



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**PRUEBAS EXPERIMENTALES  
DE UN DISIPADOR DE  
FRICCIÓN**

**TESIS**

Que para obtener el título de

**INGENIERO CIVIL**

**P R E S E N T A**

OSCAR VALENCIA FALCÓN

**DIRECTOR DE TESIS**

DR. HÉCTOR GUERRERO BOBADILLA



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2022



Cuando alguien que de verdad necesita algo, lo encuentra, no es la casualidad quien lo procura, sino él mismo. Su propio deseo y su propia necesidad le conducen a ello.

Hermann Hesse

# DEDICATORIA

*Dedico de todo corazón y amor mi tesis a mi madre **Irene Falcón Lezama**, pues sin ti no lo habría logrado. Porque gracias a tu apoyo y amor incondicional a lo largo de mi vida, me guían y me dan fuerzas para seguir adelante. Por eso y por muchas cosas más te doy mi trabajo como un regalo por tu paciencia y amor madre mía, te amo.*

# AGRADECIMIENTOS

A la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México y a los docentes que la conforman porque gracias a ellos pude llevar a cabo la formación de mi educación superior.

Al **Dr. Héctor Guerrero Bobadilla**, por brindarme la oportunidad de poder realizar este proyecto bajo su tutela, su apoyo profesional y académico fueron las bases de esta tesis.

A mi querida hermana, **Angélica Valencia Falcón**, por su cariño, amor y comprensión a lo largo de mi trayectoria.

A mi gran amigo **Gabriel Flores Leonar**, mi gran apoyo moral y académico a lo largo de mi formación como Ingeniero Civil y como persona.

# RESUMEN

En este trabajo se muestran los resultados experimentales obtenidos en pruebas aplicadas a un disipador de energía de fricción realizadas en el Laboratorio de Estructuras y Materiales del Instituto de Ingeniería de la UNAM (II-UNAM). Se aplicó un protocolo de cargas cíclicas controlado por desplazamiento con la ayuda de un actuador dinámico de 1000 KN de capacidad.

Se hace una descripción de las pruebas realizadas; así como el arreglo experimental que se empleó y la instrumentación utilizada durante este proceso.

Se presentan los resultados obtenidos en los ensayos a través de diversas gráficas que muestran el comportamiento del disipador de fricción. Se incluyen curvas de carga- desplazamiento (curvas de histéresis) y curvas de ductilidad acumulada. También, se realiza una comparación con un modelo numérico simple. Con la información obtenida se presentan algunas conclusiones y recomendaciones.

# ABSTRACT

In this, the experimental results obtained from tests applied to a friction energy dissipator carried are presented. They were out in the Structures and Materials Laboratory of the Engineering Institute at UNAM (II-UNAM). A displacement controlled cyclic load protocol was applied with the help of a dynamic actuator of 1000KN capacity.

A description of the test, setup is made; as well as the experimental arrangement that was used and the instrumentation controlled during this process. The results obtained in the tests are presented through various figures that show the behavior of the friction dissipator. Load-displacement curves (known as hysteresis curves) and cumulative ductility curves are provided. Also, a comparison is made with a simple numerical model. With the obtained information, some conclusions and recommendations are offered.

# CONTENIDO

<b>DEDICATORIA</b> .....	II
<b>AGRADECIMIENTOS</b> .....	II
<b>RESUMEN</b> .....	III
<b>ABSTRACT</b> .....	IV
<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	1
1.1 SISMOLOGÍA EN MÉXICO .....	2
1.2 REGIONES SÍSMICAS EN MÉXICO.....	4
1.3 SISMICIDAD EN LA CIUDAD DE MÉXICO.....	5
1.4 REGISTROS SÍSMICOS EN MÉXICO .....	6
<b>2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA</b> .....	8
2.1 JUSTIFICACIÓN.....	9
2.2 ALCANCES.....	10
2.3 OBJETIVOS .....	10
<b>3. ANTECEDENTES</b> .....	11
3.1 SISTEMAS DE PROTECCIÓN SÍSMICA .....	12
3.1.1 SISTEMAS ACTIVOS .....	13
3.1.2 SISTEMAS SEMI-ACTIVOS .....	14
3.1.3 SISTEMAS PASIVOS .....	15
3.2 DISIPACIÓN DE ENERGÍA.....	16
3.3 DISIPADORES ACTIVADOS POR DESPLAZAMIENTOS .....	17
3.3.1 DISIPADORES DE FRICCIÓN.....	18
3.3.2 DISIPADORES METÁLICOS .....	21
3.3.3 DISIPADORES DE EXTRUSIÓN DE MATERIALES.....	23
3.3.4 DISIPADORES AUTO-CENTRANTES.....	24
3.4 DISIPADORES ACTIVADOS POR VELOCIDAD.....	24

3.4.1	DISPOSITIVOS CON MATERIALES FLUIDO VISCOSOS .....	25
3.5	DISIPADORES ACTIVADOS POR DESPLAZAMIENTO Y VELOCIDAD .....	27
3.5.1	DISPOSITIVOS VISCO-ELÁSTICOS SÓLIDOS .....	28
3.6	DISPOSITIVOS ACTIVADOS POR ACELERACIÓN .....	29
<b>4.</b>	<b>CONFIGURACIÓN DEL EXPERIMENTO .....</b>	<b>30</b>
4.1	DESCRIPCIÓN DEL ESPÉCIMEN .....	31
4.2	EQUIPO UTILIZADO .....	32
4.3	ARREGLO EXPERIMENTAL .....	34
4.4	PROTOCOLOS DE CARGA .....	38
<b>5.</b>	<b>RESULTADOS EXPERIMENTALES .....</b>	<b>41</b>
5.1	CURVAS DE HISTÉRESIS .....	42
5.2	CURVAS DE ENERGÍA DISIPADA Y DUCTILIDAD ACUMULADA .....	45
<b>6.</b>	<b>DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS .....</b>	<b>50</b>
<b>7.</b>	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>54</b>
7.1	Conclusiones .....	55
7.2	Recomendaciones .....	56
<b>8.</b>	<b>REFERENCIAS .....</b>	<b>57</b>



# **1.INTRODUCCIÓN**

## 1.1 SISMOLOGÍA EN MÉXICO

México es uno de los países con mayor índice de sismicidad en el mundo. Dada su ubicación geográfica, que lo localiza en el Cinturón Circunpacífico o Cinturón de Fuego (SGM, 2019), es una de las zonas donde se concentra la mayor actividad sísmica del planeta.

El Cinturón de Fuego comprende casi en su totalidad al océano Pacífico, corriendo desde las costas de América del sur, pasando por México y California, llegando a Alaska, y así continua por las islas Aleutianas, dirigiéndose hacia las costas de Japón como se observa en la Figura1.



Figura 1. Cinturón de Fuego (Adaptación de Meteorología en Red, 2019)

Esta actividad sísmica presente en el país es causada por la interacción de cinco placas tectónicas: la Norteamericana, la de Cocos, la del Pacífico, la de Rivera y la del Caribe.

En la Figura 2 se muestra la influencia de estas placas sobre el territorio mexicano. Se puede notar que la mayor parte del territorio nacional se encuentra sobre la placa Norteamericana, separándola así de la placa del Pacífico. Pero de igual forma, existe una interrelación con placas de menor tamaño, tales como, la de Rivera, Cocos y Caribe.



*Figura 2. Placas tectónicas en México (Adaptación de Servicio Sismológico Nacional, 2019)*

Como se puede notar, los Estados más afectados por esta actividad sísmica son los localizados en las costas, tales como: Chiapas, Oaxaca, Guerrero, Michoacán, Colima, Jalisco, Nayarit, Sinaloa, Sonora, Baja California, Baja California Sur, esto es debido con la proximidad que tienen con los bordes de las placas tectónicas.

La Ciudad de México, aunque no se encuentra cerca de esta zona con alta actividad sísmica, no queda exenta de sus efectos. Esto de debido al tipo de terreno en la que fue fundada, la cual la vuelve vulnerable ante estos fenómenos geológicos. La característica principal del suelo que es de tipo arcilloso, dado que antiguamente era un gran lago.

## 1.2 REGIONES SÍSMICAS EN MÉXICO

Como medida de prevención y conociendo el alto riesgo sísmico a la cual está expuesto el país, se han realizado estudios y observaciones, de los cuales se ha podido dividir el territorio en cuatro zonas sísmicas. A continuación y con ayuda de la Figura 3, se definen cada una de esas zonas.



*Figura 3. Regionalización sísmica de la República Mexicana (Adaptación del MOC-CFE,2015)*

- **Zona A.** Con base en estudios, observaciones y registros históricos, esta zona es la que ha reportado un menor número de incidencias de eventos sísmicos. Apenas de un 10% de la aceleración de la gravedad.
- **Zona B y C.** Se le consideran zonas intermedias que han sido afectadas por movimientos de alrededor de 70% de la aceleración de la gravedad.
- **Zona D.** Es de los lugares con mayor actividad sísmica del país, con base a observaciones y registros históricos que las catalogan con incidencias mayores a un 70% de la aceleración de la gravedad.

## 1.3 SISMICIDAD EN LA CIUDAD DE MÉXICO

Conociendo el alto riesgo sísmico que experimenta la República Mexicana, es de suma importancia conocer el estado actual de su capital. La Ciudad de México se encuentra en la catalogada Zona B. Aunque sea un lugar con una incidencia sísmica intermedia, eso no la protege de recibir un alto impacto ante eventos sísmicos. Un factor importante es su tipo de suelo, el cual propicia una magnificación de riesgo ante estos eventos. Es por ello que se tiene una zonificación del valle de México; (Figura 4) que de acuerdo al tipo de suelo se pueden catalogar tres tipos de zonas.

- **Zona I.** Firme o de lomas. Con un tipo de suelo rocoso volcánico, con altas resistencias, que abarca las partes más altas del Valle del México.
- **Zona II.** Transición. Con características de suelo intermedias entre la zona I y la zona III.
- **Zona III.** Lago. Este tipo de suelo es el más desfavorable, caracterizado por consistir en depósitos lacustres, muy blandos con niveles altos de compresibilidad y con contenidos grandes de agua, que amplifican las ondas sísmicas. Esta zona está ubicada en las regiones donde antiguamente estaban el Lago de Texcoco y el Lago de Xochimilco.

La Figura 4 muestra los tres tipos de zona sísmicas en el Valle de México, así como su distribución.

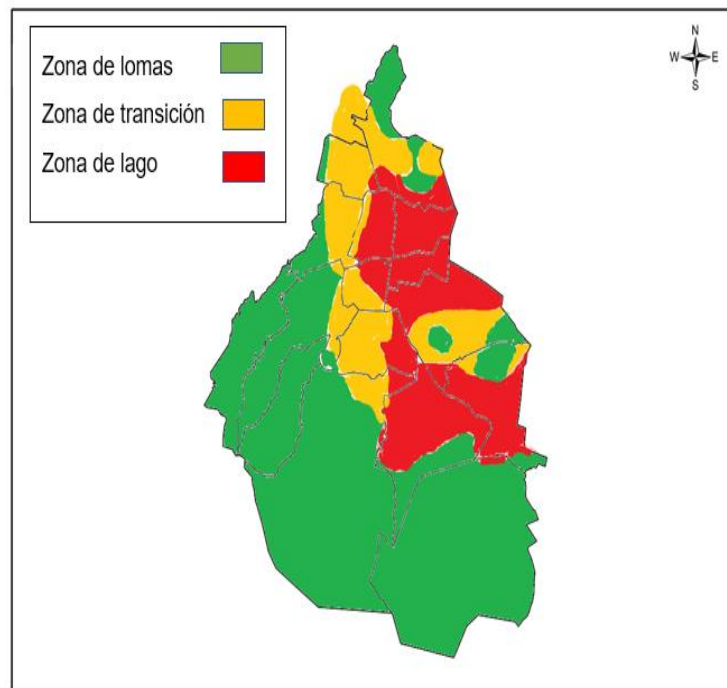


Figura 4. Zonificación del Valle de México (Adaptación de SGM, 2019)

## 1.4 REGISTROS SÍSMICOS EN MÉXICO

Desde principios del siglo XX se comenzaron a hacer estudios sobre la condición sísmica del país para poder comprender mejor la naturaleza de estos eventos y así poder estar preparados para la incidencia de estos fenómenos telúricos.

En el año de 1910 y con motivo de las celebraciones del centenario de la Independencia de México se inauguró oficialmente la red sismológica mexicana; la cual tiene como objeto principal la observación y registro continuo de la actividad sísmica del país. Estos registros se almacenan en estaciones sismológicas en la Ciudad de México y a lo largo de todo el país.

A continuación, se hace un breve listado de los sismos más severos que han afectado al territorio nacional:

- **Sismo del 2017.** Fue uno de los más recientes; ocurrió el día martes 19 de septiembre de dicho año a las 13:14 horas. Tuvo una magnitud de 7.1 grados. Su epicentro se localizó 12 km al sureste de Axochiapan, Morelos, según el informe especial del Servicio Sismológico Nacional de México (2017).
- **El sismo de 1985.** Ocurrió el 19 de septiembre de 1985 a las 07:17 horas con una magnitud de 8.1 grados. Su epicentro fue localizado en las costas de Michoacán y Guerrero, causado por la rotura de las placas de Cocos y la Norteamericana.
- **El sismo más grande en México.** Se registró el 28 de marzo de 1787 a las 11:00 horas, con una magnitud de 8.6 grados. Tuvo su epicentro en las costas de Oaxaca. Este sismo también se le conoce como 'El gran tsunami mexicano', debido a las inundaciones que provocó alrededor de 6 km tierra adentro de las cosas de Oaxaca.
- **El sismo del Ángel.** Ocurrió el 27 de julio de 1957 a las 02:44 horas con una magnitud de 7.8 grados; con epicentro en el suroeste de Acapulco. Recibe su nombre debido a que este sismo dañó el monumento de la Independencia.

## **2.PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**



## **2.1 JUSTIFICACIÓN**

México es uno de los países con mayor actividad sísmica del mundo. Esto trae consigo un gran reto para la Ingeniería Vivil, pues es de suma importancia el desarrollo e implementación de tecnologías en el ámbito de la protección sísmica, para poder asegurar la seguridad de la infraestructura del país, así como el bienestar de sus habitantes.

El pasado 19 de septiembre de 2017 la Ciudad de México sufrió uno sus peores eventos telúricos. Un sismo de 7.1 grados de magnitud a las 13:14 horas, con epicentro en la zona que comprende los límites entre Puebla y Morelos, dejó a su paso 369 víctimas, miles de personas damnificadas, y numerosos daños materiales, en edificios, casas y diversos inmuebles del área metropolitana.

Después de los daños observados, es evidente, que los habitantes de la Ciudad de México, y la población en general de todo el país, demandan estructuras con mejor respuesta ante movimientos sísmicos. Demandan que no sólo sea evitar el colapso de estas mismas, sino la protección e implementación de tecnologías que brinden mayor seguridad y confiabilidad a los usuarios.

Es de suma importancia que en México se desarrollen investigaciones en el ámbito de la protección sísmica, que incluya el uso de disipadores y aisladores, para promover su uso e implementación en la industria de la construcción, así como para mejorar el rendimiento y respuesta de las obras civiles ante eventos telurios a los que se encuentran expuestas el territorio nacional. Las investigaciones realizadas en laboratorios de estructuras representan una gran oportunidad para conocer los beneficios que los sistemas de protección sísmica.

Los experimentos son un factor de suma importancia que se deben realizar en estas tecnologías, debido a que los dispositivos son sometidos a pruebas y análisis, que ayudan a conocer de manera mejor su funcionamiento, desempeño, capacidad y confiabilidad que nos puedan brindar al ser implementados. De igual manera, se pueden comprender sus deficiencias y desventajas, a partir de las cuales se puede mejorar su diseño y desempeño.

## **2.2 ALCANCES**

En esta tesis se muestran los resultados obtenidos de pruebas experimentales realizadas en un dispositivo de disipación de energía de tipo fricción.

Los resultados se muestran por medio de gráficas, fotos e imágenes, que ejemplifican el desarrollo de las pruebas de principio a fin, el arreglo experimental, la instrumentación utilizada, los problemas y soluciones que se presentaron en el transcurso del ensayo.

Se ofrecen conclusiones sobre los resultados obtenidos, tales como la eficiencia y desempeño que alcanzó el dispositivo. También se hacen algunas recomendaciones para ayudar a mejorar el diseño de este dispositivo.

## **2.3 OBJETIVOS**

El objetivo general de esta tesis es el mostrar los resultados obtenidos en las pruebas experimentales realizadas a un dispositivo de disipación de energía de tipo fricción.

Los objetivos particulares son:

- Hacer una descripción del proceso experimental desarrollado, destacando las características del arreglo experimental y la instrumentación utilizada.
- Hacer un registro de los resultados obtenidos, así como su interpretación y descripción.
- Desarrollar conclusiones a partir de los resultados obtenidos, donde se describa el comportamiento y eficiencia que tuvo el dispositivo.
- Hacer la comparación de los resultados obtenidos en términos de disipación de energía y la ductilidad máxima obtenida con un modelo numérico para analizar su resistencia y eficiencia ante condiciones similares a las de un sismo.

## **3.ANTECEDENTES**

### **3.1 SISTEMAS DE PROTECCIÓN SÍSMICA**

Para la Ingeniería Civil, y especialmente en la ingeniería sísmica, es de suma importancia el desarrollo de tecnologías para la protección de estructuras. De esta forma, se hacen estudios con los cuales se intentan reducir los daños ocasionados por fenómenos de esta índole. El objetivo fundamental es el proteger y salvaguardar la vida e integridad de las personas, así como proteger la inversión.

Los sistemas de protección sísmica son métodos y técnicas alternativas muy efectivas que ayudan a proteger las estructuras. Esto, con la finalidad de obtener una mejor respuesta y un buen comportamiento ante eventos sísmicos severos o de baja intensidad, que puedan afectar a los elementos estructurales y no estructurales (CDT ,2012).

Estos sistemas cuentan con una gran variedad de diseños que pueden ir desde elementos muy simples hasta avanzados sistemas automatizados de respuesta inmediata. De esta forma, el sistema de protección sísmica se puede dividir en cuatro grandes categorías: sistemas activos, pasivos, semi-activos e híbridos (Pittí, 2013).

El objetivo de este capítulo es descubrir de manera simple y clara los sistemas de protección sísmica de tipo “pasivos”; ya que dichos mecanismos en la actualidad son los que presentan mayores ventajas, tanto en su diseño, su instalación y sobre todo su costo de implementación. Además, estos son útiles para estructuras nuevas y existentes.

### **3.1.1 SISTEMAS ACTIVOS**

Los sistemas de protección sísmica activos son los que cuentan con un número mayor de dispositivos electrónicos de alta tecnología, incluyendo a grandes rasgos: sensores de movimiento, sistemas de control y procesamiento de datos, actuadores dinámicos, etcétera (Pittí, 2013). En estos sistemas existe un monitoreo continuo de los movimientos telúricos que acontecen en tiempo real y que puedan afectar a la integridad de la estructura, de esta manera los mecanismos de protección serán activados para poder contrarrestar las fuerzas sísmicas detectados.

Las estructuras con estos sistemas cuentan con sensores ubicados en puntos estratégicos, que al ser activados por los movimientos de un sismo envían una señal a un sistema de procesamiento de datos (SPD). El SPD cuenta con un algoritmo de respuesta, que procesa la información del sismo. Con esa información y a través de actuadores dinámicos contrarrestan las fuerzas sísmicas (CDT, 2012).

Las ventajas de estos sistemas es que existe un monitoreo y respuesta en tiempo real, lo cual permite ir modificando la respuesta de los dispositivos, para tener una mejor respuesta en la estructura. De esta manera se reducen los daños en los elementos estructurales (Genatios, et al. 2016).

Por otra parte, los sistemas activos cuentan con varias desventajas. Una de las principales es su costo económico alto, tanto en su instalación como en su operación. Otro punto importante es que todo el sistema de protección debe de contar con una fuente de energía constante, permanente e independiente para poder operar.

La Figura 5 muestra un diagrama de flujo en la cual se puede observar la forma de operación de los sistemas activos, donde el sismo llega a la estructura y genera una respuesta inmediata sobre la estructura para contrarrestar las fuerzas dinámicas del sismo.

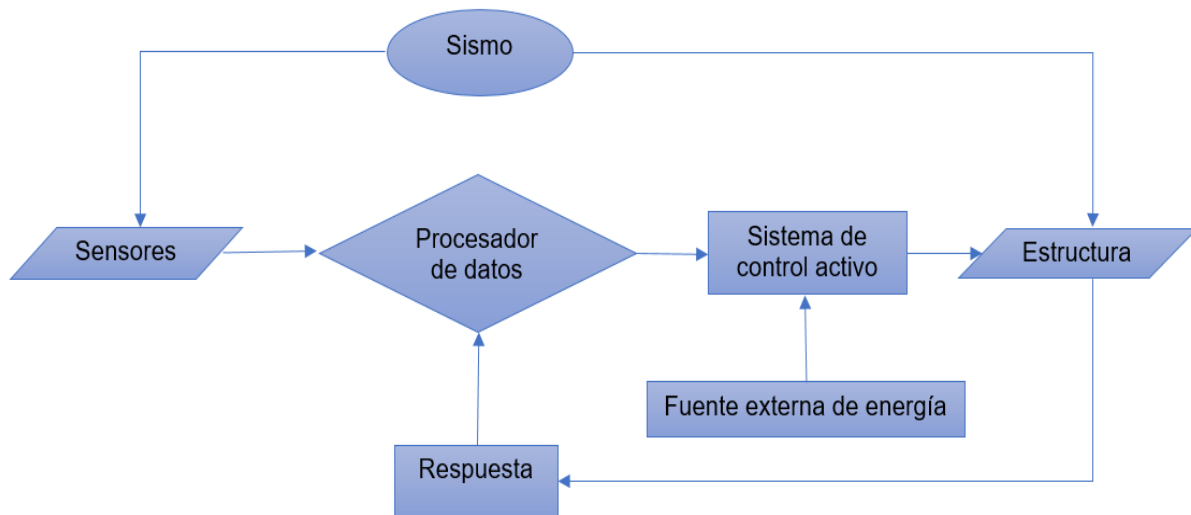


Figura 5. Diagrama de flujo de la operación de un sistema activo

### 3.1.2 SISTEMAS SEMI-ACTIVOS

Los sistemas semi-activos son similares a los sistemas activos, debido a que ambos cuentan con dispositivos de monitoreo en tiempo real ante movimientos. A diferencia de los primeros, este sistema cuenta con disipadores de energía, los cuales se conectan al sistema de monitoreo principal (Pittí, 2013).

Los sensores al detectar un movimiento sísmico mandan una señal al sistema principal de procesamiento de datos. A diferencia de los sistemas activos, que lanzan una respuesta directa a los elementos estructurales del edificio para contrarrestar la energía del sismo, en este sistema la señal se mandada a los dispositivos de disipación de energía, modificando así las propiedades mecánicas de respuesta de estos elementos (CDT, 2012). Algunos ejemplos de estos dispositivos son: disipadores con fluidos electro o magnetoreológicos amortiguadores, dispositivos de fricción con fricción controlable, entre otros.

### 3.1.3 SISTEMAS PASIVOS

Los sistemas pasivos, son dispositivos que ayudan a resistir y disipar las fuerzas sísmicas. Este tipo de sistemas se divide en dos categorías: la primera son sistemas de disipación de energía y el segundo corresponde a sistemas de aislación sísmica de base. Su principio es muy sencillo: si un sismo es energía liberada por el movimiento de las placas tectónicas, que viaja a través del suelo, esta energía es transmitida a la estructura. Es aquí donde los sistemas pasivos (dispositivos de disipación de energía y sistemas de aislación sísmica) ayudan a absorber y liberar esta energía de diferentes maneras (Genatios, et al. 2016).

Los sistemas pasivos logran disminuir en gran medida la respuesta dinámica de la estructura, mediante dispositivos mecánicos, que disipan la energía en forma de calor (CDT, 2013).

Estos sistemas cuentan con una gran variedad de ventajas, los cuales los hacen uno de los más utilizados actualmente. Entre sus beneficios caben resaltar las siguientes: son dispositivos que no requieren una fuente externa de energía para ser activados, producen una respuesta al movimiento mismo de la estructura (que en caso de un sismo son las primeras en trabajar evitando así que los elementos estructurales principales sufran daños), sus costos de fabricación e instalación son muy bajos (dado que la mayoría de estos dispositivos pueden ser elaborados con materiales comunes).

El diagrama de la Figura 6 muestra la interacción y respuesta ante un sismo en una estructura.

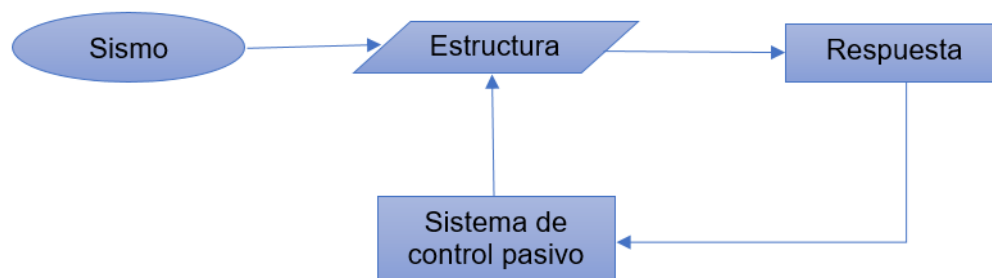


Figura 6. Diagrama de flujo de la operación de un sistema pasivo.

## 3.2 DISIPACIÓN DE ENERGÍA

La disipación de energía, en el contexto de la protección sísmica, tiene un principio básico, el cual es absorber la energía del sismo y dispersarla de alguna manera. Esta disipación de energía se puede llevar a cabo gracias a varios dispositivos, que tienen como objetivo reducir los esfuerzos y deformaciones sobre las estructuras que los contengan (Gómez, 2018). Estos están diseñados para proporcionar un amortiguamiento a la estructura que contrarrestan las fuerzas producidas por un sismo, inclusive movimientos provocados por el viento.

Los disipadores sísmicos tienen una función muy diferente a los aisladores de base. Éstos se diseñan para disipar la energía entregada por un sismo a diferencia de los aisladores, los cuales tiene como objetivo principal evitar que la energía se transmita del suelo a la estructura (Genatios et al., 2016). Uno de los beneficios principales del uso de estos disipadores de energía sísmica es el incremento en el amortiguamiento de la estructura.

Cuando se implementa este sistema de protección pasiva, los dispositivos se colocan a lo largo de toda la edificación en puntos estratégicos (Genatios et al., 2016). Al momento de ser incluidos en el diseño de nuevas estructuras o en la implementación de reforzamiento de estructuras ya existentes, los dispositivos aumentan la resistencia estructural ante eventos sísmicos.

Algunos sistemas generan un cambio en la rigidez de las estructuras. Concentran en ellos la mayor cantidad de energía que puedan absorber y, dependiendo del material con el cual estén elaborados y su diseño disiparan energía en mayor o menor medida. Por lo regular se les colocan como contraventeos a lo largo de las estructuras. Estos sistemas de disipación de energía se clasifican en cuatro grupos: histeréticos, de fluidos, viscoelásticos y de fricción (Oviedo et al., 2006).



De acuerdo a la forma en que se activan los disipadores se les pueden clasificar en cuatro categorías (CDT, 2012):

- ✓ Disipadores activados por desplazamiento
- ✓ Disipadores activados por velocidades
- ✓ Disipadores activados por la combinación de desplazamientos y velocidades
- ✓ Disipadores activados por aceleraciones

### **3.3 DISIPADORES ACTIVADOS POR DESPLAZAMIENTOS**

En esta categoría los dispositivos se activan en los puntos extremos de conexión que tienen con la estructura debido a los desplazamientos relativos que esta misma les transmite. Su diseño está hecho para que disipe energía a través de las deformaciones plásticas de los materiales con los cuales están elaborados o mediante la fricción entre dichos componentes (Christopoulos et al., 2006).

En esta categoría podemos encontrar los siguientes tipos de disipadores:

- Disipadores de fricción
- Disipadores metálicos
- Disipadores autocentrantes

En la Figura 7 se muestran graficas del comportamiento histerético de los tres tipos de disipador (metálico, friccional, autocentrante). Se aprecian sus ciclos fuerza-desplazamiento, donde el área que encierran las curvas corresponden a la cantidad de energía que disipan estos dispositivos (CDT, 2012).

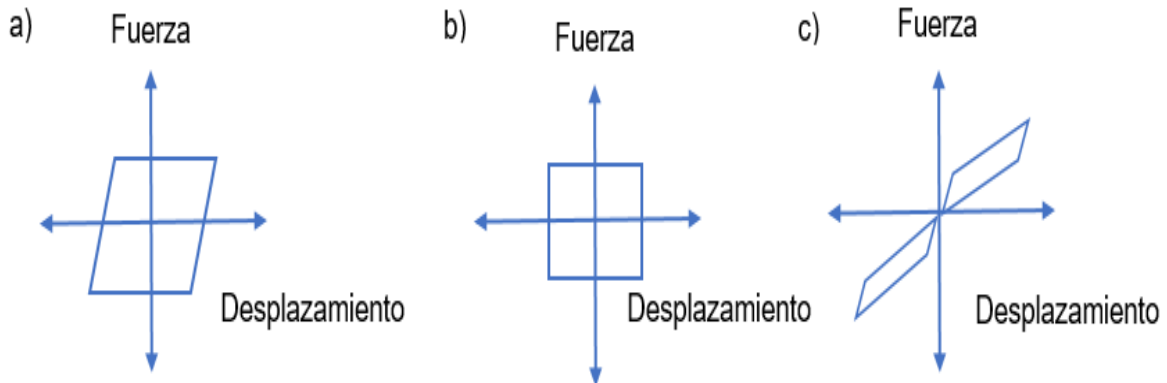


Figura 7. Ciclos carga-desplazamiento disipadores activados por movimiento: a) Metálico, b) Friccional y c) Autocentrante (Imagen adaptada de CDT,2012).

### 3.3.1 DISIPADORES DE FRICCIÓN

Estos dispositivos trabajan con el principio de amortiguamiento de Coulomb o freno de fricción convirtiendo la energía cinética en calor por fricción (Quaketek, 2019). Esto ocurre dado que su diseño principal es poner dos o más superficies en contacto. Al existir una fuerza que provoque el deslizamiento de estas superficies en contacto se genera fricción entre ellas.

Para poder activar estos dispositivos, es necesario que las fuerzas actuantes sobre ellos alcancen un nivel de esfuerzo superior al de fricción. Una clara desventaja de este tipo de dispositivo es que, al no alcanzarse ese esfuerzo, se mantendrán inactivos.

Ejemplos de disipadores por fricción.

**Conexión SBC (Slotted Bolted Connection).** Traducido al español; “Conexión atornillada ranurada”. Dispositivo con un diseño relativamente sencillo como se muestra en la Figura 8. Este consiste en la unión de dos placas paralelas de acero interconectadas entre sí a través de láminas de bronce con pernos de alta resistencia. El deslizamiento entre las placas se produce a través de orificios ovalados (Grigorian et al., 1993).

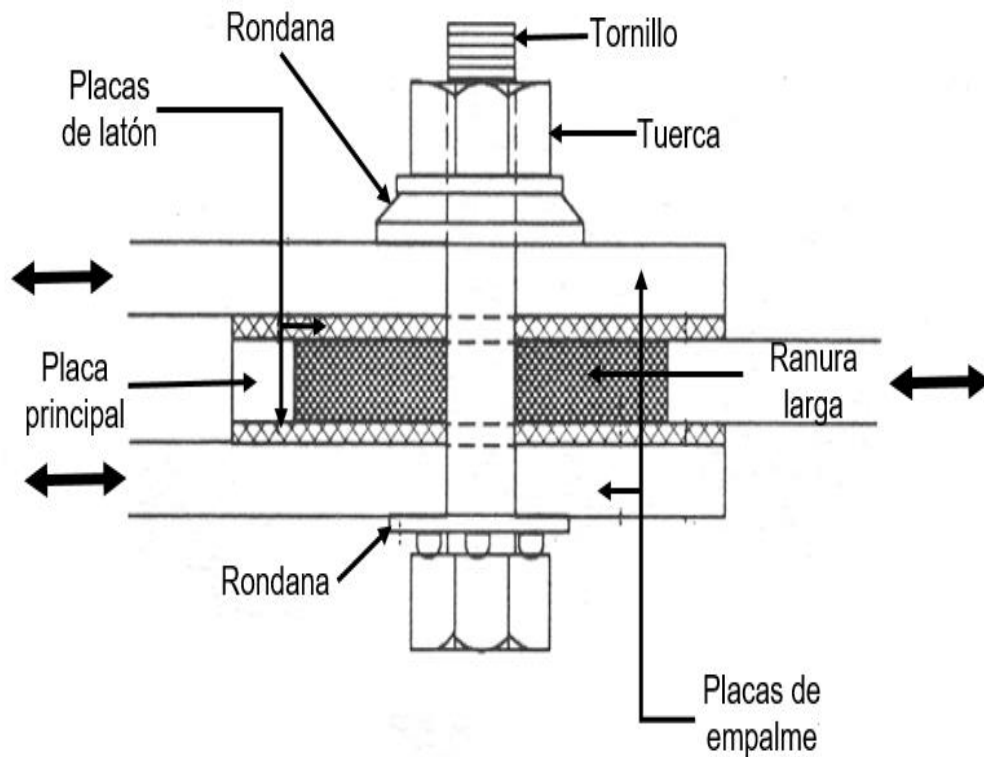


Figura 8. Conexión SBC (Imagen adaptada de Grigorian et al., 1993).

**SISTEMA PALL.** Consiste en aprovechar el movimiento y la deformación de los entrepisos. Su arreglo tiene una forma de X sirviendo de contraventeo para la estructura. En medio se encuentra un mecanismo de entre placas, que proporcionan disipación de energía por fricción (CDT, 2012) como se especifica en la Figura 9.

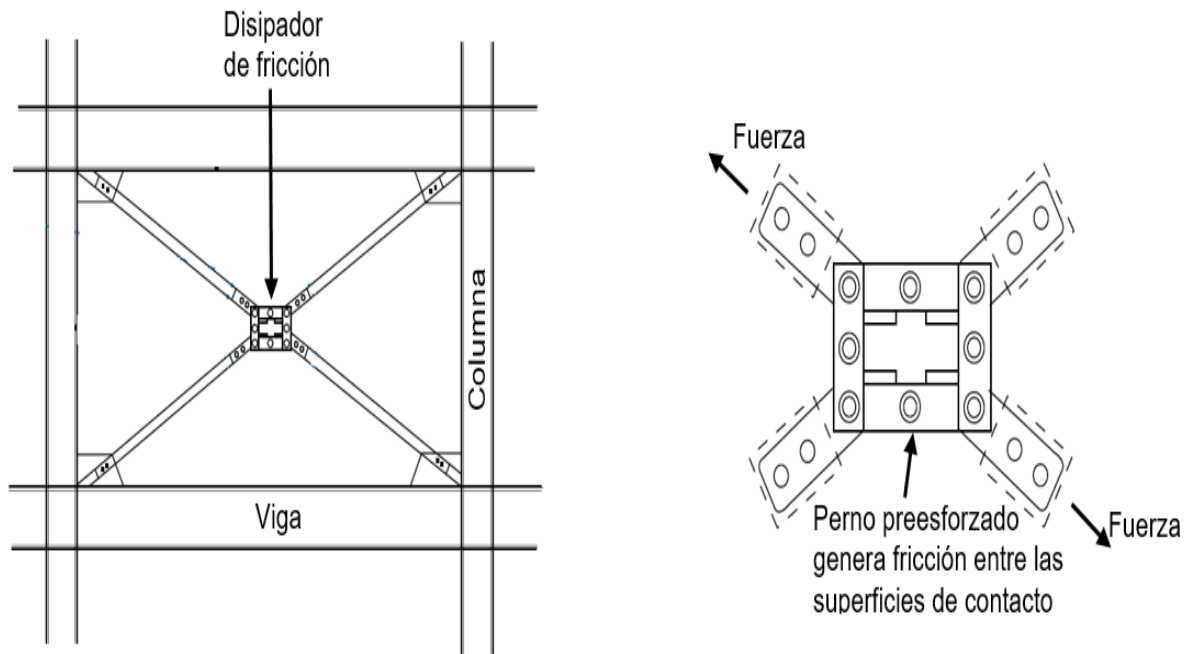


Figura 9. Esquema disipador de energía tipo Pall (Imagen adaptada de CDT,2012)

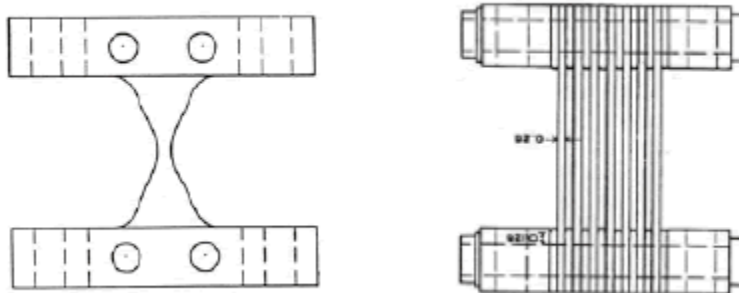
### 3.3.2 DISIPADORES METÁLICOS

Los dispositivos de este tipo se caracterizan por tener un comportamiento histerético dúctil. Esto quiere decir que disipan la energía a través de ellos por la plastificación de los materiales que los componen. Esta plastificación ocurre por los tipos de esfuerzos a los cuales son sometidos, pueden ser flexión, fuerzas cortantes o la combinación de ambas. Los disipadores metálicos poseen características que los hacen muy confiables, tales como: resistencia a la temperatura y resistencia a diversas condiciones ambientales (Oviedo y Duque, 2009).

Su diseño consiste en una serie de placas de metal con determinadas formas geométricas que les permiten deformarse plásticamente en su intervalo dúctil; disipando así la energía y brindando rigidez o amortiguamiento a las estructuras.

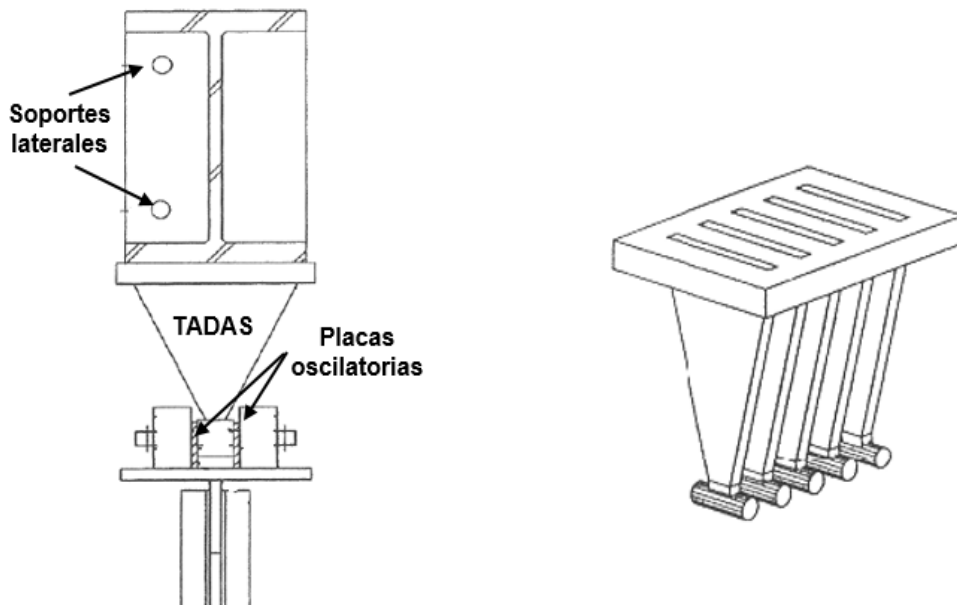
A continuación, se describen algunos tipos de disipadores metálicos:

- **Disipador ADAS (del inglés Added Damping And Stiffness).** Traducido al español; “Amortiguación y rigidez añadida”. Consiste en un grupo de placas de acero colocadas en forma paralela, con una geometría y espesor específica en forma de X. Cada placa se coloca a manera que se restrinja el giro en los extremos como se muestra en la Figura 10.



*Figura 10. Disipador metálico tipo ADAS (Imagen adaptada de Oviedo y Duque, 2009).*

- **Disipador TADAS (del inglés Triangular Added Damping And Stiffness).** Traducido al español; “Amortiguación y rigidez triangulares añadidas”. Consiste en una serie de placas con geometría triangular. En uno de sus extremos se encuentra empotrado y en el otro cuenta con una articulación, como se puede apreciar en la Figura 11 (Oviedo, 2009).



*Figura 11. Disipador TADAS (Imagen adaptada de Oviedo y Duque, 2009)*

### 3.3.3 DISIPADORES DE EXTRUSIÓN DE MATERIALES

Tienen como principio la extrusión de materiales, esto quiere decir, que los componentes con los que están diseñados se comprimen. Su característica principal es el resistir un gran número de ciclos de carga, aportan amortiguamiento y rigidez simultáneamente a las estructuras. Por otra parte, una de sus desventajas es que en caso de que lleguen a su punto de falla deben ser remplazados totalmente (Arrollo et al., 2009).

La Figura 12 muestra un disipador de energía de tipo BRB (del inglés Buckling Restrained Braces) propuestos por Guerrero (2016).



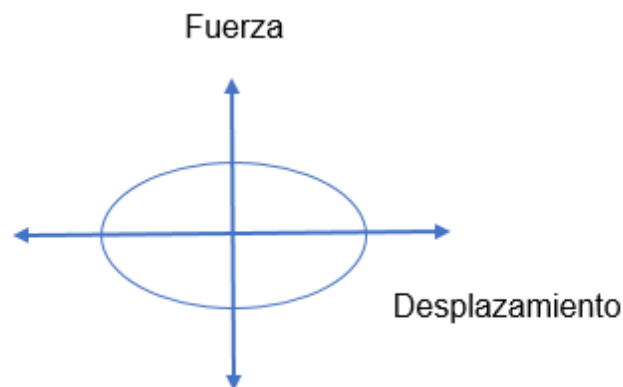
*Figura 12. Disipador de energía tipo BRB, propuesto Guerrero (2016).*

### 3.3.4 DISIPADORES AUTO-CENTRANTES

Son dispositivos diseñados para actuar bajo carga cíclica reversible. Comúnmente se colocan en las conexiones de elementos pretensionados. Los materiales utilizados en estos dispositivos son los que se caracterizan por tener propiedades de memoria de forma, SMA (del inglés Shape Memory Alloys). Esas propiedades se aprovechan para poder disipar energía (CDT, 2012).

### 3.4 DISIPADORES ACTIVADOS POR VELOCIDAD

Este tipo de dispositivos funcionan como amortiguadores en la estructura, sin aportar o afectar la rigidez de esta misma. Su forma de activación depende de las velocidades relativas que se presentan en los puntos extremos de sus conexiones. Las fuerzas generadas por los desplazamientos de un sismo en estos dispositivos están desfasadas del sismo mismo, evitando así que la estructura entre en frecuencia con las ondas sísmicas. Su diseño está pensado para proteger a las estructuras de manera que reducen su vibración longitudinal. Los dispositivos que se incluyen en esta categoría son por lo regular amortiguadores con materiales viscosos y visco-elásticos. La Figura 13 muestra el tipo de curva fuerza-desplazamiento de un disipador activado por velocidad.



*Figura 13. Ciclo fuerza-desplazamiento de un disipador activado por velocidad.*



### 3.4.1 DISPOSITIVOS CON MATERIALES FLUIDO VISCOSOS

Estos dispositivos tienen un diseño y funcionamiento muy similar a los amortiguadores de los automóviles. La diferencia principal es que estos están diseñados para soportar grandes cargas, niveles que se alcanzan en las estructuras por movimientos sísmico o inclusive por el empuje del viento. Estos diseños disipan la energía al forzar un fluido altamente viscoso a transitar a través de una serie de orificios con diámetros, longitudes e inclinaciones específicas que controlan el paso de este mismo, disipando así la energía en forma de calor (Genatios, et al, 2016). Un ejemplo de estos sistemas se muestra en la Figura 14.

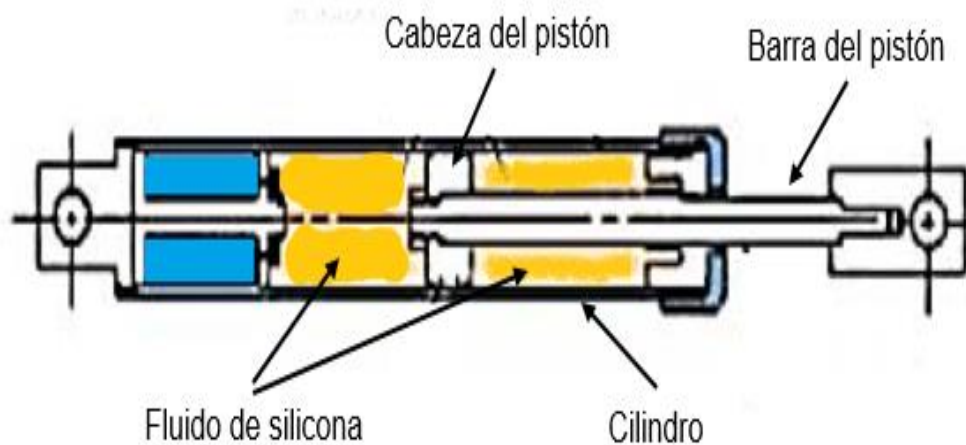
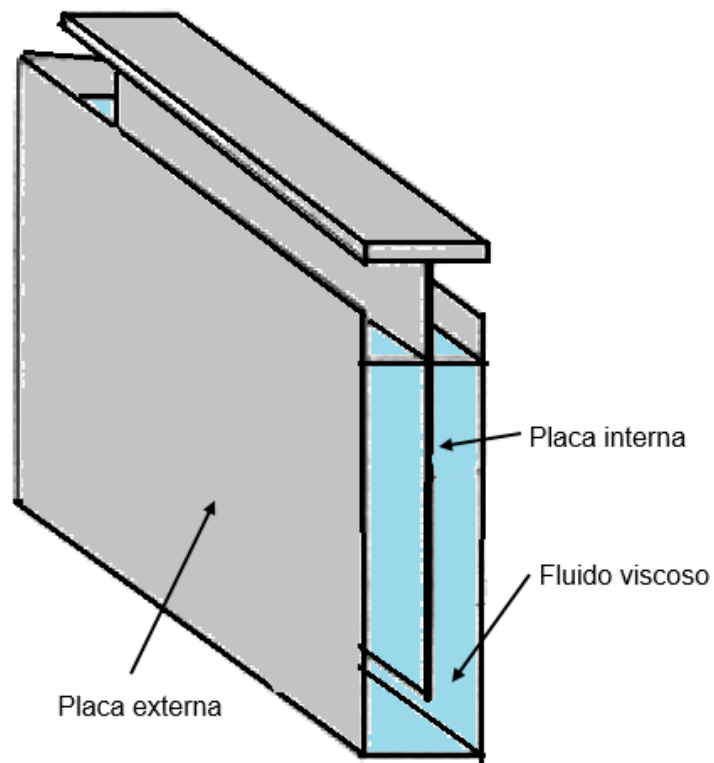


Figura 14. Disipador basado en fluido visco elástico (Imagen adaptada de Oviedo y Duque., 2006)

**Muros Viscosos.** Su diseño consta de una placa de acero sumergida en un fluido de alta viscosidad, el cual se encuentra depositado al interior de un molde. El desempeño de estos dispositivos recae en la amplitud y frecuencia de la carga, la temperatura y el número de ciclos a la cual son sometidos (CDT, 2012). Un ejemplo de estos se muestra en la Figura 15.

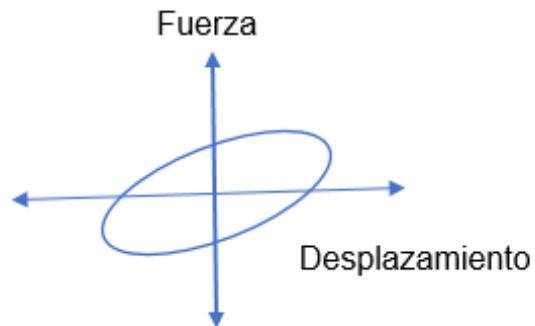


*Figura 15. Disipador muro viscoso (Imagen adaptada de CDT,2012)*

### 3.5 DISIPADORES ACTIVADOS POR DESPLAZAMIENTO Y VELOCIDAD

Estos dispositivos brindan amortiguamiento y rigidez a la estructura. Se activan por medio de la combinación de desplazamientos y velocidades que actúan relativamente en los extremos de sus conexiones, los cuales pueden ser provocados por las fuerzas de un sismo o por el empuje del viento (CDT, 2012).

La Figura 16 muestra el tipo de curva fuerza-desplazamiento de un disipador activado por desplazamiento y velocidad.



*Figura 16. Ciclo fuerza-desplazamiento de un disipador activado por desplazamiento y velocidad.*

### 3.5.1 DISPOSITIVOS VISCO-ELÁSTICOS SÓLIDOS

Estos dispositivos están hechos para que disipen energía por medio de la deformación de materiales visco-elásticos. Su arreglo consiste en un material viscoso colocado entre dos placas. La colocación de estos dispositivos por lo general es en forma de contraventeos que se conectan a los entrepisos de la estructura. Suelen tener un comportamiento variable dependiendo de varios factores tales como la temperatura, el número de ciclos de carga a los cuales sean sometidos, la amplitud y frecuencia del movimiento (Genatios et al., 2016). Un ejemplo de estos dispositivos se muestra en la Figura 17.

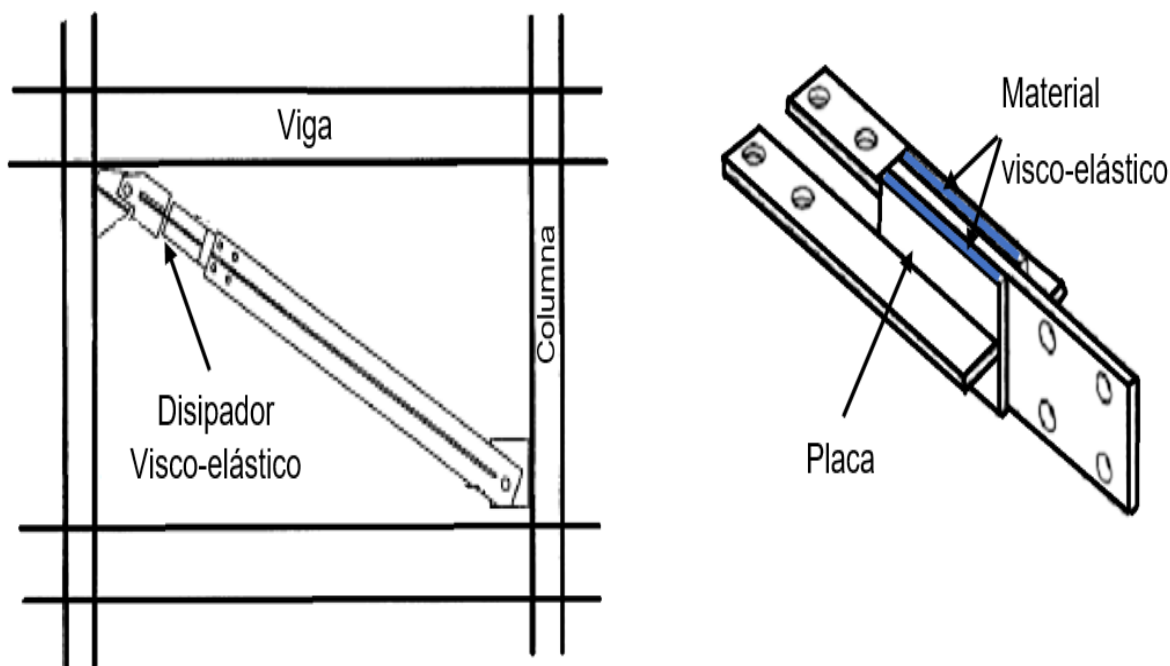


Figura 17. Disipador sólido viscoelástico (Imagen adaptada de Aiken et al., 1993)

### 3.6 DISPOSITIVOS ACTIVADOS POR ACELERACIÓN

A grandes rasgos, consisten en una masa colocada en la parte superior de las estructuras, actuando en respuesta contraria a la energía del sismo y reduciendo su respuesta dinámica, a modo de ejemplo simple se muestra la Figura 18. Un principal representante de estos son los amortiguadores de masa sintonizada (TMD, por sus siglas en inglés de Tuned- Mass-Dampers). El sistema TMD consta de una masa y diversos mecanismos de disipación de energía. Su principio consiste en los acoplamientos de las frecuencias naturales de vibración de la estructura y del oscilador resonante disminuyendo la respuesta de la estructura. El uso de estos sistemas puede variar, pero están más enfocados para disminuir la vibración de la estructura ante fuerzas dinámicas provocadas por viento, en estructuras de gran altura. Una de sus ventajas es que al estar instalados en las partes altas de los edificios disminuye su impacto visual en la arquitectura de estos mismos (Christopoulos, et al., 2006).

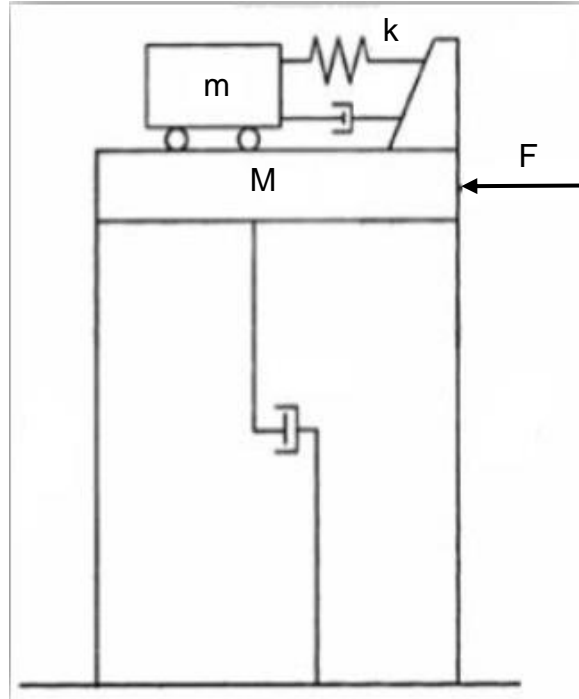


Figura 18. Amortiguador de masa sintonizada

## **4. CONFIGURACIÓN DEL EXPERIMENTO**

## 4.1 DESCRIPCIÓN DEL ESPÉCIMEN

Se ensayaron tres disipadores de fricción con diseño y capacidades iguales (Figura 19) en el Instituto de Ingeniería de la UNAM. Dos de los disipadores fueron sometidos a pruebas de simulación híbrida y el tercero fue sometido a un protocolo de carga cíclica reversible aplicado de manera cuasiestática. En esta tesis se reportan los resultados del último disipador.

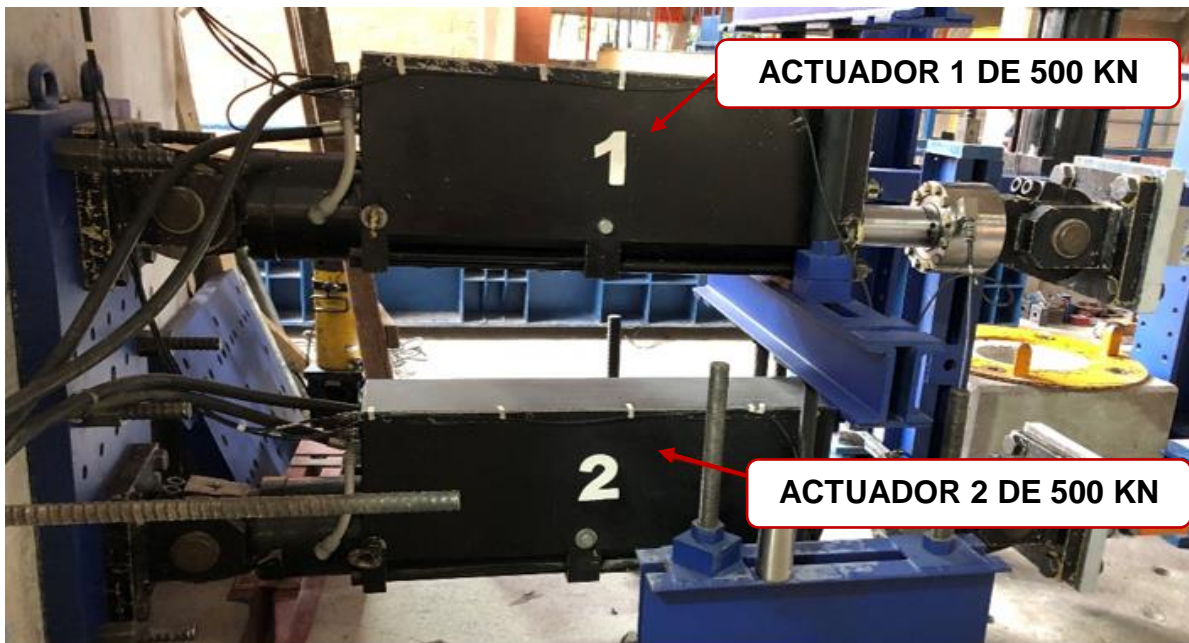


*Figura 19. Disipador de fricción marca en el laboratorio (créditos: Ernesto García)*

Dado que los dispositivos cuentan con una patente privada y tienen un diseño confidencial, no es posible proporcionar mucha información técnica. Pero cabe destacar que, al ser disipadores de fricción, trabajan bajo los mismos principios de disipación sísmica que cualquier sistema de disipación por fricción.

## 4.2 EQUIPO UTILIZADO

Se hizo uso de tres actuadores de tipo electrohidráulico de la marca MTS, dos de estos con capacidad de 500 KN de carga y con 300 mm de carrera. Estos actuadores se conectaban a un colector hidráulico, de manera que su manejo se podía llevar a cabo de una forma óptima. Estos dispositivos fueron utilizados para desarrollar pruebas de simulación híbrida en dos de los disipadores de fricción. La Figura 20 muestra a los actuadores 1 y 2, instalados en el laboratorio.



*Figura 20. Actuadores 1 y 2 de 500 KN de capacidad de carga empleados para pruebas de simulación híbrida.*



El tercer actuador etiquetado con el número 4 tiene una capacidad de 1000 KN de capacidad de carga y 300 mm de carrera (Figura 21). Con este actuador se realizaron las pruebas que se describen en esta tesis.



*Figura 21. Actuador electrohidráulico 4 de 1000 KN de capacidad (créditos: Ernesto García)*

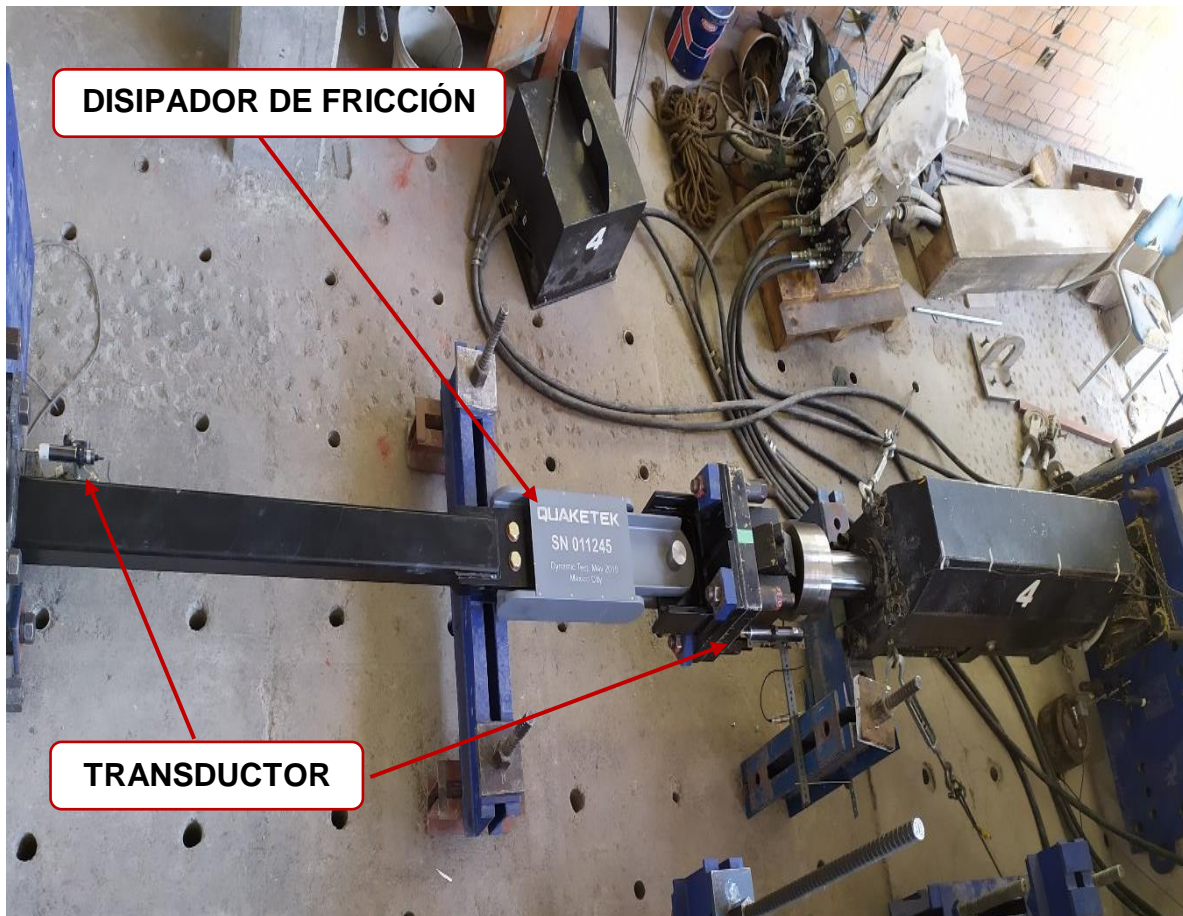
### 4.3 ARREGLO EXPERIMENTAL

Dada las características del laboratorio de estructuras y los objetivos de las pruebas la configuración del experimento se realizó de la siguiente forma. La idea principal fue colocar los dispositivos de forma horizontal y hacer uso de los tres actuadores de manera simultánea para poder llevar a cabo de manera más rápida los ensayos. Cabe destacar que los actuadores 1 y 2 tuvieron como objetivos pruebas de simulación híbrida, las cuales no son el objeto de estudio de este trabajo, pues en esta tesis sólo se reportan pruebas cuasi-estáticas aplicadas en el tercer dissipador. En la Figura 22 se pueden observar algunos elementos y equipos utilizados tales como: muros de reacción, placas de acero, la posición de los actuadores, la losa de reacción, yugos y barras.



Figura 22. Elementos y equipos utilizados para poder ensayar los especímenes (créditos: Ernesto García).

Las Figuras 23 y 24 muestran fotografías donde se pueden apreciar la instalación final que tuvo el dispositivo puesto a prueba. Se muestra la localización de los equipos de medición, que consisten en transductores de desplazamiento tipo CDP.



*Figura 23. Vista en planta del disipador de fricción con el actuador número 4 (créditos: Ernesto García)*

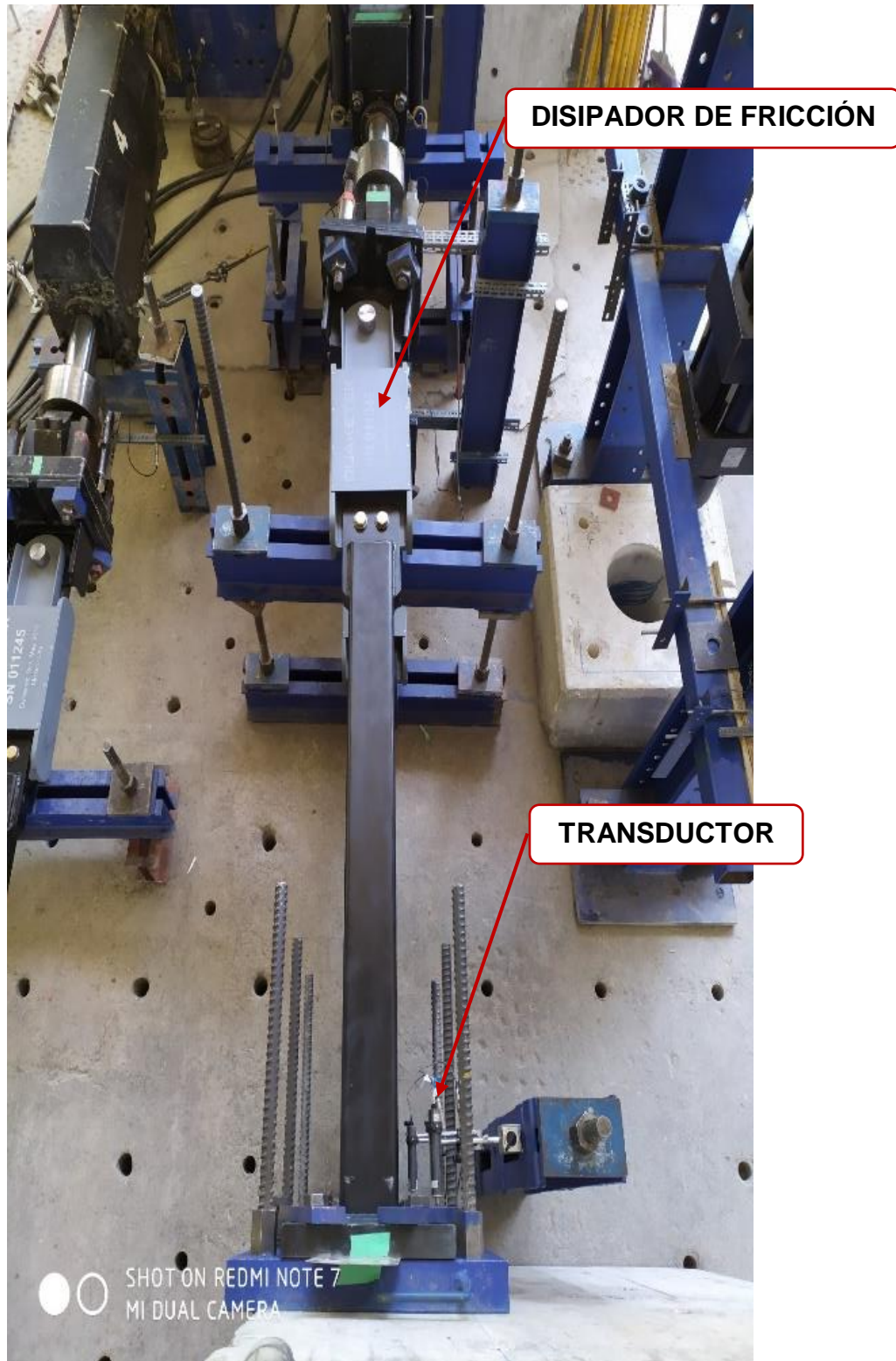


Figura 24. Vista en planta de disipador de fricción durante pruebas (créditos: Ernesto García)

La Figura 25 muestra una fotografía general del arreglo experimental, en la que se muestran los tres dispositivos instalados; así como los detalles de los elementos y equipos utilizados para su realización.

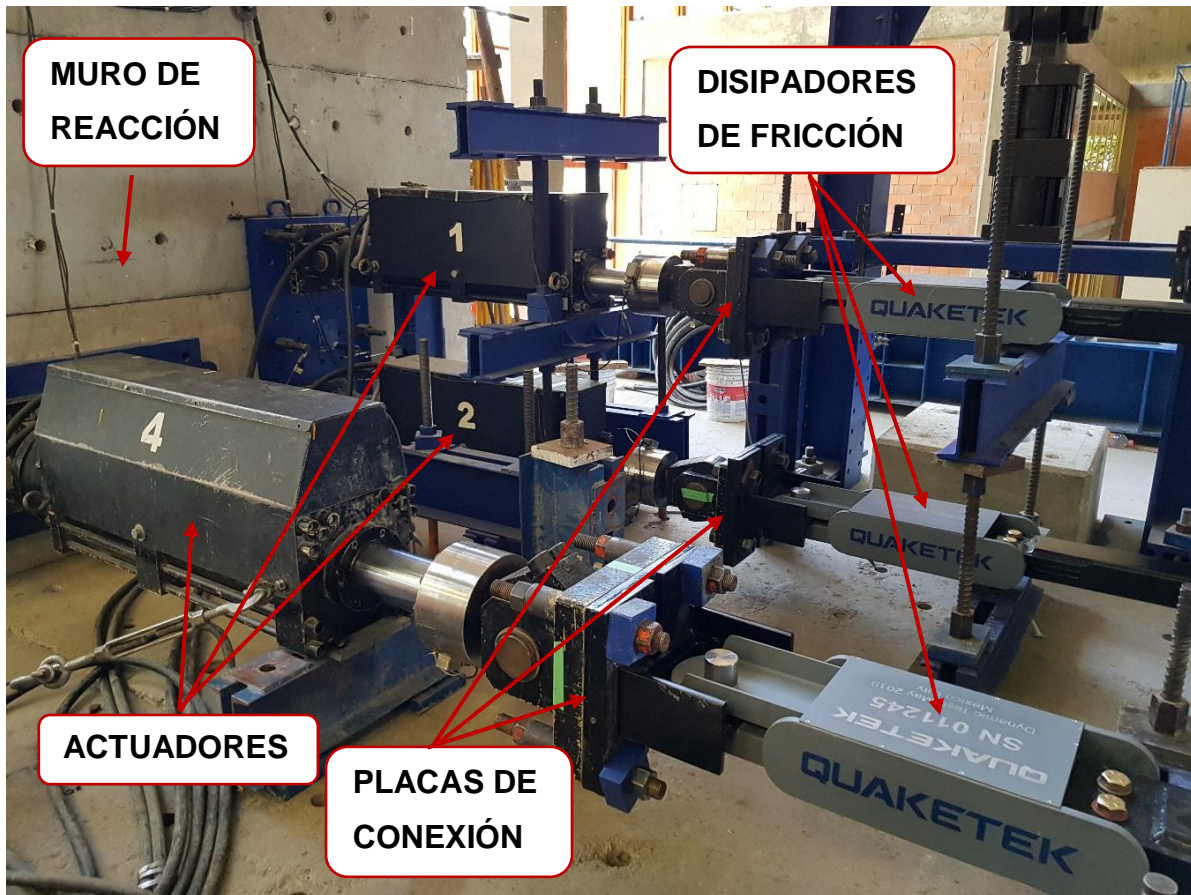


Figura 25. Arreglo experimental final.

## 4.4 PROTOCOLOS DE CARGA

El propósito de los desplazamientos aplicados al dispositivo fue obtener información suficiente de su comportamiento para poder hacer un modelado de su desempeño.

Inicialmente se intentó aplicar ciclos de desplazamiento de  $\pm 40\text{mm}$  a una frecuencia de 1 Hz, pero debido a que el actuador era estático, el desplazamiento máximo que se pudo aplicar fue menor. Se realizaron ocho intentos. Sin embargo, durante el desarrollo de las pruebas surgieron varios percances principalmente en la conexión del dispositivo; pues en los pernos se presentaron desplazamientos bruscos que interrumpieron las pruebas. Esto trajo como consecuencia alteraciones muy significativas en los resultados registrados. Dada esta situación sólo los últimos tres ensayos resultaron exitosos y son los que se tomaron en cuenta para este estudio.

A continuación, se presentan curvas tiempo-desplazamiento, que muestran la historia de desplazamientos aplicados al dispositivo. La Figura 26 muestra un desplazamiento máximo de  $\pm 22\text{mm}$  con una duración de 17 segundos. Nótese que sólo se aplicaron tres ciclos de desplazamientos. El siguiente protocolo de carga se presenta en la Figura 27 donde se aplicaron cuatro ciclos de desplazamientos de  $+7.5$  y  $-17\text{mm}$ . Por último, la Figura 28 muestra una sucesión de cuatro grupos de ocho ciclos de desplazamientos casi estables que rondaron cerca  $\pm 25\text{mm}$ . Estos últimos ciclos se aplicaron a una frecuencia de 0.2 Hz.

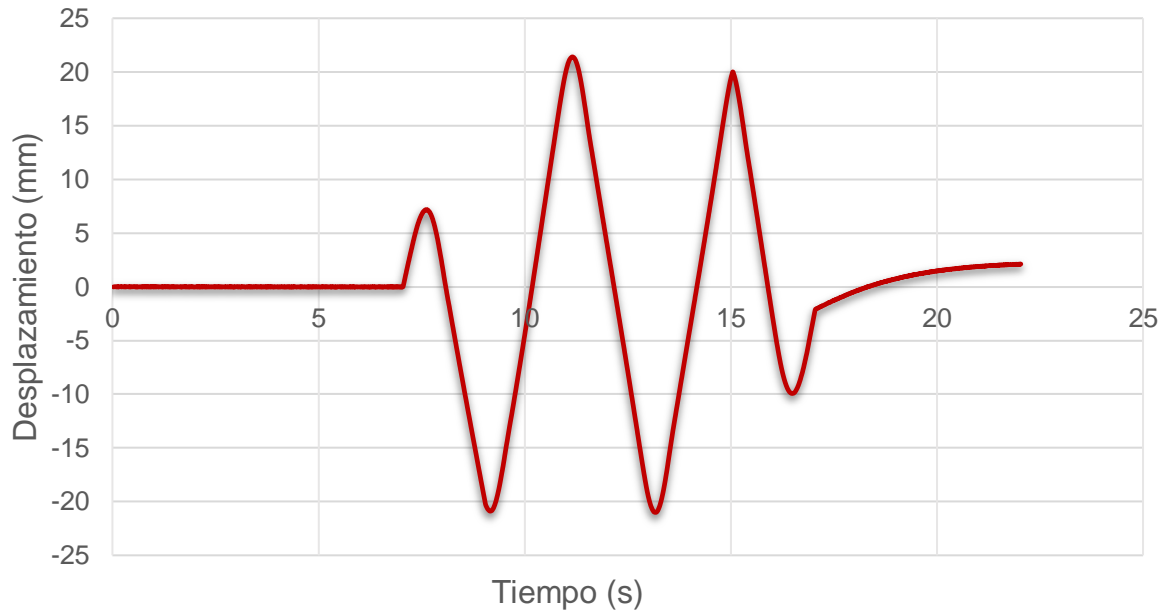


Figura 26. Historia de desplazamientos aplicados a la prueba 1

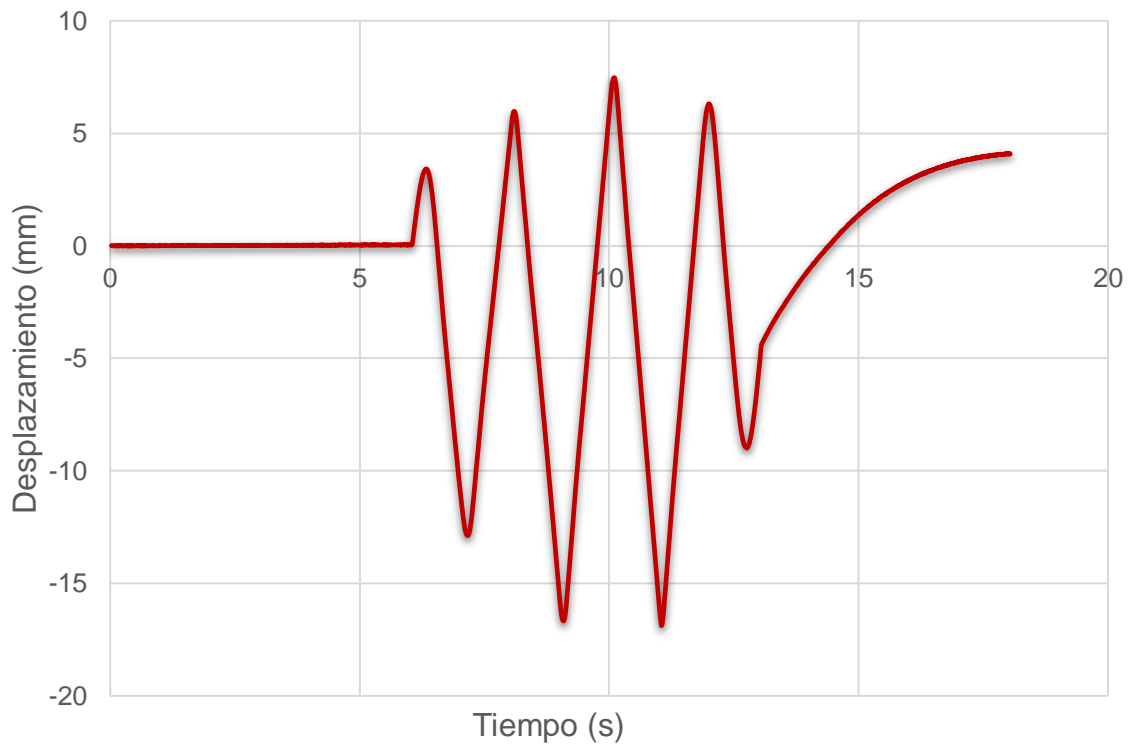
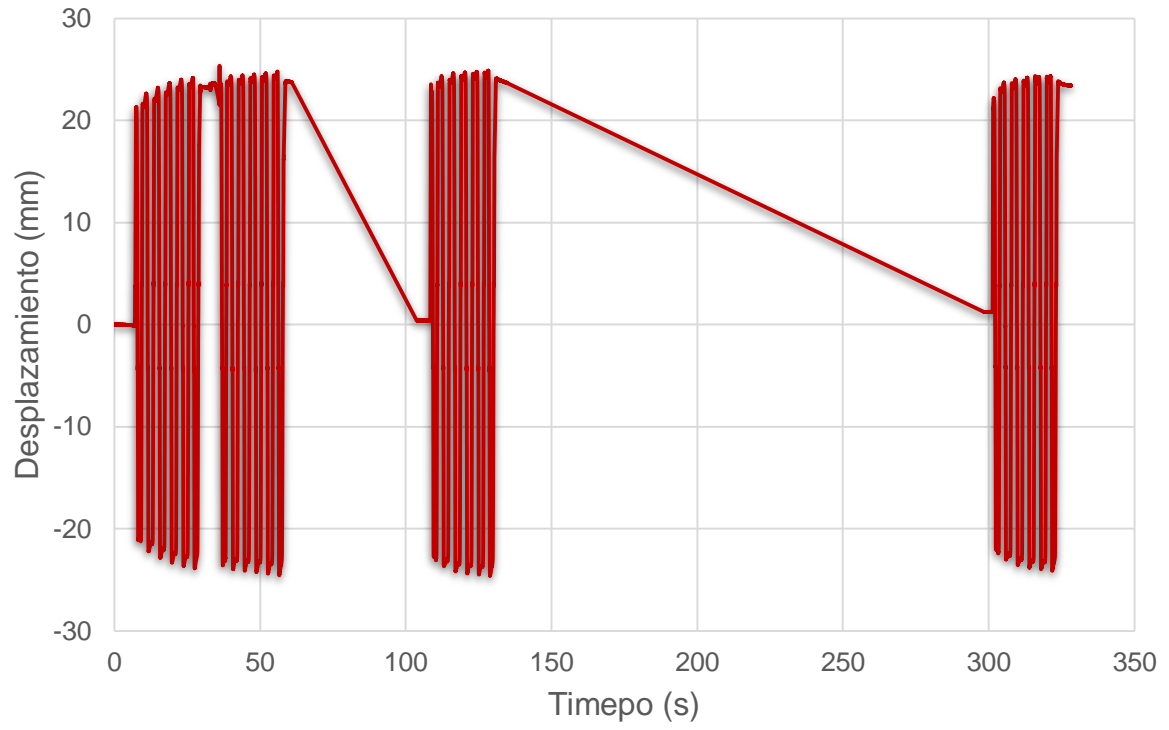


Figura 27. historia de desplazamientos aplicadas a la prueba 2



*Figura 28. Historia de desplazamientos aplicadas en la prueba 3*



## **5.RESULTADOS EXPERIMENTALES**

## 5.1 CURVAS DE HISTÉRESIS

Al concluir el experimento se procedió a realizar un procesamiento de los datos. Para esto se tomaron en cuenta sólo las lecturas registradas por la celda de carga del actuador y su transductor de desplazamientos.

El procesamiento de los datos consistió en revisar cada una de los resultados de las ocho pruebas realizadas, descartando las lecturas que presentaban incongruencias y sólo tomando en cuenta las últimas tres.

En las Figuras 29 y 30 se muestran las curvas de histéresis (carga-desplazamientos) de las pruebas exitosas registradas. Se puede apreciar claramente que el dispositivo tiene un comportamiento típico de los disipadores de fricción, el espécimen comenzó a deslizarse alrededor de las 230 KN de carga. Analizando a detalle el comportamiento de las curvas de histéresis, se pueden observar ciclos muy amplios y estables. La carga del disipador prácticamente denota un comportamiento constante; no existe una degradación en la resistencia significativa. También, se pueden apreciar deslizamientos en los niveles de carga cercanos a cero que se atribuyen a cambios de compresión a tensión y viceversa en las conexiones del disipador.

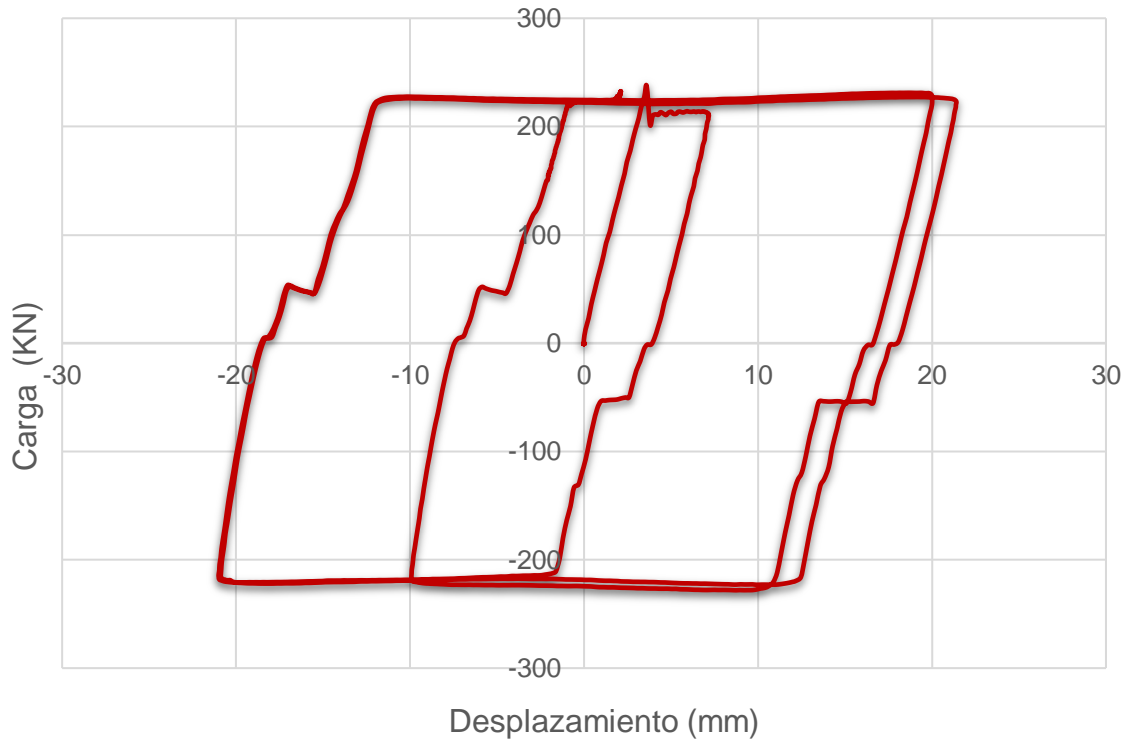


Figura 29. Curvas de histéresis de la prueba 1.

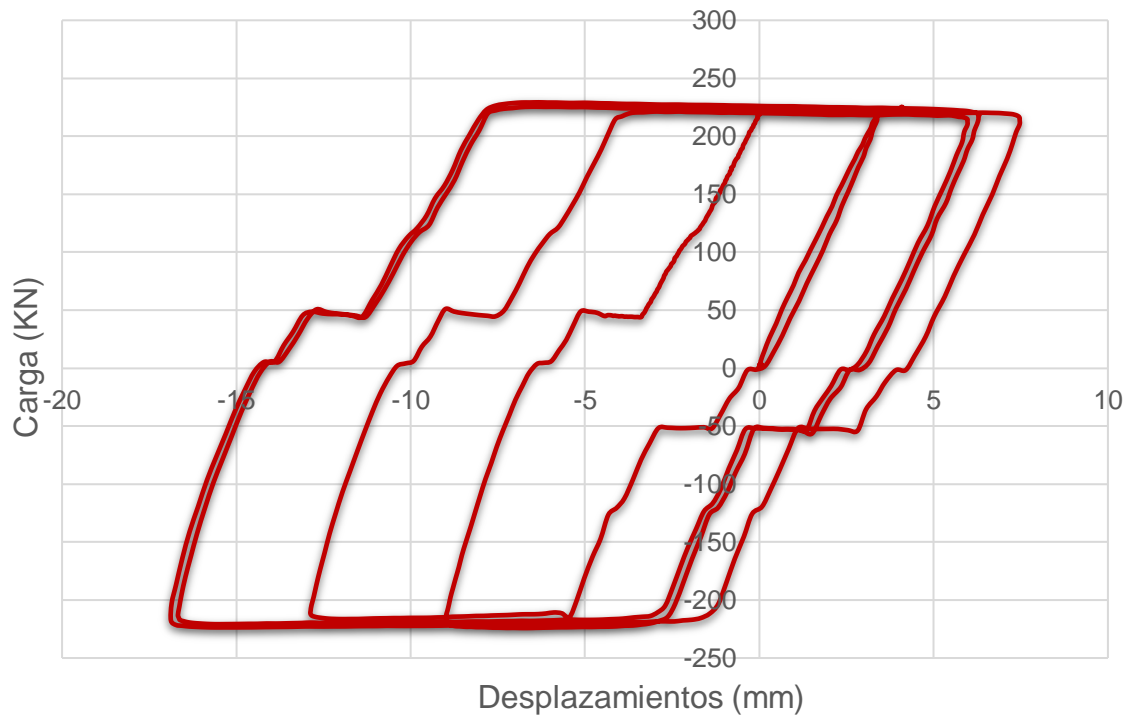
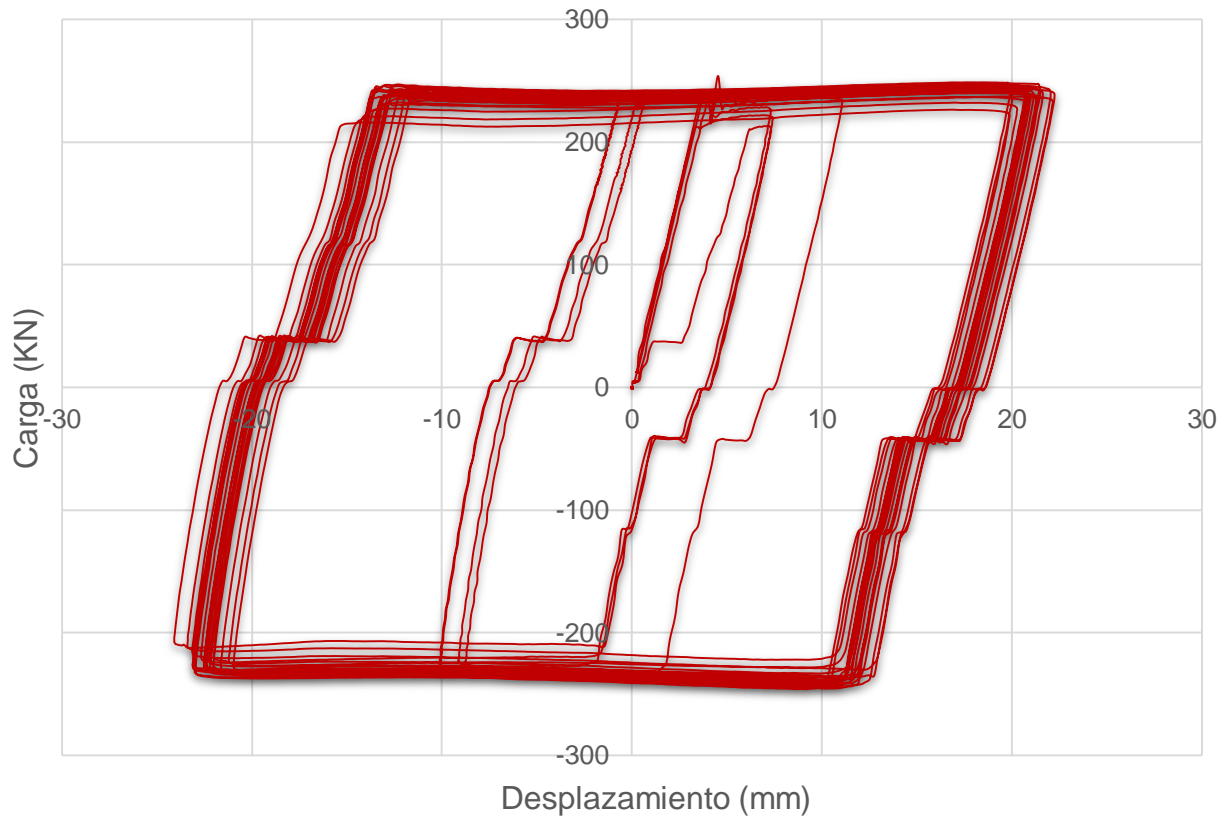


Figura 30. Curvas de histéresis de la prueba 2.

La Figura 31 muestra una cantidad mayor de ciclos aplicados. Se muestra una degradación mayor en la capacidad de cargar del dispositivo; sin embargo, ésta continúa siendo despreciable.



*Figura 31. Curvas de histéresis de la prueba 3.*

## 5.2 CURVAS DE ENERGÍA DISIPADA Y DUCTILIDAD ACUMULADA

La energía disipada  $E_H$  puede expresarse matemáticamente como el área bajo las curvas de histéresis obtenidas en los ensayos. Para ello se usó de la ecuación (5.1)

$$E_H = \sum F_i(u_i - u_{i-1}) \quad (5.1)$$

donde  $F_i$  y  $u_i$  son: la carga y desplazamiento en el momento  $i$ .

Sin embargo,  $E_H$  no nos proporciona la información práctica para evaluar el desempeño del disipador de fricción; por lo cual es necesario también calcular la ductilidad acumulada en cada una de las pruebas. Para ello se normaliza  $E_H$  según la ecuación (5.2)

$$\mu_{acc} = \frac{E_H}{F_y \delta_y} \quad (5.2)$$

donde  $F_y$  y  $\delta_y$  son la carga y desplazamiento de activación del disipador de energía en cada una de las pruebas.

La ductilidad acumulada es un parámetro que ayuda a conocer la durabilidad de un disipador ante eventos sísmicos. De igual manera ésta información se toma en cuenta como punto de comparación con otros tipos de disipadores de energía sísmica.

En las Figuras 32, 33 y 34 se presentan los resultados de energía disipada durante las pruebas. Se puede observar claramente que la curva de disipación de energía tiene una pendiente positiva muy bien definida, con ligeros cambios negativos.

En las Figuras 32 y 33 se puede notar que la cantidad de energía disipada es reducida debido al bajo número de ciclos aplicados. Mientras que en la Figura 34, las cantidades de energía disipada son mucho mayores, debido a la cantidad mayor de ciclos aplicadas. Como observación interesante se puede apreciar que la pendiente de energía disipada no cambia mucho durante las pruebas. Esto significa que el dispositivo tiene una gran resistencia ante la fatiga con un comportamiento muy estable.

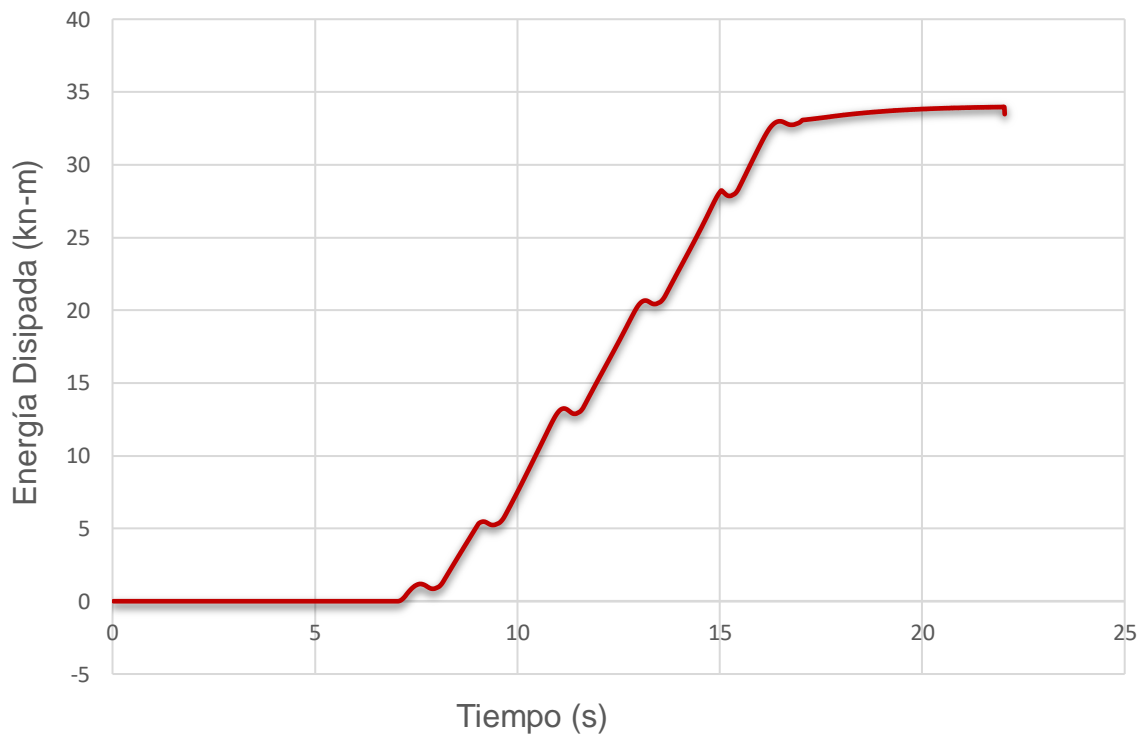


Figura 32. Curva de energía disipada de la prueba 1

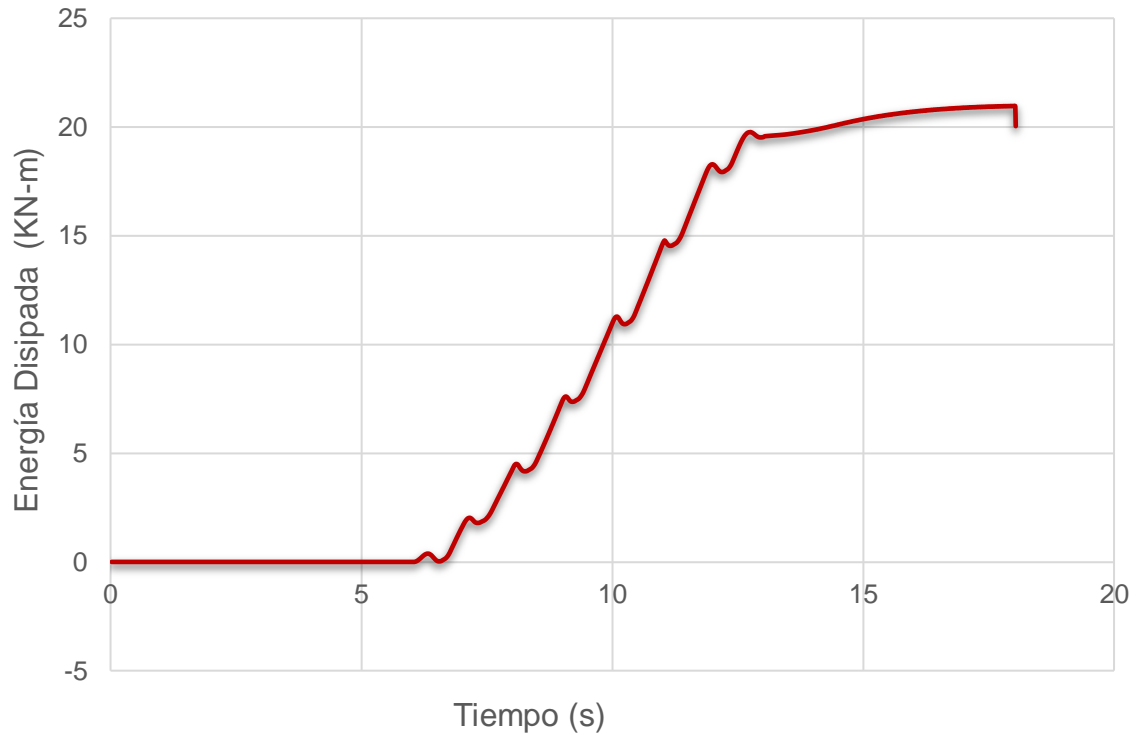


Figura 33. Curva de energía disipada de la prueba 2

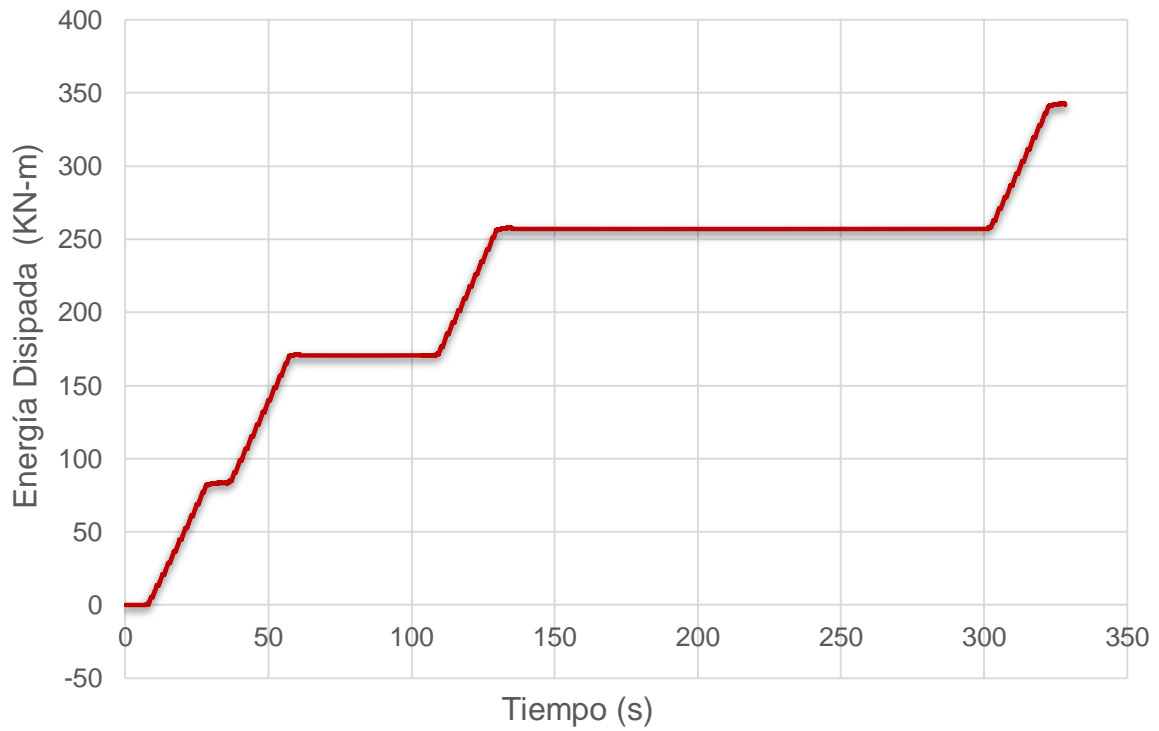


Figura 34. Curva de disipación de energía de la prueba 3

La ductilidad acumulada es un parámetro adicional, que permite conocer la capacidad de disipación de un sistema. En otras palabras, este parámetro ayuda a evaluar la capacidad que tiene un espécimen para resistir deformaciones inelásticas antes de presentar la falla. En las Figuras 35 y 36 se presentan los resultados obtenidos del cálculo de la ductilidad acumulada a partir de los datos de energía disipada. Como característica principal de las dos Figuras es que cada curva es prácticamente igual a la anterior, están muy bien definidas; presentan una pendiente muy pronunciada. Ello denota un gran desempeño por parte del disipador ante los ciclos de carga que le fueron aplicados.

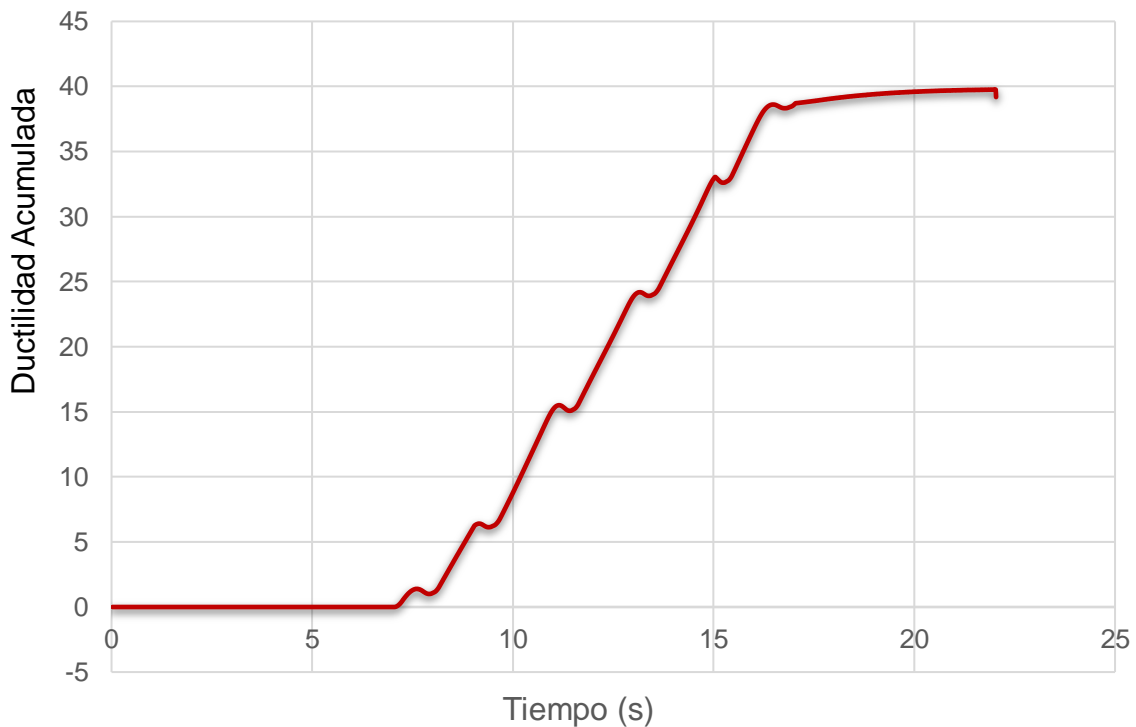


Figura 35. Curva de ductilidad acumulada de la prueba 1



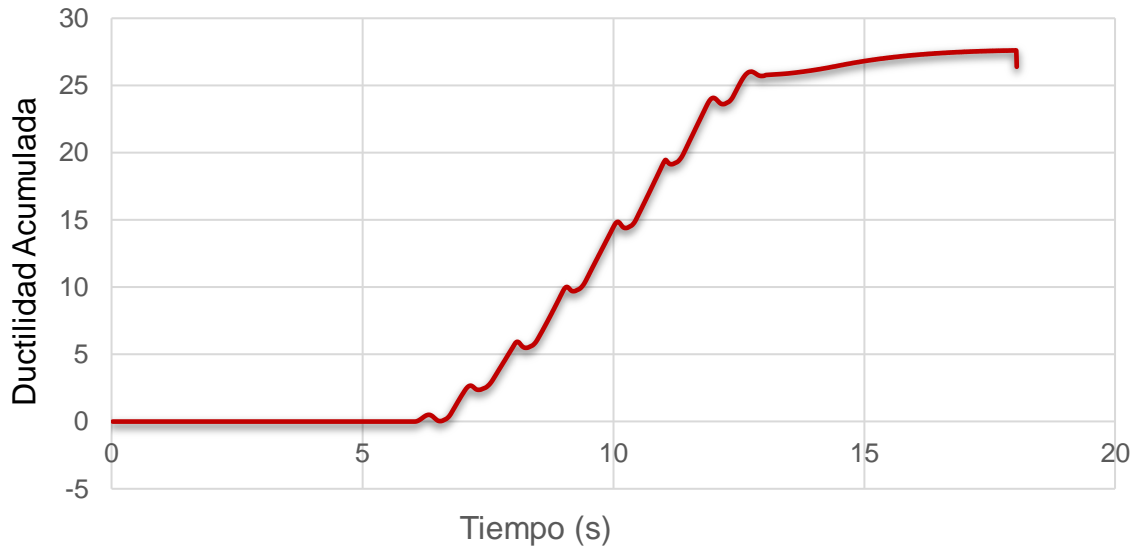


Figura 36. Curva de ductilidad acumulada de la prueba 2

Por otra parte, la Figura 37 muestra valores de ductilidad acumulada más altos; lo que resulta en una gran resistencia ante la fatiga.

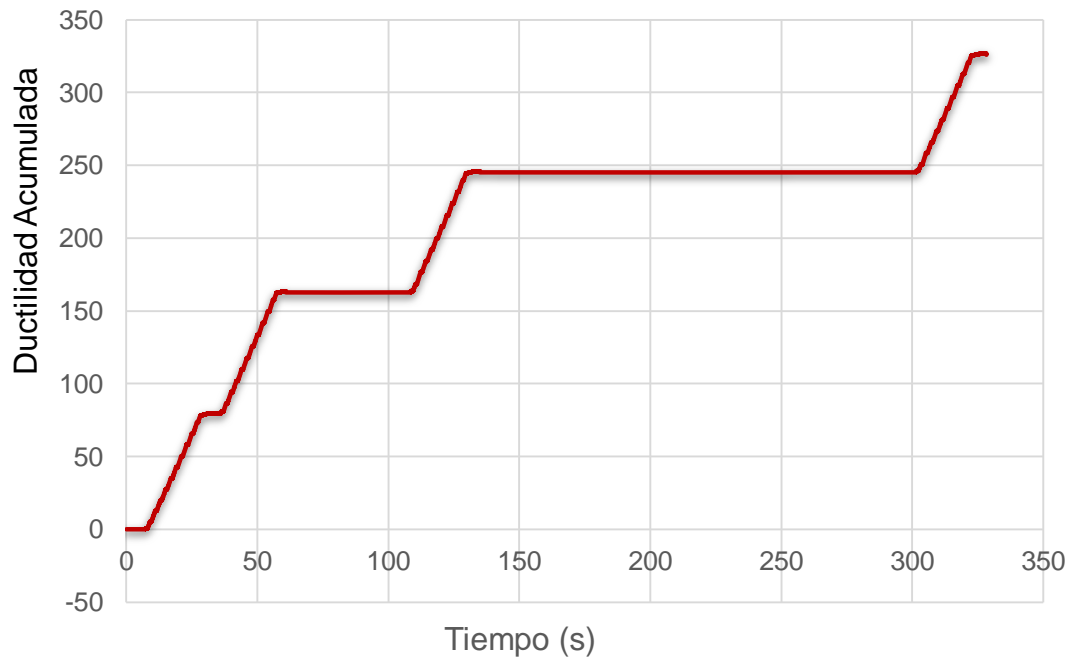


Figura 37. Curva de ductilidad acumulada de la prueba 3

## **6.DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS**

Con la finalidad de poner en contexto los resultados mostrados en esta tesis, se presentan y comparan resultados de otras pruebas experimentales realizadas en la investigación “Simulación híbrida de una estructura equipada con disipadores tipo BRB” elaborado por Sánchez (2019), en su tesis de maestría y también los estudios realizados en la investigación “Caracterización experimental de disipadores de energía sísmica de bajo costo” desarrollada por García (2020).

De estos dos trabajos de investigación se tomarán en cuenta los estudios realizados en modelos numéricos, donde se evaluó las capacidades de disipadores histeréticos para resistir movimientos sísmicos de gran intensidad al ser instalados en una estructura.

Se evaluó la demanda de ductilidad acumulada y ductilidad máxima contra la capacidad promedio de los disipadores de tipo BRB, sometidas al registro sísmico del 19 de septiembre de 2017 de la estación sismológica Culhuacán, dirección Este-Oeste.

En la Tabla 6.1 se muestran los resultados obtenidos en las investigaciones; de Sánchez (2019) y García (2020), para tres tipos de análisis.

El primer análisis numérico consiste en un análisis de simulación híbrida en un marco de tres niveles equipado con disipadores tipo BRB, en este estudio se aplicó el registro sísmico con tres intensidades: 100%, 150% y 200%.

El segundo análisis conservaron las características del primero, con la diferencia de que la respuesta de los disipadores BRB fue obtenida a través de un modelo numérico, el cual fue calibrado con parámetros obtenidos en la investigación de García (2020).

El tercer análisis consistió en un estudio numérico simplificado. Se analizó un marco de un sólo nivel, al que se le varió el periodo de vibrar. El marco estuvo equipado con un disipador histerético del tipo BRB.

Tabla 6.1. Análisis de resultados por Sánchez (2019) y García (2020)

<b>Análisis</b>	<b>Tipo</b>	<b>Intensidad sísmica</b>	<b>Periodo de la estructura (s)</b>	<b>Demanda ductilidad acumulada</b>	<b>Demanda de ductilidad máxima</b>
<b>Primero</b>	Simulación híbrida experimental	100 %	0.45	6.5	1.63
		150 %	0.45	16.2	2.14
		200 %	0.45	36.2	5.26
<b>Segundo</b>	Estudio numérico edificio de tres niveles	100 %	0.45	1.3	1.15
		150 %	0.45	14.1	1.84
		200 %	0.45	26.9	4.07
<b>Tercero</b>	Estudio numérico marco de un nivel	100 %	0.1	0.0	0.2
		100 %	0.2	2.6	1.5
		100 %	0.3	134.4	11.06

Los resultados de la Tabla 6.1 permiten hacer una comparación de los resultados de esta tesis, y tener un punto de referencia para confirmar la eficiencia y rendimiento del disipador de fricción ensayado.

La Figura 38 muestra una comparación de la ductilidad acumulada desarrollada por el dissipador de fricción durante las pruebas 1,2 y 3, contra las demandas máximas obtenidas por Sánchez (2020) y García (2020). Como se puede apreciar, en la resistencia del dissipador ensayado sobrepasa notablemente las demandas obtenidas. Esto demuestra que el dissipador de fricción es muy confiable para su uso en el diseño y aplicación en estructuras resistentes a sismos.

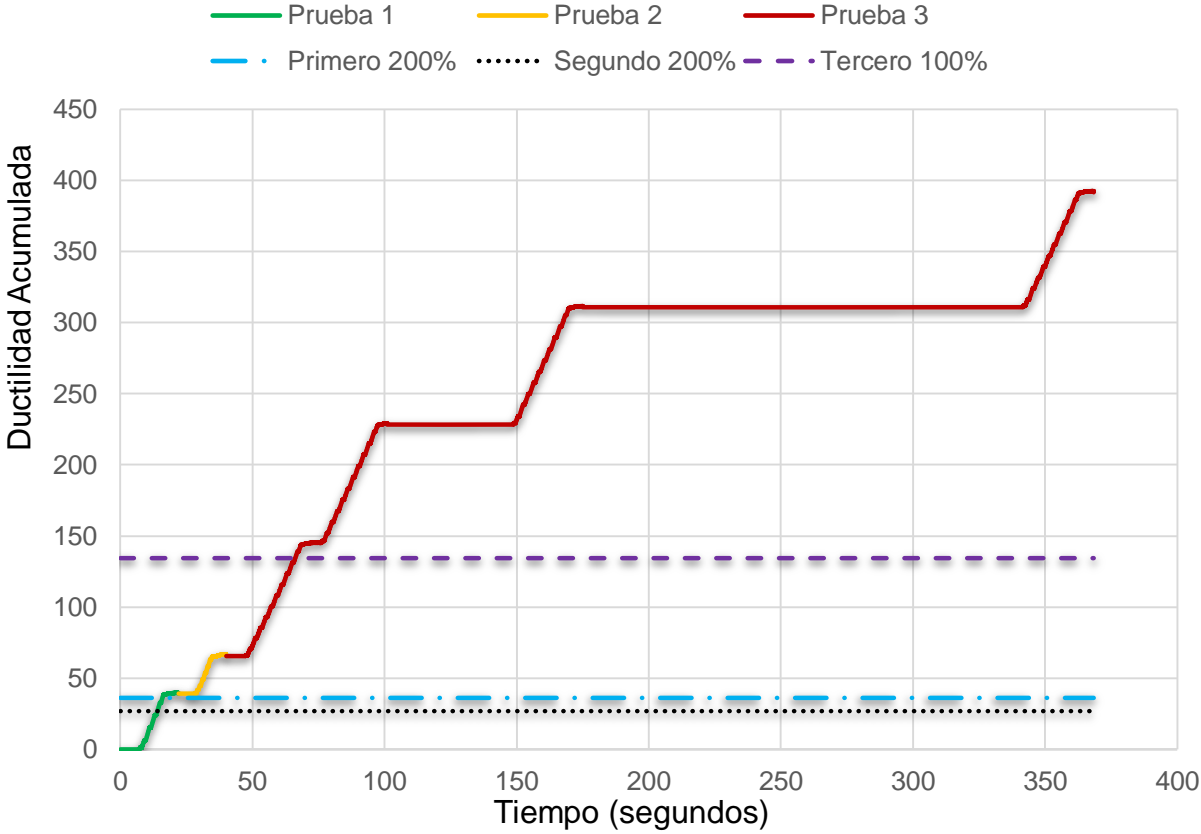


Figura 38. Comparación de la ductilidad acumulada total contra los resultados obtenidos en los estudios de García (2020) y Sánchez (2020)

## **7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

## 7.1 Conclusiones

Se realizaron pruebas experimentales de un disipador de fricción en el Laboratorio de Estructuras y Materiales del Instituto de Ingeniería de la UNAM. Los resultados se compararon con estudios numéricos y experimentales realizados por otros (Sánchez, 2020 y García, 2020).

Se ofrecen las siguientes conclusiones:

Con el desarrollo de esta investigación se comprobó que el desempeño del disipador de energía de fricción cumple satisfactoriamente con las características necesarias para su implementación en estructuras sismo-resistentes. Al desarrollar ciclos histeréticos muy amplios y estables, con una gran resistencia ante la fatiga y muy poca degradación de su resistencia ante ciclos de carga, se demostró su gran capacidad para resistir eventos sísmico severos.

Lo anterior mencionado se refleja en las curvas de histerésis (Figuras 29, 30 y 31) que denotan un comportamiento típico de los disipadores de fricción, con ciclos muy amplios y estables. La aplicación de la carga sobre el dispositivo ensayado arrojó un comportamiento constante, no se presenta una degradación en la resistencia que sea significativa durante las tres pruebas y se aprecian ciertos deslizamientos en los niveles de carga cercanos a cero que son consecuencia de los cambios de compresión y tensión en las conexiones del disipador.

La capacidad de disipación de energía y la ductilidad acumulada obtenidas durante los ensayos denotan un excelente desempeño por parte del disipador. Las curvas de energía disipada durante las tres pruebas muestran características similares y no cambian mucho una de otra, la forma de la pendiente no presenta cambios significativos. El dispositivo mostró una gran resistencia ante la fatiga con un comportamiento muy estable.

Al hacer las comparaciones de las curvas de energía disipada y ductilidad acumulada obtenidas del disipador con los estudios realizados en modelos numéricos de las investigaciones de Sánchez (2020) y García (2020), se puede apreciar que la resistencia del dispositivo sobrepasa satisfactoriamente las demandas esperadas ante sismos de gran intensidad. Se demostró así que el disipador es confiable para su uso en el diseño y aplicación de estructuras resistentes a sismos.

## **7.2 Recomendaciones**

Como recomendación principal es mejorar el tipo de conexión del disipador en el extremo donde sólo se tiene un perno, ya que durante las pruebas se pudo apreciar que al aplicarse los ciclos de carga se presentaron deslizamientos que afectaban el desarrollo de las pruebas y los resultados obtenidos por las celdas de carga de los actuadores. Esos efectos se veían reflejados en las curvas de histeré시스 obtenidas, lo cual puede tener como consecuencia que el dispositivo no desarrolle su máxima capacidad.

Adicionalmente, se recomienda hacer pruebas en mesa vibra de un edificio con la implementación de disipadores de fricción, a fin de obtener mayor información estadística sobre su comportamiento y desempeño. Ello ayudaría a la popularización de su uso e implementación en el diseño o reforzamiento de estructuras para lograr una sociedad más resiliente.



## **8.REFERENCIAS**

Aiken ID, Douglas KN, Whittaker, y Kelly J. (1993), Testing of Passive Energy Dissipation Systems, Earthquake Spectra, Vol 9, No 3.

Arrollo E, Terán, A, Gama E y Guerrero J, (2009), Estudio Experimental de Contravientos Restringidos Contra Pandeo: Desarrollo Conceptual y Detalles de Implementación, Universidad Autónoma Metropolitana, México.

Christopoulos C, Filiatrault A, y Bertero V V. (2006). Principles of passive supplemental damping and seismic isolation. Pavia, Italia: IUSS Press.

CDT, Corporación de Desarrollo Tecnológico. (2012), Sistemas de Aislación Sísmica y Disipación de Energía, Protección Sísmica de Estructuras, Cámara Chilena de la Construcción.

García Mora Pinto J E. (2020) Caracterización experimental de disipadores de energía sísmica de bajo costo. Tesis de Maestría. Universidad Nacional Autónoma de México.

Genatios C. y Lafuente M, (2016) Introducción al uso de aisladores y disipadores en estructuras: Corporación Andina de Fomento, Caracas, Venezuela.

Gómez J. (2018) Pruebas experimentales en un marco de concreto reforzado equipado con disipadores de energía sísmica. Tesis de licenciatura. Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México.

Grigorian C, Yang T y Popov E. (1993), Slotted Bolted Connection Energy Dissipators, Earthquake Spectra, Vol 9, No. 3.

Guerrero H. (2016). Seismic design and performance of hospital structures equipped with buckling-restrained braces in the lakebed zone of Mexico City, Tesis doctoral, Universidad de Mánchester, Reino Unido.

Meteorología en Red, Cinturón de fuego del Pacífico. Recuperado el 19 de agosto de 2019 de <https://www.meteorologiaenred.com/cinturon-de-fuego-del-pacifico.html>

Museo virtual, Riesgos geológicos, Sismología de México. Recuperado el 19 de agosto de 2019 de <https://www.sgm.gob.mx/Web/MuseoVirtual/Riesgos-geologicos/Sismologia-de-Mexico.html>

Museo virtual, Riesgos geológicos, Sismología de México. Recuperado el 20 de agosto de 2019 [http://www2.ssn.unam.mx/website/jsp/region\\_sismica\\_mx.jsp](http://www2.ssn.unam.mx/website/jsp/region_sismica_mx.jsp)

Oviedo JA, Duque MP, (2006) Sistemas de control de respuesta sísmica en edificaciones. Revista EIA [en línea].

Oviedo, Juan Andrés, Duque, María del Pilar, (2009) Disipadores histeréticos metálicos como técnica de control de respuesta sísmica en edificaciones colombianas. Revista EIA, ISSN 1794-1237 Núm. 11, p. 51-63

Pittí E, (2019) Estado del arte de los sistemas de protección sísmica para edificios. *Mente & Materia*, 4(1), 26-27. Recuperado a partir de <https://revistas.utp.ac.pa/index.php/mente-y-materia/article/view/341>

Quaketek, (2019), Amortiguadores sísmicos - Amortiguadores de fricción, ¿Qué son los amortiguadores de fricción sísmica?, Recuperada el 13 de agosto de 2019, de <https://www.quaketek.com/seismic-friction-dampers>.

Sánchez Arriaga D. (2019). Simulación híbrida de una estructura equipada con disipadores tipo BRB, México: Tesis de maestría. Universidad Nacional Autónoma de México.

Sistema Geológico Mexicano. (2019) Museo Virtual, Riesgos Geológicos, Evolución de la Tectónica en México. Recuperado el 22 de agosto de 2019 de <https://www.sgm.gob.mx/Web/MuseoVirtual/Riesgosgeologicos/Evolucion-tectonica-Mexico.html>

Sistema Sismológico Nacional, 2019, Museo virtual, Riesgos geológicos, Evolución de la tectónica en México. Recuperado el 18 de agosto de 2019 de

<https://www.sgm.gob.mx/Web/MuseoVirtual/Riesgos-geologicos/Evolucion-tectonica-Mexico.html>