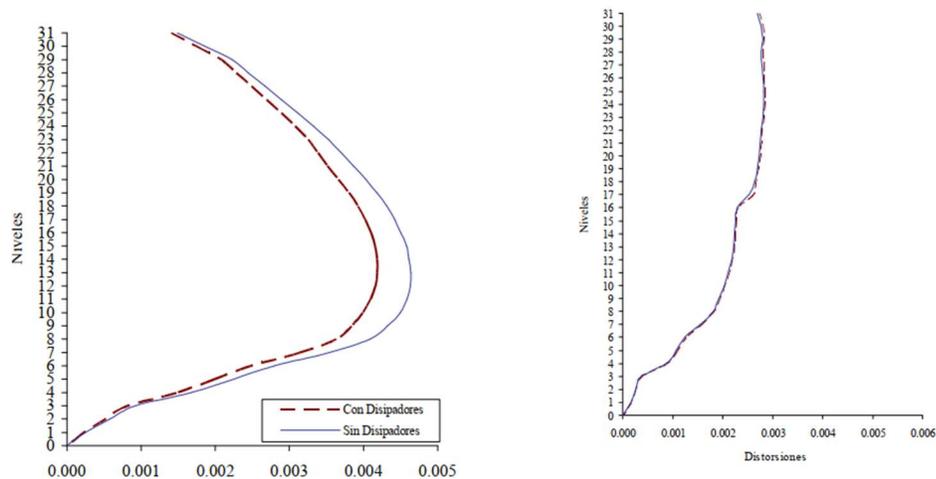
Se observó que el comportamiento en la dirección de los disipadores no presenta una reducción significativa en el período de los primeros modos. Sin embargo, sí influye en los modos restantes, dado que se trata de una estructura tridimensional con una torsión considerable. Esto es coherente con la teoría, que indica que los disipadores no afectan el período natural de la estructura. (Oviedo R. , 2010)

Con la implementación de los disipadores, los desplazamientos se redujeron en un 10.57%. En la **Figura 34** se presentan los resultados de los desplazamientos relativos y el desplazamiento de entrepisos, comparando las condiciones con y sin disipadores. (Oviedo R. , 2010)



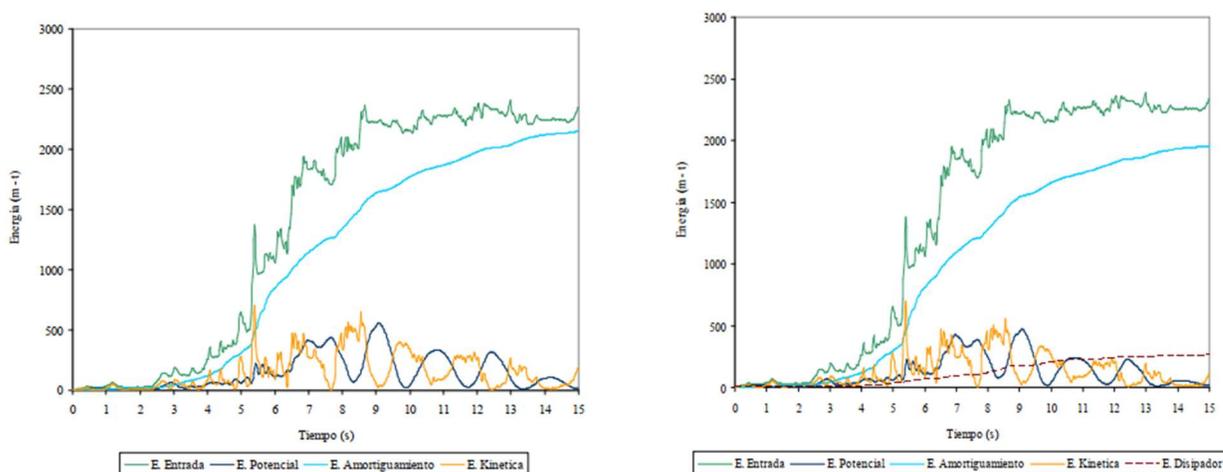
*Figura 34. Desplazamiento relativo de los pisos y desplazamiento de entrepiso vs tiempo. (Oviedo R. , 2010)*

Asimismo, se observó que la disminución de las derivas promedió un 9.62%, tal como se ilustra en la **Figura 35**. (Oviedo R. , 2010)



*Figura 35. Derivas en dirección X y derivas en dirección Y. (Oviedo R. , 2010)*

En la **Figura 36** se presenta gráficamente la modificación del comportamiento estructural del sistema tras la inclusión de los disipadores de energía. Se ilustra la distribución de la energía de entrada a lo largo del tiempo, evidenciando que los disipadores absorben una considerable cantidad de energía, mientras que el resto es disipada por la acción inelástica de los elementos de concreto de la estructura. (Oviedo R. , 2010)



*Figura 36. Energía edificio sin disipadores y con disipadores. (Oviedo R. , 2010)*

Los disipadores de energía reducen la transmisión de aceleración y velocidad en altura, en función del nivel de amortiguamiento diseñado. (Oviedo, 2010)

### 8.3. Dispositivos dependientes del desplazamiento y la velocidad

En 2022 Rueda y Inaudi (Rueda & Inaudi, 2022) estudiaron el efecto del uso de disipadores viscoso y de masa sintonizada (TMD) en edificios altos y esbeltos, en los cuales las cargas de viento podían comprometer el confort de sus ocupantes. Para esto se modelan 2 edificios de 40 y 60 plantas (caso 1 y caso 2) en el programa SAP2000, para esto se optó de que fueran de hormigón armado compuesto por marcos rígidos con un núcleo de muros de corte en la zona de servicios; esta disposición se muestra en la **Figura 37**. (Rueda & Inaudi, 2022)

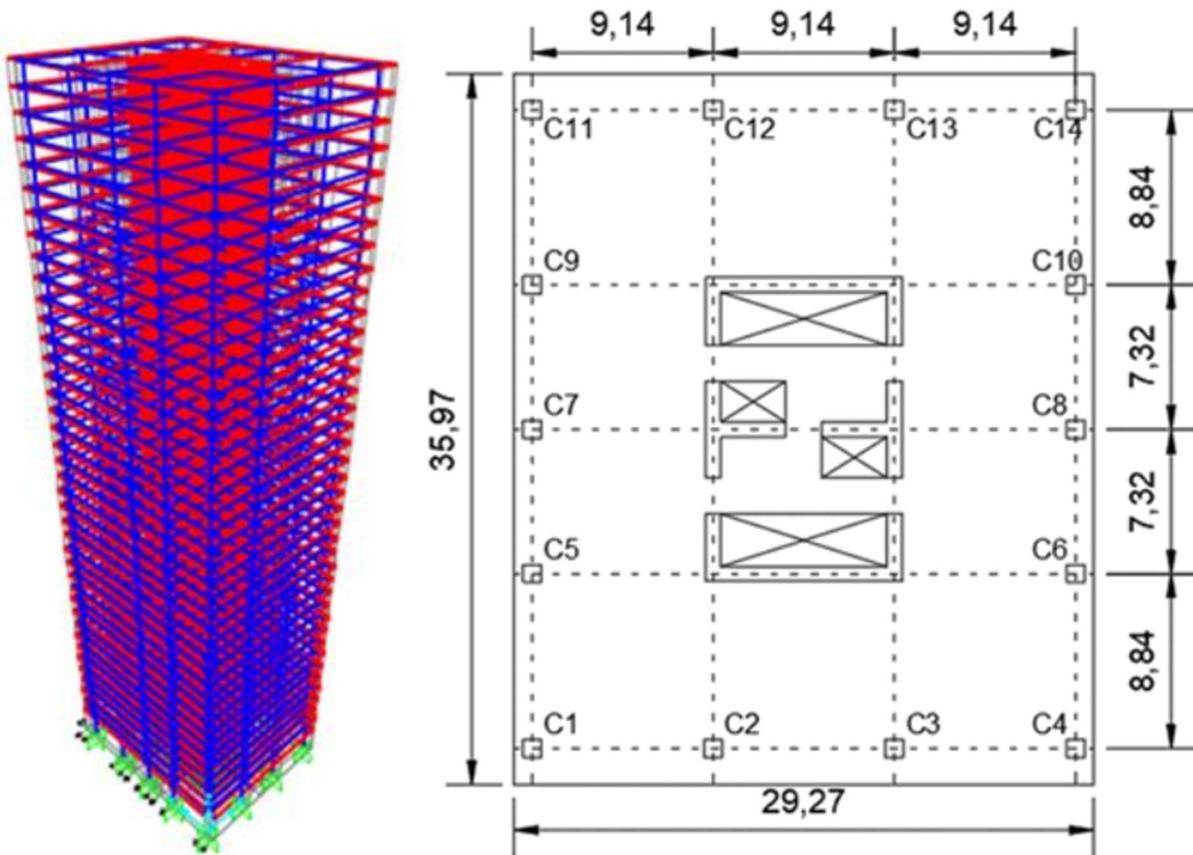
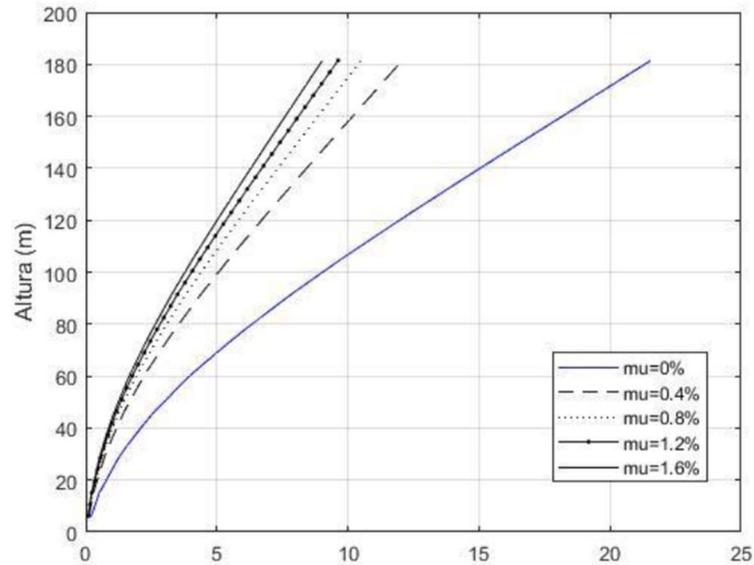


Figura 37. Disposición estructural de los casos estudiados. (Rueda & Inaudi, 2022)

Dado que la percepción humana y la tolerancia de los ocupantes a las vibraciones en edificios son esencialmente subjetivas, existen diferencias e incertidumbres significativas entre los criterios de confort de ocupantes en condiciones de servicio comúnmente utilizados por los laboratorios de túneles de viento y los profesionales del diseño. Reconociendo la complejidad de la evaluación del confort de ocupantes en edificios altos excitados por el viento, las diferencias en las metodologías de evaluación actualmente en uso y la variabilidad de los niveles aceptables de aceleración, el manual de carga de viento publicado para Australia y Nueva Zelanda AWES-HB-001-2012 ofrece una guía sencilla. El manual sugiere que, en general, es poco probable que los edificios que exhiben con frecuencia vibraciones inducidas por el viento con aceleraciones medias máximas superiores a 10 mili-g sean aceptables para la mayoría de los ocupantes, ya que la mayoría

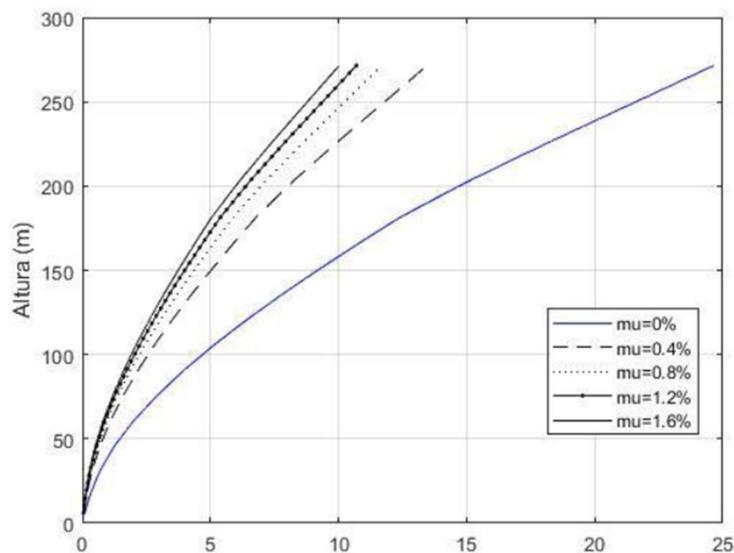


En la **Figura 39** se puede apreciar que para el caso 1 se obtienen aceleraciones de piso menores a 10 mili-g con los amortiguadores de masa sintonizados que tienen una masa modal mayor a 1,2% (Rueda & Inaudi, 2022)



*Figura 39. Aceleraciones máximas de piso para diferentes valores de razón de masas en el TMD para el caso 1. (Rueda & Inaudi, 2022)*

A continuación, se determinaron las aceleraciones medias máximas inducidas por las cargas de vientos de recurrencia anual, en la estructura de 60 niveles con un TMD en su nivel más alto (**Figura 40**). (Rueda & Inaudi, 2022)



*Figura 40. Aceleraciones medias máximas de piso para diferentes valores de razón de masas en el TMD para el caso 2. (Rueda & Inaudi, 2022)*

De donde se observa que para el caso 2 no se obtienen aceleraciones de piso menores a 10 mili-g con TMD's que tengan una razón de masa modal menores o iguales a 1.6%. (Rueda & Inaudi, 2022)

## 9. Discusión

La implementación de disipadores de energía en edificaciones ha sido ampliamente aceptada y probada en la práctica, ya que aportan beneficios significativos al comportamiento sísmico de las estructuras. Estos dispositivos permiten reducir la demanda sísmica en la estructura principal y concentrar el daño en puntos o elementos previamente identificados. En caso de que los disipadores resulten dañados tras un sismo, su diseño busca que sean fácilmente reemplazables, permitiendo que la estructura recupere su funcionalidad en poco tiempo. En algunos casos, también contribuyen a aumentar la rigidez de la edificación, lo que puede ser beneficioso.

Los disipadores de energía ayudan a reducir significativamente los esfuerzos y deformaciones inducidos por los sismos, en comparación con estructuras similares que no cuentan con estos dispositivos. De este modo, no solo disminuyen los daños en los elementos estructurales, sino también en los no estructurales y en los bienes almacenados dentro de las edificaciones.

A pesar de las múltiples mejoras que ofrecen al comportamiento sísmico de las estructuras, algunos tipos de disipadores pueden generar problemas tras un sismo, como deformaciones remanentes que dificultan la recuperación funcional de la estructura. Además, tras un terremoto de gran magnitud, es posible que algunos disipadores deban ser reemplazados o reparados, lo que introduce costos adicionales que deben ser considerados por los diseñadores.

Para determinar las ventajas o desventajas económicas de incorporar dispositivos de aislamiento y disipación de energía en los diseños estructurales, lo más adecuado es comparar los costos de soluciones con y sin dichos dispositivos. La solución más apropiada desde un punto de vista económico puede variar en cada caso, por lo que es necesario realizar una evaluación exhaustiva considerando los requisitos normativos vigentes y las necesidades del cliente. No obstante, en situaciones donde se deben proteger equipos costosos o mantener la operatividad inmediata de la estructura, el uso de disipadores de energía es una de las mejores soluciones.

Un análisis adecuado de los costos asociados a la implementación de estos dispositivos debe contemplar todas las etapas del ciclo de vida de la estructura. Comparar únicamente los costos iniciales de una estructura con y sin aisladores no proporciona una visión completa, ya que

también se deben considerar los costos de mantenimiento y reparación a lo largo de la vida útil de la estructura.

Otro aspecto favorable es la rápida recuperación operativa de las edificaciones tras un sismo. Contar con estructuras sin daños y con funcionalidad inmediata genera beneficios indirectos para la sociedad, ya que contribuye a la recuperación de la actividad económica global, más allá del impacto en la propia edificación. Esto refuerza la resiliencia de la comunidad. Por ejemplo, si una edificación comercial en la que se venden productos frágiles y costosos no sufre daños, las actividades productivas pueden reanudarse rápidamente, lo que acelera la recuperación económica de la comunidad. Este factor de resiliencia también es clave para infundir en la población una sensación de seguridad y confianza. La rápida restauración de las actividades cotidianas tras un sismo tiene un impacto positivo tanto a nivel humano como económico. En contraste, la presencia de estructuras destruidas parcial o totalmente genera una percepción negativa y pesimista que afecta el bienestar de la población.

Adicionalmente, el principal beneficio de estos sistemas es que aumentan la seguridad para los ocupantes, ya que ayudan a reducir el número de víctimas y los daños en caso de sismos severos.

Por último, Genatios y Lafuente (Genatios & Lafuente, 2016) elaboraron un cuadro que presenta las ventajas y desventajas de los distintos tipos de disipadores sísmicos. Esta información se considera pertinente y se muestra en la **Tabla 6**, sirviendo como una guía útil para su selección.

Tabla 6. Ventajas y desventajas de los disipadores sísmicos. (Genatios & Lafuente, 2016)

DISPOSITIVO	VENTAJAS	DESVENTAJAS
Disipador histerético metálico	Comportamiento histerético estable. Confiables a largo plazo. No son sensibles a cambios de temperatura ambientales. Son materiales tradicionales en la construcción, familiares para los ingenieros civiles.	Deben ser reemplazados si son solicitados por un sismo. La estructura puede quedar con desplazamientos residuales después de un sismo. Se requieren análisis no lineales.
Disipador de fricción	Disipan grandes cantidades de energía por ciclo de histéresis. No son sensibles a cambios de temperatura ambientales.	Las condiciones de la superficie de rozamiento pueden cambiar con el tiempo. Se requieren análisis no lineales. La estructura puede quedar con desplazamientos residuales después de un sismo.
Disipador de fluido viscoso	Comportamiento lineal (facilidades de modelado). Sus propiedades son constantes en altos rangos de variación de frecuencia y temperatura. Se han comercializado por su alta confiabilidad. Mínima fuerza de restauración.	Dificultades de instalación. Requieren revisiones periódicas para detectar posibles fugas del fluido viscoso
Disipador viscoelástico	Polímeros de comportamiento lineal (facilidades de modelado) Se activan para bajos niveles de desplazamiento Comportamiento elástico (vuelven a su forma original)	Limitada capacidad de deformación. Su comportamiento depende del nivel de deformación, de la temperatura y la frecuencia. Requieren revisiones periódicas para verificar posible deterioro del material viscoelástico.
Disipador de masa Sintonizada	Ubicación generalmente en el último piso Facilidad de instalación y de mantenimiento. Adecuado para estructuras regulares donde domine el primer modo de vibración.	Sensibilidad a errores en la frecuencia natural de la estructura y/o la relación de amortiguamiento. Gran espacio requerido para su instalación

## 10. Conclusiones

- Se observa que los disipadores sísmicos impactan la respuesta dinámica de una estructura al disminuir la cantidad de energía disipada por el sistema principal de resistencia sísmica. Esto se logra mediante un incremento en el nivel de amortiguamiento de la estructura.
- Se observa que, aunque los disipadores sísmicos no alteran el período fundamental de una estructura, reducen los niveles de energía que afectan tanto a los elementos estructurales como a los no estructurales. Esto resulta en una disminución de los desplazamientos máximos, de las derivas de entrepiso, así como de la velocidad y aceleración transmitidas a lo largo de la estructura.
- La magnitud o grado de eficiencia en el uso de disipadores sísmicos depende principalmente de tres variables: el tipo de disipador utilizado, su ubicación y la cantidad de dispositivos instalados. Por lo tanto, para alcanzar el grado de eficiencia deseado, es necesario realizar iteraciones que consideren estas tres variables con el objetivo de optimizar el diseño estructural.
- Un análisis inelástico proporciona una aproximación más precisa al comportamiento real de la estructura ante un evento sísmico, ya que la respuesta en el tiempo y los esfuerzos en los elementos varían a lo largo de este. La formación de rótulas plásticas permite identificar las zonas más vulnerables de la estructura, lo que destaca las áreas donde se debe poner mayor énfasis en el diseño o en la posible incorporación de mecanismos disipadores de energía.
- Se observa una modificación significativa en el comportamiento estructural de los edificios estudiados al integrar disipadores de energía. Según los resultados obtenidos, se puede afirmar que, ante los niveles de aceleración considerados, las estructuras desarrollan un mecanismo estable y no colapsarían frente a sismos severos. Una cantidad significativa de la energía de entrada es disipada por la acción inelástica de los elementos, mientras que otra parte importante es absorbida por los disipadores de energía.
- Se concluye que las derivas no son el único factor relevante en el diseño. Los disipadores de energía no solo reducen las deformaciones, sino que también influyen en la acción inelástica. Además, estos dispositivos disminuyen la transmisión de aceleración y velocidad a lo largo de la altura de la estructura, en función del nivel de amortiguamiento diseñado.

## 11. Recomendaciones

- Investigar métodos para mejorar la eficiencia de los disipadores sísmicos, incluyendo el desarrollo de nuevos materiales y configuraciones. Esto podría implicar el análisis de disipadores híbridos que combinan diferentes mecanismos de disipación para optimizar el rendimiento global.
- Explorar la integración de disipadores sísmicos con tecnologías emergentes como los sensores inteligentes y sistemas de monitoreo en tiempo real. Esto permitiría ajustar dinámicamente el rendimiento de los disipadores en función de las condiciones sísmicas actuales.
- Ampliar los estudios y pruebas de disipadores sísmicos a estructuras de mayor escala y en condiciones más diversas para evaluar su eficacia en diferentes tipos de edificaciones y condiciones sísmicas.
- Realizar un análisis más detallado del costo-beneficio de implementar distintos tipos de disipadores sísmicos, considerando no solo el costo inicial, sino también el impacto en el mantenimiento y la longevidad de las estructuras.
- Proponer mejoras en las normativas y estándares existentes para el diseño y la implementación de disipadores sísmicos, basadas en los hallazgos más recientes de la investigación.
- Fomentar la realización de más pruebas experimentales en condiciones reales y simuladas para validar el rendimiento de diferentes tipos de disipadores sísmicos. Los datos obtenidos ayudarán a ajustar los modelos teóricos y mejorar la precisión de los diseños.
- Desarrollar directrices y mejores prácticas para la implementación de disipadores sísmicos en proyectos de construcción. Esto incluiría recomendaciones sobre la integración de disipadores en el diseño estructural y la coordinación con otros elementos del sistema de protección sísmica.
- Investigar cómo la incorporación de disipadores sísmicos afecta la estética y funcionalidad de los edificios, y desarrollar soluciones que permitan integrar estos dispositivos de manera eficiente sin comprometer el diseño arquitectónico.

- Evaluar cómo los diferentes tipos de disipadores sísmicos responden a diferentes magnitudes y tipos de eventos sísmicos (p. ej., terremotos de alta frecuencia vs. baja frecuencia) para optimizar su uso en distintas regiones sísmicas.
- Promover programas de capacitación y educación para ingenieros y diseñadores sobre el uso y la implementación de disipadores sísmicos, asegurando que se apliquen correctamente en proyectos reales.

### Posibles Líneas de Investigación

1. Investigar nuevas generaciones de disipadores sísmicos, como los basados en materiales con memoria de forma (SMAs) o dispositivos basados en fluidos no newtonianos, que podrían ofrecer ventajas significativas en términos de eficiencia y adaptabilidad.
2. Estudiar la interacción entre disipadores sísmicos y otras estrategias de mitigación de daños, como los sistemas de aislamiento sísmico, para desarrollar enfoques integrados que maximicen la protección estructural.
3. Desarrollar modelos computacionales más precisos para simular el comportamiento de los disipadores sísmicos bajo diversas condiciones de carga sísmica, incluyendo el uso de técnicas de simulación en tiempo real y métodos de inteligencia artificial para optimizar el diseño.
4. Investigar la durabilidad a largo plazo de los disipadores sísmicos y los requerimientos de mantenimiento, evaluando cómo el envejecimiento y el desgaste afectan su rendimiento y cómo se pueden mejorar las estrategias de mantenimiento preventivo.
5. Examinar cómo los disipadores sísmicos pueden ser aplicados en la restauración y refuerzo de edificaciones históricas, preservando su integridad estructural mientras se mejora su capacidad para resistir sismos.
6. Investigar el impacto ambiental de la producción y el uso de diferentes tipos de disipadores sísmicos, y explorar alternativas más sostenibles que reduzcan la huella ecológica del diseño estructural.
7. Examinar cómo los disipadores sísmicos pueden integrarse con sistemas de energía alternativa, como paneles solares o turbinas eólicas, para mejorar la resiliencia de los edificios en caso de desastres naturales.

8. Realizar estudios comparativos sobre el uso y el rendimiento de disipadores sísmicos en diferentes países y regiones, para identificar mejores prácticas y adaptar soluciones a contextos específicos.
9. Investigar el comportamiento y la eficacia de los disipadores sísmicos en edificaciones de uso especial, como hospitales, escuelas y edificios de importancia crítica, para garantizar su capacidad de funcionamiento durante y después de un sismo.
10. Explorar tecnologías emergentes en el campo de la disipación sísmica, como los disipadores basados en tecnologías de nanotecnología o biotecnología, para descubrir nuevas formas de mejorar la protección estructural.

## 12. Referencias

- Aguiar, R., Rodríguez, M., & Mora, D. (2016). *Análisis sísmico de estructuras con disipadores de energía ADAS o TADAS*. Barcelona: Centro internacional de métodos numéricos en ingeniería.
- Ambrosini, D., Cuitiño, G., & Rebeco, J. (2004). *Eficiencia de amortiguadores de masa sintonizada en estructuras sismorresistentes*. Bariloche: Universidad Tecnológica Nacional.
- ASCE 7-10. (13).
- Beltrán, L. M., & López, G. V. (2022). *Análisis del comportamiento estructural mediante el uso de aisladores sísmicos y disipadores de energía en un edificio de estructura metálica, aplicando la norma NEC-15*. Ambato, Ecuador: Universidad técnica de Ambato.
- Constantinuo, M. y. (1993). *Seismic response of structures with supplemental damping*. New York.
- Dampo Systems S.A. (2020). *Manual de diseño de estructuras equipadas con disipadores histeréticos*. Ciudad de México.
- Disipa. (9 de Septiembre de 2024). *Disipa Grupo Prisma*. Obtenido de <http://www.disipaing.com/aisladores-sismicos/>
- Esquivel , M. A. (2021). *Respuesta sísmica entre disipadores de energía y aisladores sísmicos para el desempeño estructural de una edificación de 9 niveles-ciudad de Puno*. Lima, Perú.: Universidad César Vallejo.
- Genatios, C., & Lafuente, M. (2016). *Introducción al uso de aisladores y disipadores en estructuras*. Caracas: Banco de desarrollo de américa latina.
- Gómez, C. (2022). *Efectos del uso del disipador sólido viscoelástico en las respuestas sísmicas I.E. N°40205 Manuel Benito Linares Arenas, Arequipa*. Lima, Perú: Universidad César Vallejo.
- Martínez, G., Blandón, J. J., & Lara, L. A. (2022). Amortiguadores de masa sintonizada: Una revisión general. *Revista politécnica*, vol 18, núm. 35, 140-168.
- Mayorga Vela, C. A. (2011). *Caracterización mecánica y modelamiento estructural de un disipador pasivo de energía de tipo arriostamiento de pandeo restringido*. Bogotá: Universidad nacional de Colombia.
- Molina, J. A. (20 de 8 de 2018). *Seismicknowledge*. Obtenido de <https://sites.ipleiria.pt/seismicknowledge/aisladores-de-base/>

- Ortega, A., & Velázquez, C. (2021). *Metodología basada en desempeño para edificios de concreto reforzado*. Medellín: Universidad de Antioquia.
- Ospina, A. (2012). *Método basado en desplazamientos para el diseño y evaluación de la vulnerabilidad sísmica de puentes de concreto reforzado*. Medellín: EAFIT.
- Oviedo, J. A., & Duque, M. d. (2006). *SISTEMAS DE CONTROL DE RESPUESTA SÍSMICA EN EDIFICACIONES*. Medellín: EIA.
- Oviedo, R. (2010). *CONTROL DE LA RESPUESTA SÍSMICA DE EDIFICIOS UTILIZANDO DISIPADORES DE ENERGÍA*.
- Priestley, M. C. (2007). *Displacement- Based seismic design of structures*. IUSS PRESS.
- Reyes, J., & Rubiano, R. (2002). *Modelación inelástica de edificios de concreto con disipadores de energía histeréticos*. Bogotá-Colombia: UniAndes.
- Rodríguez, W., Aguilar, J., & Medina, S. (2014). Modelación no lineal de una edificación con y sin disipadores pasivos de energía en la ciudad de Bucaramanga.
- Rueda, J., & Inaudi, J. (2022). Reducción de aceleraciones en edificios esbeltos sometidos a cargas de viento mediante disipadores y amortiguadores de masa sintonizada. *Revista FCEF Y N*, Vol 9, No.2.
- Skinner, R. K. (1975). *Hysteretic Dampers for Earthquake-Resistant Structures*. New Zealand.
- Urrego, H. B. (2007). *Nuevo enfoque para el análisis y diseño de estructuras de hormigón armado*. Medellín: Universidad de Medellín.
- Villareal Castro, G., & Oviedo Sarmiento, R. (2009). *Edificaciones con disipadores de energía*. Lima-Perú.
- Villareal, G., & Díaz, M. (2016). *Edificaciones con disipadores viscosos*. Trujillo-Perú: Editora & Imprenta Gráfica Norte S.R.L.