



---

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**

“PRUEBAS EXPERIMENTALES EN UN MARCO DE  
CONCRETO REFORZADO EQUIPADO CON  
DISIPADORES DE ENERGÍA SÍSMICA”

**TESIS**

Que para obtener el título de  
**Ingeniero civil**

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

Juan José Gómez García

**DIRECTOR DE TESIS**

Dr. Héctor Guerrero Bobadilla



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2018

# CONTENIDO

Dedicatorias

Agradecimientos

Resumen

## 1. Introducción

1.1 Planteamiento del problema .....	4
1.2 Justificación .....	6
1.3 Objetivos y alcance .....	6

## 2. Antecedentes

2.1 Revisión bibliográfica .....	7
2.2. Sistemas de disipación de energía sísmica .....	9
2.3 Tipos de disipadores sísmicos.....	12
2.4 Disipadores histeréticos .....	16

## 3. Configuración del experimento

3.1 Marco de concreto reforzado .....	21
3.2 Disipador de energía sísmica.....	27
3.3 Protocolo de carga .....	30
3.4 Instrumentación .....	31

## 4. Resultados

4.1 Inspección y daños visuales .....	34
4.2 Curvas carga-desplazamiento .....	37

## 5. Conclusiones y recomendaciones .....

45

## 6. Referencias bibliográficas .....

49

## **DEDICATORIA**

*A mi padre, que durante toda su vida lucho hasta el cansancio para que lograra mis objetivos y metas.*

*A mi madre, que con su amor me ha acompañado a lo largo de mi camino, dándome el más grande apoyo, cariño y comprensión.*

*A mis hermanos, con los cuales he compartido dichas, alegrías y llantos, los cuales han estado para mí en todo momento que los he necesitado.*

## **AGRADECIMIENTOS**

Al Instituto de Ingeniería de la UNAM y en particular al Dr. José Alberto Escobar por el apoyo económico, académico y moral que fue brindado durante la realización de esta tesis.

Al Dr. Héctor Guerrero Bobadilla por la paciencia y el apoyo profesional, académico y moral que me brindo en este proyecto.

A mis padres, hermanos y todas las personas que hicieron posible la realización de este trabajo.

## **RESUMEN:**

En este trabajo se presentan los resultados experimentales de tres ensayos realizados en el Laboratorio de Estructuras y Materiales del Instituto de Ingeniería de la UNAM (II-UNAM), los cuales consistieron en la aplicación de carga lateral a un marco de concreto reforzado en diferentes condiciones estructurales. Dos de los ensayos se hicieron con dos tipos de disipadores de energía sísmica hysteréticos metálicos tipo “SLB” respectivamente, comercializados por la empresa Luis Bozzo Estructuras y Proyectos S.L.

Se presentan los resultados obtenidos de las pruebas, por medio de curvas de carga-desplazamiento (Curvas de histéresis) y curvas energía disipada. Con base en los resultados se realizan conclusiones y se dan recomendaciones para instalación y mejoras en el diseño de los disipadores.

## **1 introducción**

### **1.1 Planteamiento del problema**

México representa un gran reto para la ingeniería civil, en especial para el área de ingeniería estructural. Esto se debe a que el país se encuentra en una de las zonas con más actividad sísmica del mundo, llamada cinturón circumpacífico (SGM, 2017). Esta área está delimitada por varias placas tectónicas que interactúan entre si y están en constante movimiento.

En México, la sismicidad se debe principalmente a la falla de subducción que se encuentran en el choque de la placa de Norte América con la placa de Cocos tal como se observa en la *figura 1.1*. Esta falla o trinchera de subducción, ha provocado sismos de gran magnitud que han afectado varias zonas de la República Mexicana,

sobre todo en el sur y centro del país. Dichos fenómenos representan un gran riesgo, ya que las ciudades crecen cada día más y con ello el desarrollo de infraestructura, tales como edificaciones para vivienda o industria.

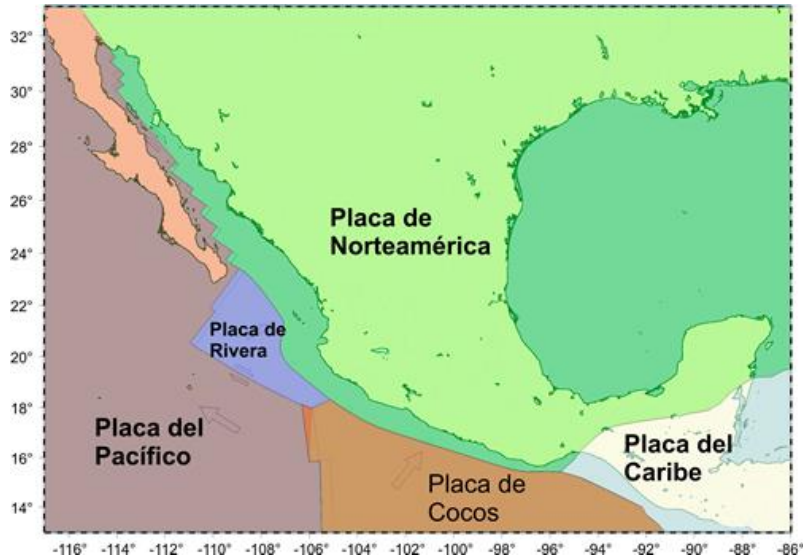


Figura 1.1. Placas tectónicas en México (SGM, 2017)

Durante un sismo, el mayor riesgo para la seguridad de las personas es el colapso de las edificaciones. Por lo cual es imperante que el desarrollo de la infraestructura se haga con estricto apego los reglamentos establecidos. Esto, para evitar daños que puedan involucrar pérdidas humanas y económicas. Pero sobre todo es necesario el desarrollo de tecnología en materia de diseño y construcción de estructuras sismo resistentes.

Durante las últimas décadas se ha desarrollado en el mundo nuevas tecnologías de protección sísmica para las estructuras, tales como los disipadores de energía sísmica. Esta tecnología ha resultado ser efectiva y de gran ayuda para aumentar la seguridad estructural. Sin embargo, es de suma importancia conocer el comportamiento de los distintos sistemas a fin de evaluar su aplicabilidad en nuestro país; dadas las condiciones sísmicas particulares que tenemos.

## **1.2 Justificación**

La seguridad estructural es una de las principales metas de la ingeniería civil y sobre todo en zonas con alta sismicidad como México. Por eso, es importante desarrollar más y mejores tecnologías de seguridad sísmica. Con esto se podrán alcanzar las expectativas del ingeniero civil y nuestra sociedad en general. Para ello, se debe conocer las características de las tecnologías de protección sísmica para poder elegir la mejor opción, dependiendo de sus métodos de diseño y cualidades que se deseé que la estructura posea.

La investigación sobre la respuesta de estructuras sometidas a sismos, es uno de las principales alternativas que hay para el desarrollo de los métodos de protección sísmica. La ejecución de experimentos en laboratorios de estructuras se convierte en un factor muy importante para conocer todas las características de estas tecnologías y así queden documentadas las cualidades y deficiencias de éstas, así como recomendaciones para un mejor funcionamiento de las mismas.

En México, cada día está aumentando el uso de estas tecnologías, como son disipadores y aisladores de energía sísmica. Por esto el incremento en la investigación propia se vuelve una directriz para el correcto uso y funcionamiento de dichas tecnologías, tomando en cuenta las características muy particulares de nuestro territorio y nuestro suelo.

En esta tesis, se describe el desarrollo de un programa experimental orientado a evaluar el mejoramiento de un sistema estructural a base de un marco plano de concreto reforzado, mediante el uso de un tipo de disipador de energía sísmica. La intención es conocer el funcionamiento y respuesta de estos sistemas en estructuras simples, tal como un marco plano de concreto reforzado. Esto resulta de gran utilidad por ser un sistema estructural muy usado en nuestro país.

### **1.3 Objetivos y alcance**

El objetivo general de esta tesis es describir el comportamiento de un dispositivo de disipación de energía sísmica que se encuentra en el mercado, el cual fue ensayado en el laboratorio de estructuras y materiales del Instituto de Ingeniería de la UNAM (II-UNAM), como parte de un proyecto experimental.

Los objetivos particulares son:

- Describir el proceso experimental, poniendo énfasis en los detalles y características particulares del modelo.
- Documentar los resultados obtenidos en el experimento e interpretarlos desde el punto de vista estructural.
- Generar conclusiones sobre la viabilidad y eficiencia del sistema en estudio.
- Proponer mejoras y parámetros de instalación y diseño del sistema en cuestión.

Con respecto a los alcances de esta tesis, se incluye la descripción del experimento; se muestran los resultados obtenidos por medio de figuras e ilustraciones; y se ofrecen conclusiones sobre la viabilidad y eficiencia de los disipadores.

## **2. Antecedentes**

### **2.1 Revisión bibliográfica**

En todo el mundo las edificaciones y estructuras civiles, son los elementos muy importantes para el desarrollo económico y social de un país, por lo cual es indispensable buscar la seguridad de dichas estructuras. Los sismos o terremotos, son los fenómenos naturales que más problemas le causan a la seguridad de una estructura, por lo cual es deber de los ingenieros civiles buscar alternativas, métodos y técnicas, que salvaguarden la integridad de las edificaciones y con ello la de las personas que las habitan.

Desde el siglo pasado se han desarrollado tecnologías en la industria de la construcción con el fin de reducir los desplazamientos en las estructuras y así evitar que sufran daños importantes. Una de estas tecnologías son los amortiguadores y disipadores de energía sísmica de los cuales se han hecho bastas investigaciones y avances tecnológicos en todo el mundo. Las investigaciones en las cual se basa esta tesis se presentan a continuación:

- El período de 1986 a 1991, siete diferentes disipadores de energía pasiva fueron estudiados en programas de investigación experimental en *el Earthquake Engineering Research Center* de la Universidad de California en Berkeley (Aiken, et al, 1993). En dicha investigación se describe los diferentes tipos de dispositivos, los resultados del experimento en mesa vibradora y trabajo analítico asociado.

Se estudiaron cuatro sistemas de fricción, y de estos, tres (Sumitomo, Pall y Friction-Slip) se basaron en la fricción de Coulomb. El cuarto es el *Fluor-Daniel Energy Dissipating Restraint*, que es un dispositivo capaz de proporcionar resistencia a la fricción proporcional al desplazamiento. Los otros tres sistemas tienen diferentes mecanismos de disipación de energía histéretico como son dispositivos ADAS y amortiguadores de cizallamiento viscoelásticos con un copolímero acrílico como elemento disipativo.

- En 1989, los investigadores Manuel Aguirre Granada y Roberto Sánchez Ramirez, realizaron investigaciones en el Instituto de Ingeniería de la UNAM, México (II-UNAM) con la intención de probar disipadores de energía sísmica tipo U y J. Su objetivo era establecer parámetros de seguridad a raíz del sismo de 1985 en México.

En dicha investigación se describe el proceso del experimento, así como resultados que incluyen las curvas de histéresis de cada dispositivo. En esta se observa en buen funcionamiento de dichos elementos para disipar energía sísmica, pero solicita desarrollar metodologías para determinar la cantidad y localización de estos elementos en el diseño de la estructura. (Aguirre & Sánchez, 1990).



- En 2001 la Universidad Nacional de San Juan, Argentina, realizó investigaciones en disipadores de energía sísmica histeréticos tipos ADAS con el objetivo de validar su aplicación en la zona sísmica de Argentina. Se ensayaron los dispositivos en el laboratorio de estructuras del Instituto de Investigaciones Antisísmicas, aplicándole ciclos de carga, por medio de un actuador hidráulico. Los resultados obtenidos fueron curvas de histeréisis con las que se realizaron conclusiones tales como la viabilidad de construir y ensayar amortiguadores de fluencia de metales para ser aplicados a estructuras de edificios en la zona sísmica argentina por su capacidad para disminuir desplazamientos y poder adecuar estructuras a la normativa del país.

El reporte de dicha investigación fue publicado por los investigadores: Zabala, F, et al.

- En 2003. la universidad de California en San Diego presentó un estudio experimental de disipadores de energía sísmica denominados Contraventeos restringidos al pandeo (Merrit, S, et al, 2003). El reporte de la investigación lleva por nombre *Subassemblage testing of corebrace buckling -restrained braces* y detalla el proceso experimental y resultados obtenidos de seis especímenes de CRP ensayados ante carga cíclica. Los resultados muestran un comportamiento muy estable de los dispositivos y gran capacidad de disipación.

- En 2009, la Universidad Autónoma Metropolitana, hizo un estudio experimental sobre contraventeos restringidos al pandeo, realizado en el laboratorio de estructuras de la misma universidad. Este estudio tiene por título “Estudio Experimental de Contravientos Restringidos Contra Pandeo: Desarrollo Conceptual y Detalles de Implementación” (Arrollo, et al, 2009). Los resultados muestran también una gran capacidad de disipación sísmica de los CRP.

- En 2017, el Instituto de ingeniería de la UNAM, realizó una prueba experimental de contraventeos restringidos al pandeo, instalados en un edificio a escala 1 a 3. Este experimento fue realizado en la mesa vibradora de la UNAM y publica un reporte que tiene como título: “Pruebas experimentales en mesa vibradora de dos

modelos prefabricados de concreto reforzado (modelo con contraventeos)". Elaborado por Escobar y otros investigadores. Los resultados demuestran que los disipadores permitieron reducir la demanda de desplazamientos del modelo a la mitad y mejoraron el comportamiento sísmico de la estructura sustancialmente.

## **2.2. Sistemas de disipación de energía sísmica**

Como ya se ha mencionado, existen varios sistemas para disminuir los daños causados por los movimientos sísmicos en las estructuras. Estos sistemas se pueden dividir en dos tipos; los sistemas de aislamiento sísmico y los sistemas de disipación de energía sísmica.

Esta tesis presenta un resumen breve de los primeros. Se menciona su funcionamiento general como un ejemplo de sistemas de protección sísmica. Después el enfoque se centra en los segundos.

Los sistemas de aislamiento consisten en aislar a la estructura del suelo. Esto se logra colocando dispositivos (rodillos, dispositivos flexibles) entre el suelo y la edificación, con la finalidad de que la energía provocada por la aceleración del suelo no provoque el mismo daño a que si la estructura estuviese apoyada en el suelo directamente. La forma en que se logra la mitigación de daños es aumentando el periodo de la estructura, haciendo que sea muy distinto al periodo de vibración del suelo (Oviedo, 2006). Esto evita que se genere resonancia, ya que esto aumenta las fuerzas en los entrepisos provocando grandes daños en los elementos estructurales, pudiendo provocar colapso.

El segundo sistema mencionado son los disipadores de energía sísmica, dentro de los cuales se clasifica el sistema ensayado experimentalmente descrito en este trabajo. Estos sistemas funcionan absorbiendo o disipando parte de la energía impuesta por fuerzas a la que están sometidas las estructuras durante un sismo.

Al ocurrir un sismo, una estructura recibe la energía y la absorbe siguiendo la mecánica newtoniana (Oviedo, et al, 2006), por lo cual es posible generar una ecuación de movimiento y con ella un balance de energía.

El balance de energía propuesto se puede expresar como la energía de entrada, dada por el sismo y la energía recibida por el sismo. Oviedo y Duque (2006) proponen una ecuación de energía derivada de un modelo matemático de un sistema estructural de un grado de libertad al cual se le realiza un análisis dinámico (Figura 2.1) De este análisis resulta la ecuación 1:

$$E_k + E_D + E_{SS} + E_{SP} = E_I \quad (1)$$

Donde:

$E_k$  Es la energía cinética de la masa, representada por el movimiento de la estructura.

$E_D$  Es la energía disipada por el amortiguamiento natural de la estructura.

$E_{SS}$  Es la energía de deformación disipada en el rango elástico de la estructura.

$E_{SP}$  Es la energía disipada por efectos histéricos de la deformación plástica y daños de los elementos estructurales.

$E_I$  Es la energía generada por las cargas dinámicas externas.

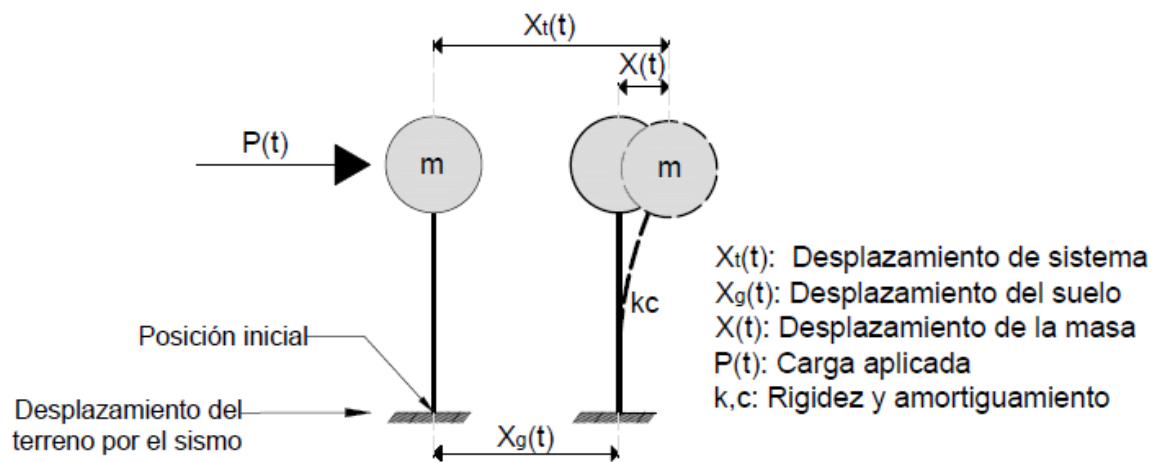


Figura 2.1 Modelo estructural de un grado de libertad (Oviedo, et al, 2006)

Con base al balance de energía, los sistemas de protección sísmica buscan que aumente la disipación de energía, pero disminuyendo los daños. Esto lo logran canalizando esta energía a dispositivos que aprovechan la histéresis propia de sus materiales, para disipar la energía, sin comprometer a los elementos estructurales de las edificaciones (Pimiento et al, 2014)

Existen varios tipos de disipadores sísmicos, los cuales se describen a continuación.

### **2.3 Tipos de disipadores de energía sísmica**

Los disipadores de energía sísmica se pueden clasificar como pasivos, semiactivos y activos (Christopoulos, et al, 2006), siendo los pasivos los más confiables y más utilizados actualmente.

Los disipadores de energía sísmica se encargan de modificar la rigidez lateral del edificio, absorbiendo la energía histerética que tomarían las conexiones viga-columna de las estructuras (Jara,1994) y transformando está en calor. Se colocan generalmente en contraventeos, sin embargo, su colocación esta premeditada a un análisis dinámico de la estructura.

Algunos autores como Oviedo y Duque (2006) y Symans (2008) coinciden en que los sistemas de control pasivo de disipación de energía, también llamados disipadores o amortiguadores, pueden ser clasificados en (Lama, et al, 2013):

- Metálicos (acero, plomo, entre otros)
- De fricción
- De fluidos viscosos
- Viscoelásticos

Los disipadores metálicos disipan energía a través del comportamiento histerético de los metales cuando se llegan a deformar en el rango inelástico, ya sea debido a esfuerzos de flexión, cortante, torsión o axial. Estos disipan energía transformándola

en calor y deformaciones (Lama et al, 2013). Estos disipadores se verán a detalle en el siguiente capítulo.

Otro tipo son los disipadores friccionantes, estos trabajan tal como su nombre lo indica, por fricción; que es generada por el rozamiento entre dos superficies en contacto. La fuerza de fricción en cada conexión es igual al producto de la fuerza normal por el coeficiente de rozamiento, disipando de esta manera la energía entregada a través de calor y generando curvas histéresis rectangulares. La energía disipada por ciclo es máxima para un determinado valor de la fuerza de deslizamiento (Villarreal y Oviedo, 2008).

Villarreal y Oviedo (2008) indican que:

“El mayor inconveniente que presentan estos dispositivos disipadores es que el coeficiente de fricción, durante el desplazamiento, depende de la velocidad, de la presión normal y de las condiciones de las superficies en contacto. Consecuentemente, resulta difícil garantizar un coeficiente de fricción independiente del tiempo y de las condiciones de los disipadores. Sin embargo, se ha observado que la variación del coeficiente de fricción durante el desplazamiento no afecta significativamente a la respuesta estructural si la estructura permanece en rango lineal, mientras que esta influencia puede ser significativa si esta entra en rango no lineal. “

Por otra parte, los disipadores de fluidos viscosos se basan en la respuesta elástica de un líquido viscoso. Uno de los disipadores de fluidos viscosos de mayor uso es el dispositivo compuesto por un pistón inmerso en un fluido viscoelástico. Al generarse un desplazamiento interno del pistón, el fluido es forzado a pasar por un grupo de pequeños orificios, lo que da como resultado disipación de energía (Oviedo y Duque, 2006).

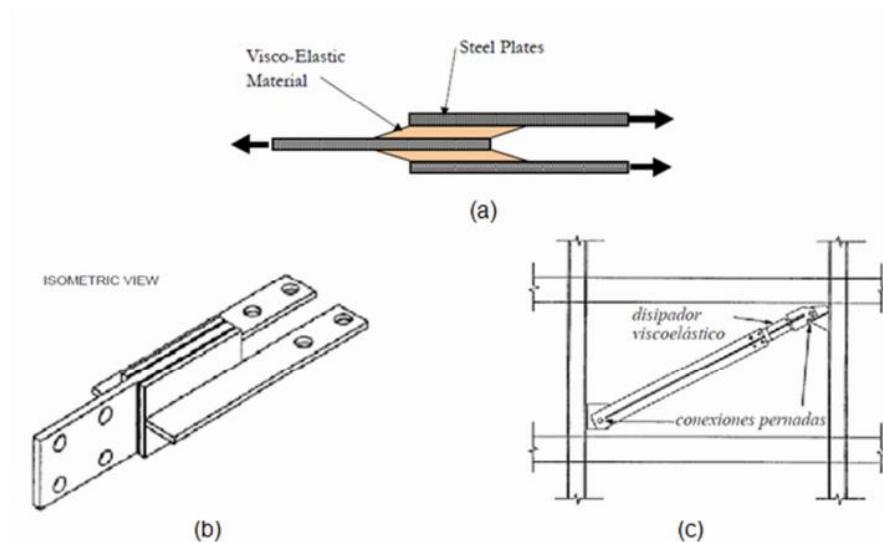
Un disipador de fluido viscoso es un dispositivo que disipa energía aplicando una fuerza resistente a un desplazamiento finito. La fuerza de salida del disipador actúa en la dirección opuesta al movimiento de entrada. El esfuerzo depende de la

velocidad con la que se genera la deformación del disipador durante los ciclos de carga y la energía disipada depende de la viscosidad del fluido.

Los disipadores viscoelásticos son formados generalmente con polímeros sólidos que disipan energía por deformación al corte. Estos disipadores aumentan considerablemente la capacidad de la estructura para disipar energía, pero tienen poca influencia en el periodo natural de vibración de la estructura, se reduce solamente entre 10% y 20% (Chopra, 2001; Oviedo, R., 2006).

Los disipadores viscoelásticos generalmente consisten en placas de acero unidas con capas de material viscoelástico (VE) en una configuración tipo sándwich como se observa en *Figura 2.2*. Los disipadores VE presentan curvas de histéresis casi elípticas. La energía es disipada por el desplazamiento relativo entre las placas metálicas exteriores y la placa metálica central del disipador

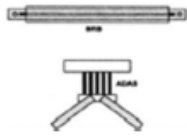



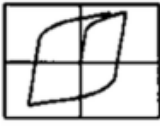
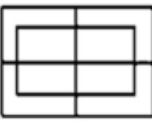
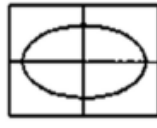
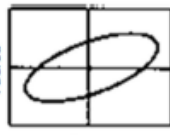
Los materiales viscoelásticos son materiales cuyas características mecánicas dependen de la temperatura que se genere durante la disipación de energía, de la amplitud de tensión y deformación consecuente y de la frecuencia de vibración. (Oviedo y Duque, 2006)



*Figura 2.2 Componentes disipador viscoelástico ; (b) Vista isométrica del disipador viscoelástico; (c) Instalación típica del disipador viscoelástico (Lama, et al, 2013)*

La tabla 2.1 muestra algunos tipos de disipadores. Se incluyen metálicos, friccionantes, viscosos y viscoelásticos ; así como sus ventajas y desventajas.

Tabla 2.1 Tipos de Disipadores Pasivos de energía (Lama et al, 2013)

TIPOS DE DISIPADORES PASIVOS DE ENERGÍA				
	METÁLICOS	FRICCIONANTES	DE FLUIDOS VISCOSOS	VISCOELÁSTICOS
Modelo Básico				
Comportamiento histerético idealizado	 Desplazamiento	 Desplazamiento	 Desplazamiento	 Desplazamiento
Ventajas	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Insensibles a la temperatura ambiente.</li> <li>- Confiables a largo plazo.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Energía disipada por ciclo es elevada.</li> <li>- Insensibles a la temperatura ambiente.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Se activan a desplazamientos pequeños.</li> <li>- Mínima fuerza de restauración necesaria</li> <li>- Propiedades independientes generalmente de la frecuencia y temperatura ambiente.</li> <li>- Modelamiento del disipador es simplificado, si se considera amortiguamiento lineal</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Se activan a desplazamientos pequeños.</li> <li>- Proporciona fuerzas de restauración.</li> <li>- Comportamiento lineal, que lleva a un modelamiento simplificado del disipador</li> </ul>
Desventajas	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Daños en los dispositivos luego de un sismo. Pueden necesitar reemplazo.</li> <li>- Comportamiento no lineal, requiere análisis no lineal.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Coeficiente de fricción puede cambiar con el tiempo.</li> <li>- Comportamiento no lineal, requiere análisis no lineal.</li> <li>- Deformaciones permanentes si no se proporciona mecanismos de fuerza de restauración.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Posible fugas de líquido viscoso.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Capacidad de deformación limitada.</li> <li>- Propiedades dependientes de la frecuencia y temperatura ambiente.</li> <li>- Posible desprendimiento del material VE (problema de confiabilidad).</li> </ul>

## 2.4 Disipadores histeréticos.

Esta tesis se enfoca en pruebas experimentales de disipadores histeréticos. Como se mencionó brevemente en el capítulo anterior, los disipadores histeréticos se basan en la plasticidad del acero para disipar su energía, aumentando el amortiguamiento histerético de las estructuras. Algunos de los disipadores histeréticos más importantes, se mencionan a continuación

- Tipo ADAS (Added Damping and Stiffness). Es un disipador de placas en paralelo que se plastifican a flexión (*Figura 2.4*). Las placas se encuentran empernadas en ambos extremos impidiendo la rotación, de forma que un desplazamiento relativo entre estos en dirección perpendicular al plano de la placa produce una distribución de momentos flectores lineales, simétricos y con doble curvatura. Una curva de histéresis típica de disipadores ADAS se muestra en la figura 2.3.
- Tipo TADAS (Triangular Added Damping and Stiffness), está formado también por placas en paralelo con la diferencia que un extremo de las placas esta empotrado y el otro articulado, de tal manera que, con un desplazamiento relativo entre extremos de la placa perpendicular a su plano, se consigue la plastificación por flexión por curvatura simple (*Figura 2.5*).
- Amortiguador Honeycomb. (*Figura 2.6*) Es un disipador en forma de panal hecho de acero, formado por una placa con aberturas en forma de rejilla en el centro del mismo. Tiene un desempeño en una sola dirección. La geometría de este disipador está diseñada para tener una gran rigidez y gran disipación histerética induciendo una deformación plástica homogénea en todo el elemento. Este dispositivo disipa energía, a través de su plastificación utilizando la deformación entre miembros estructurales.



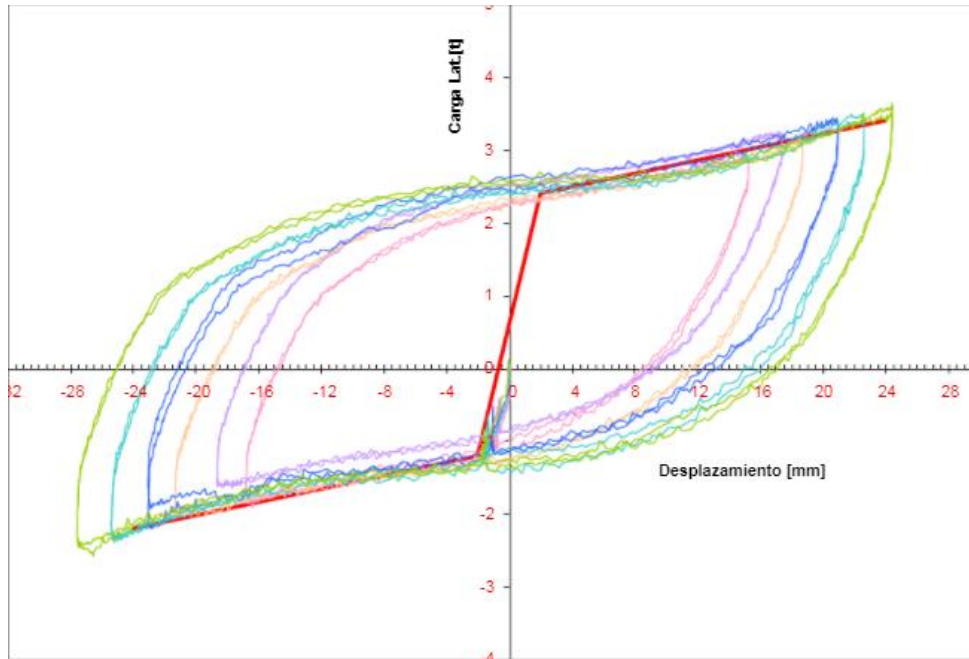


Figura 2.3 Diagrama de histéresis de un ensayo disipador metálico tipo ADAS (Zabala, et al, 2001)

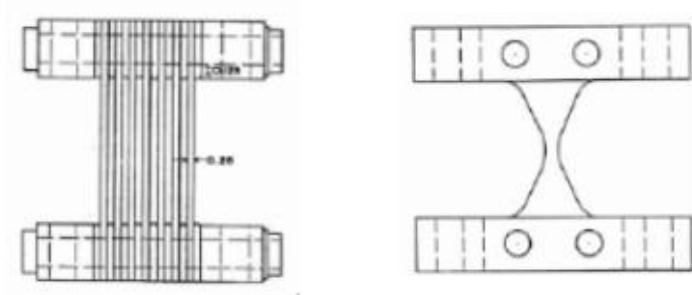
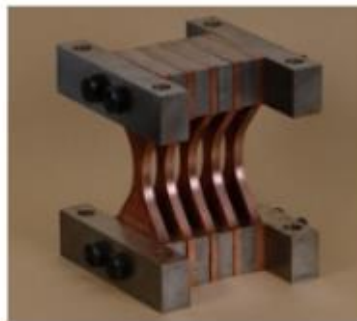


Figura 2.4 Disipador tipo ADAS (Oviedo 2006)

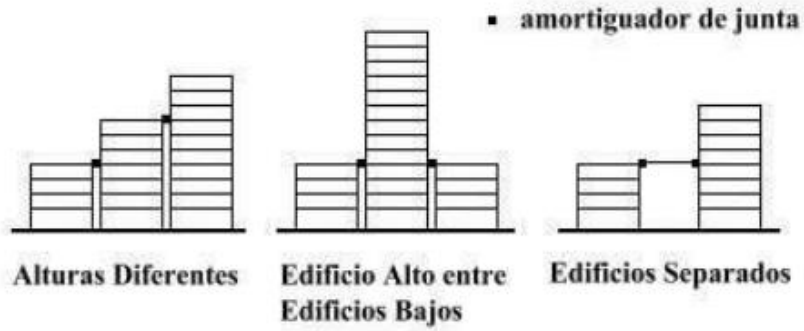


*Figura 2.5 Disipador tipo TADAS (Oviedo, 2006)*

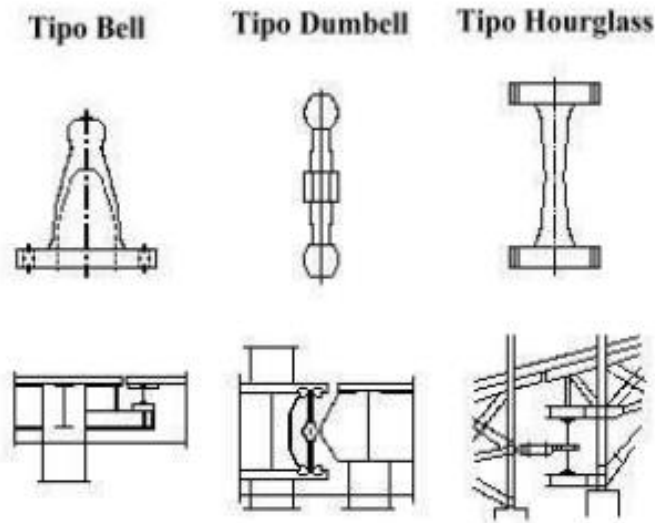


*Figura 2.6 Disipador tipo Honeycomb (Gatica, 2012)*

- Disipadores de junta. Estos disipadores se utilizan en las conexiones de dos estructuras que deben estar separadas (Figura 2.7). La mayor parte de los reglamentos del mundo piden separación mínima entre estructuras adyacentes. Para colaborar con las conexiones estos elementos disminuyen los desplazamientos relativos entre las estructuras conectadas (Gatica, 2012). Los amortiguadores más usados se muestran en la figura 2.7.



a) Posiciones de disipadores de junta

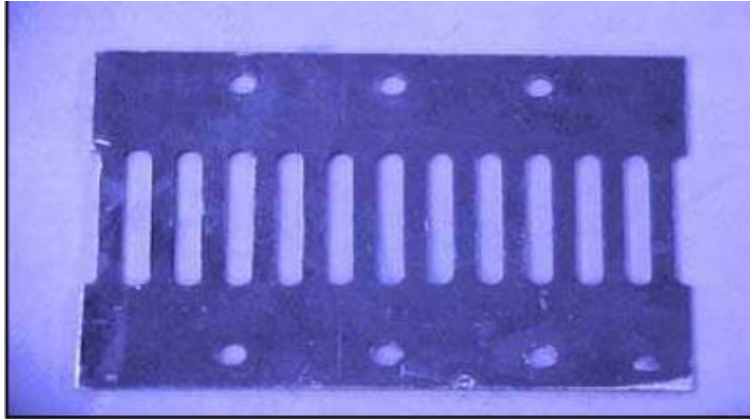


b) Tipos de disipadores de junta

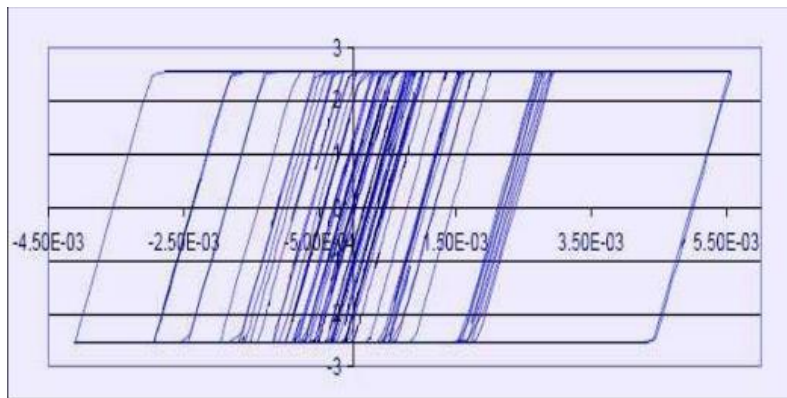
Figura 2.7 Posición y tipos de disipadores de junta (Gatica, 2012)

- Dispositivos de placa ranurada. Estos dispositivos son placas de espesor constante que reciben carga cortante en dirección paralela a su plano (Figura 2.8). Dependen de los desplazamientos relativos entre los elementos estructurales, por lo cual se deben instalar en sitios donde se garantice una magnitud suficiente de éstos y así lograr su funcionamiento.

Este sistema tiene un comportamiento histerético estable frente a los múltiples ciclos carga y descarga. (Figura 2.8)



a) Placa ranurada



b) Curvas de histéresis de placa ranurada

*Figura 2.8 Ejemplo de disipador de placa ranurada y curva de histéresis (Gatica,2012)*

Otra clase de disipador histerético la forman las contraventeos metálicos. Estos están constituidos por un elemento que proporciona rigidez lateral, que contiene un núcleo de acero que funciona como elemento disipador. Este está restringido lateralmente al pandeo por medio de un material de confinamiento, como lo es el concreto, y un tubo metálico que lo envuelve.

El núcleo de acero soporta las fuerzas transmitidas axialmente, dándose la disipación de energía por fluencia, al verse sometido ya sea a efectos de flexión, cortante o deformación axial, dependiendo de la forma geométrica de la riostra y de su instalación en marcos (Jara, 1994).

En estos disipadores el núcleo de acero se aísla del elemento confinante, es decir, que se busca que no haya contacto directo entre ambos materiales. Esto con la

finalidad de evitar que la resistencia a compresión de la barra aumente en relación con su resistencia a tensión. En los extremos tiene placas de conexión para unirse con la estructura principal de la edificación. (Figura 2.9)

Las pruebas realizadas a los CRP de manera aislada han mostrado gran capacidad de disipación de energía, presentan ciclos de histéresis simétricos estables, una resistencia a la tensión y compresión similares, lo que lo cataloga como un buen disipador de energía. (Arrollo, et al, 2009).

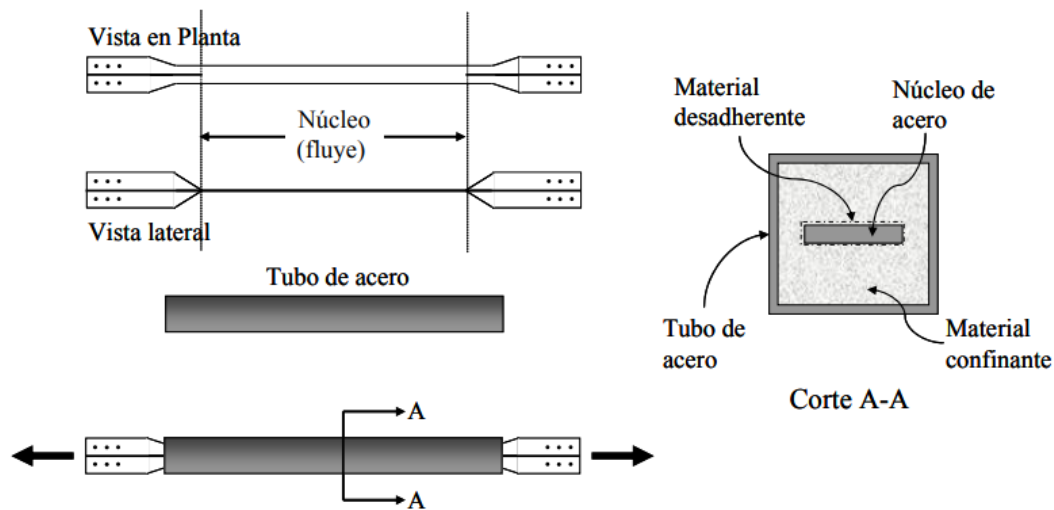


Figura 2.9 Configuración esquemática de un contraenteo restringido al pandeo (Arrollo et al, 2009)

### 3. Configuración del experimento

#### 3.1 Marco y muro de concreto reforzado

Para el experimento se construyó un marco de concreto reforzado, formado por tres piezas prefabricadas (dos columnas y una trabe que se muestran en las figuras 3.1 y 3.2. Posteriormente, las piezas fueron ensambladas en la losa de reacción del laboratorio de estructuras del instituto de ingeniería de la UNAM (II-UNAM) como se muestra en la figura 3.5.

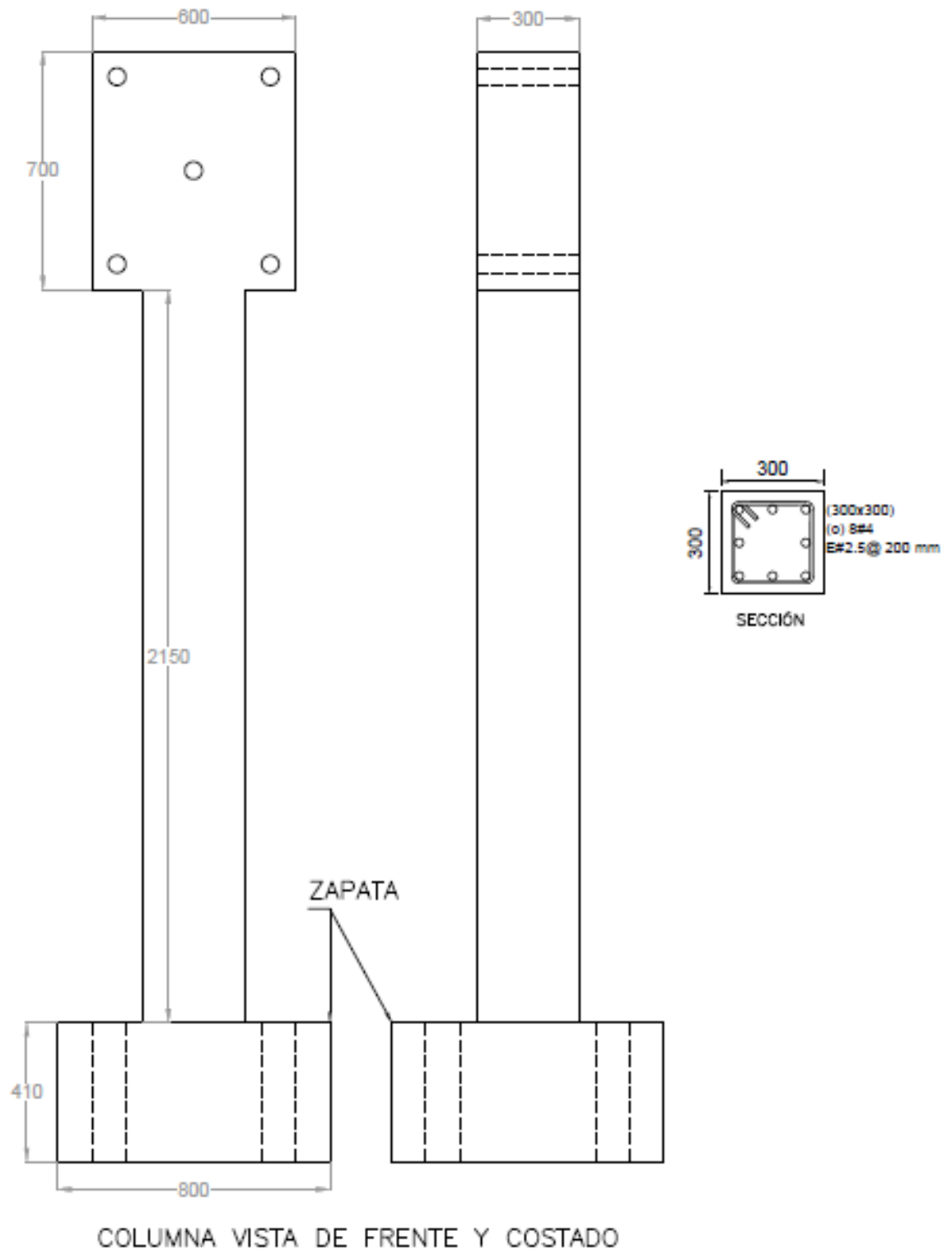


Figura 3.1 Dimensiones de columna

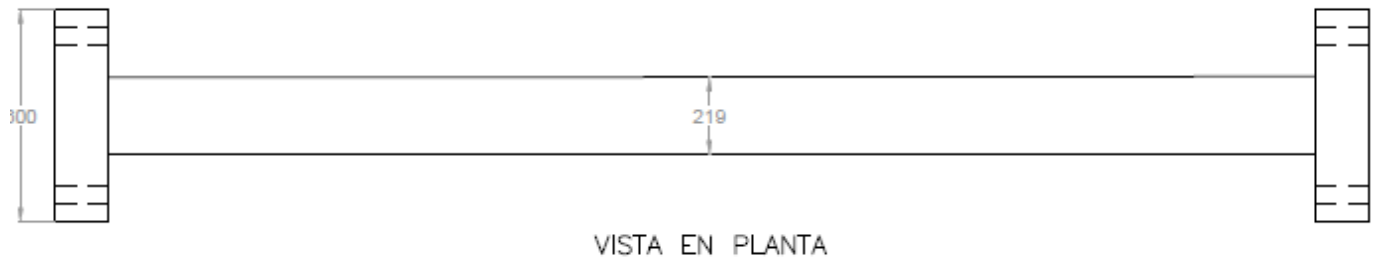
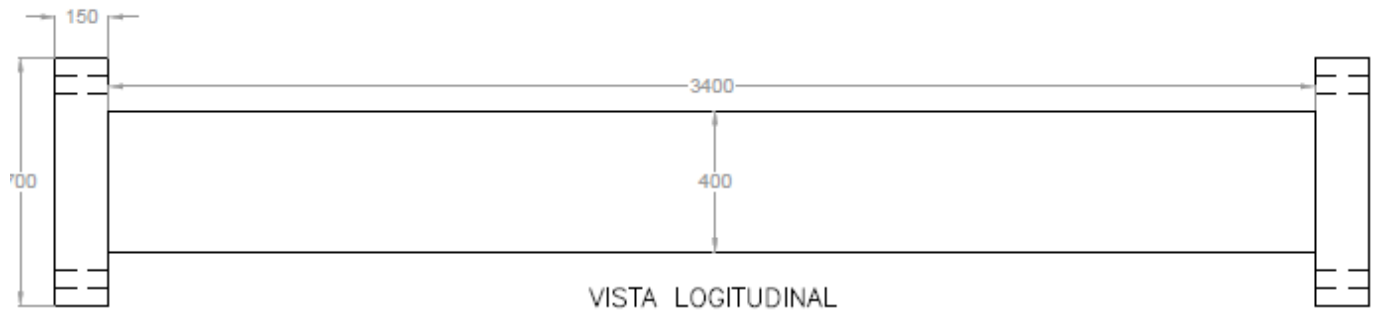
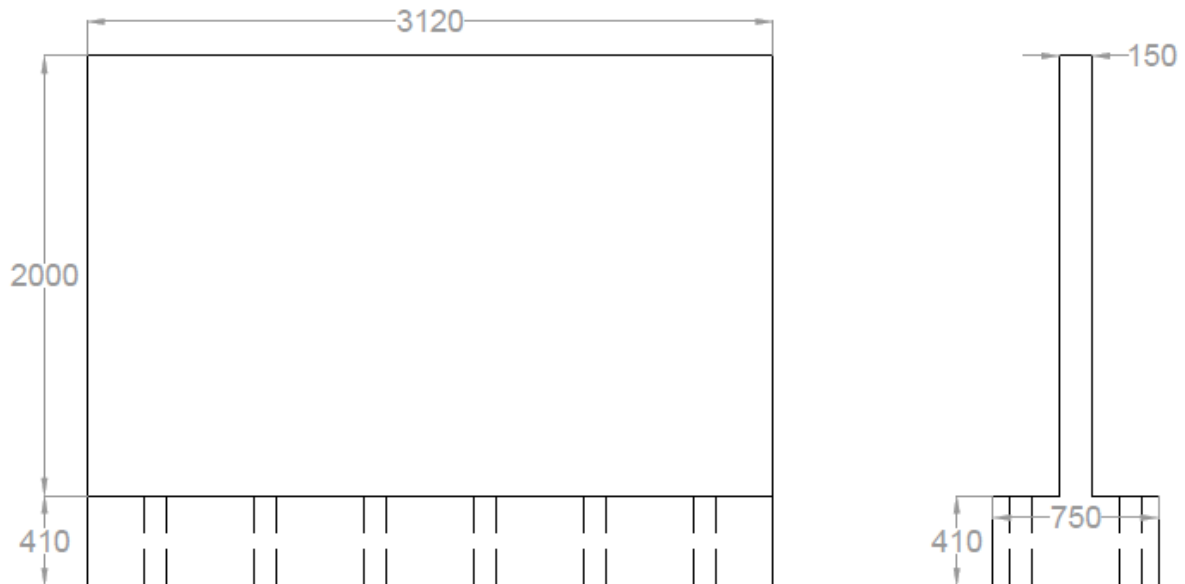


Figura 3.2 Dimensiones de trabe en milímetros

Por otro lado, también se construyó un muro de concreto reforzado con las dimensiones mostradas en la *figura 3.3*. La ubicación de este muro también se muestra en la *figura 3.5*.



*Figura 3.3 Dimensiones del muro en milímetros*

La construcción del espécimen experimental se realizó en el Instituto de Ingeniería de la UNAM, en el laboratorio de estructuras y materiales. En la *figura 3.4*, se puede observar parte del proceso constructivo de los elementos estructurales del experimento. El marco se montó en la losa de reacción del laboratorio junto con el muro, verificando su perpendicularidad con el desplante. Ambos se anclaron a la losa de reacción por medio de barras tensadas a 20 toneladas cada una. El muro quedó dentro del marco, pero sin estar conectados. La configuración se muestra en la *figura 3.5*





a) Cimbrado de columnas



b) Armado de muro



c) Armado de zapara de muro



c) Armado y cimbrado de zapata de columna

*Figura 3.4 Proceso constructivo de elementos estructurales del experimento*

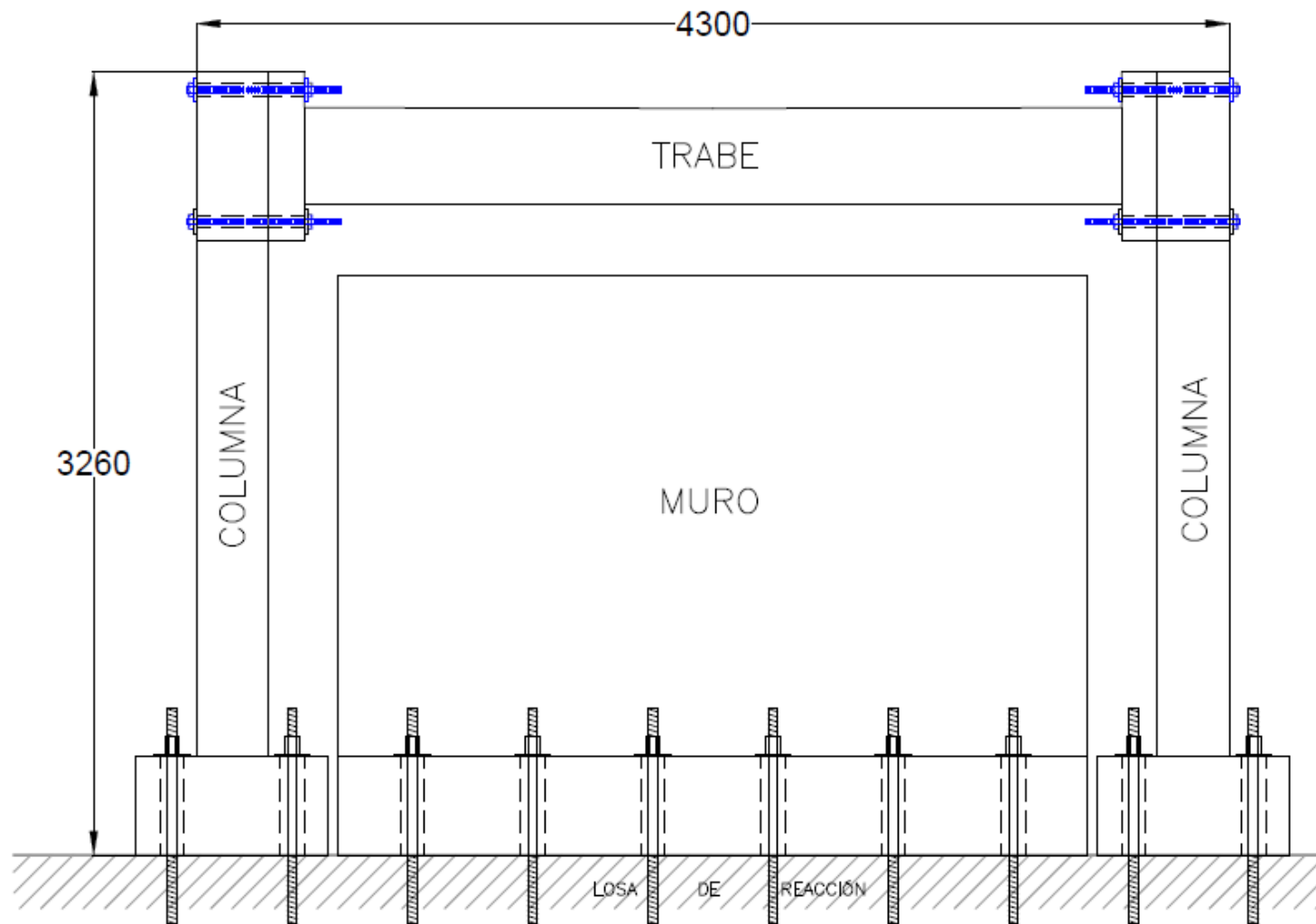


Figura 3.5 Configuración marco-muro con dimensiones en milímetros.



*Figura 3.6 Montaje del arreglo marco-muro*

### **3.2 Disipador de energía sísmica**

Para la prueba se utilizaron dos tipos de disipadores histeréticos metálicos “SLB” comercializados por la empresa Luis Bozzo Estructuras y Proyectos S.L. con distintas capacidades, los cuales se nombrarán tipo 1 para el de menor capacidad y tipo 2 para el otro.

El disipador de energía tiene una forma transversal similar a un perfil tipo “I” con rigidizadores transversales. Para el disipador tipo 1 el peralte de la placa del núcleo es de 80 mm con una altura de 177 mm. El segundo disipador de tipo 2, tiene un peralte de 150 mm con la misma altura que el primero. Ambos disipadores están hechos de acero estructural tipo ASTM A36, con una resistencia nominal  $f_y = 250 \text{ N/mm}^2$ .

La capacidad de los dispositivos está dada por su geometría y fueron calculadas por el II-UNAM. De acuerdo con el reporte del ensayo (II-UNAM, 2017) las capacidades de cada dispositivo fueron calculadas de dos maneras distintas.

Se utilizó la ecuación clásica de cortante resistente  $V_y$ , considerando a la placa como una viga “I”

$$V_y \approx f_y A_w \quad (2)$$

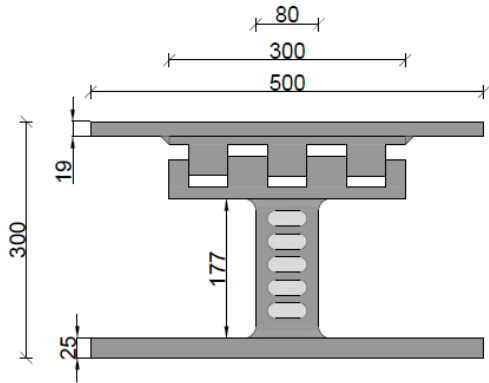
Para el cálculo de la capacidad del dispositivo tipo 1, se consideró un área de alma  $A_w$  de 80 mm x 2.5 mm, por lo tanto:

$$f_y = (250 \text{ N/mm}^2)(80 \text{ mm})(2.5 \text{ mm}) = 50000 \text{ N} = 50 \text{ kN}$$

Por otra parte, se realizó el análisis de un modelo de la placa (II-UNAM, 2017) utilizando el software Abaqus® CAE. Se le aplicó un desplazamiento lateral obteniendo la fuerza necesaria para llegar a cada nivel de desplazamiento y se observó que la resistencia a la fluencia es de  $V_y = 48 \text{ kN}$ , muy similar a la obtenida con la ecuación 2.

Para los disipadores tipo 2 se contemplan los mismos métodos, obteniendo una  $V_y$  igual a 100 kN (II-UNAM, 2017).

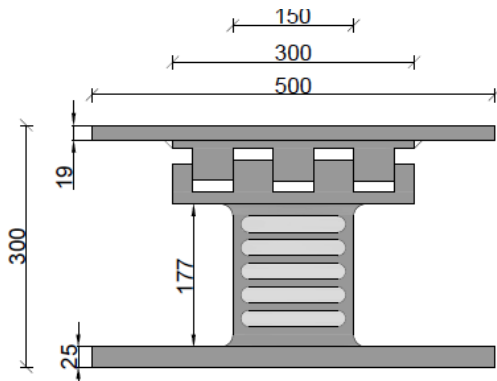
Cabe mencionar que las capacidades calculadas distan de las reportadas por el fabricante, las cuales eran de 125 kN para disipador tipo 1 y 250 kN para el tipo 2.



a) Disipador tipo 1 (Dimensiones mm)



b) Disipador tipo 1



c) Disipador tipo 2 (Dimensiones mm)



d) Disipador tipo 2

*Figura 3.7 Disipadores histeréticos con diferentes capacidades de carga.*

En total se realizaron tres pruebas: la primera con dos disipadores tipo 1, la segunda sin disipadores y la tercera con dos disipadores tipo 2. Para la ejecución

del primer experimento se realizó el montaje de los dispositivos con ángulos anclados a la parte superior del muro y a la parte inferior de la trabe, ambos realizados con tornillos de alta resistencia de 19 mm colocados de manera horizontal (Figura 3.8).

Los ángulos se conectaron a placas soldadas a los disipadores por medio de tornillos en de alta resistencia en vertical de 25 mm, tal como se muestra en la *figura 3.8*.

Para el segundo experimento se desmontaron los disipadores tipo 1 manteniendo los ángulos anclados a la estructura, y se realizó la prueba con únicamente el marco resistiendo las cargas laterales. Posteriormente se colocaron los disipadores tipo 2 de la misma manera que en la primera prueba.



*Figura 3.8 Disipador montado*

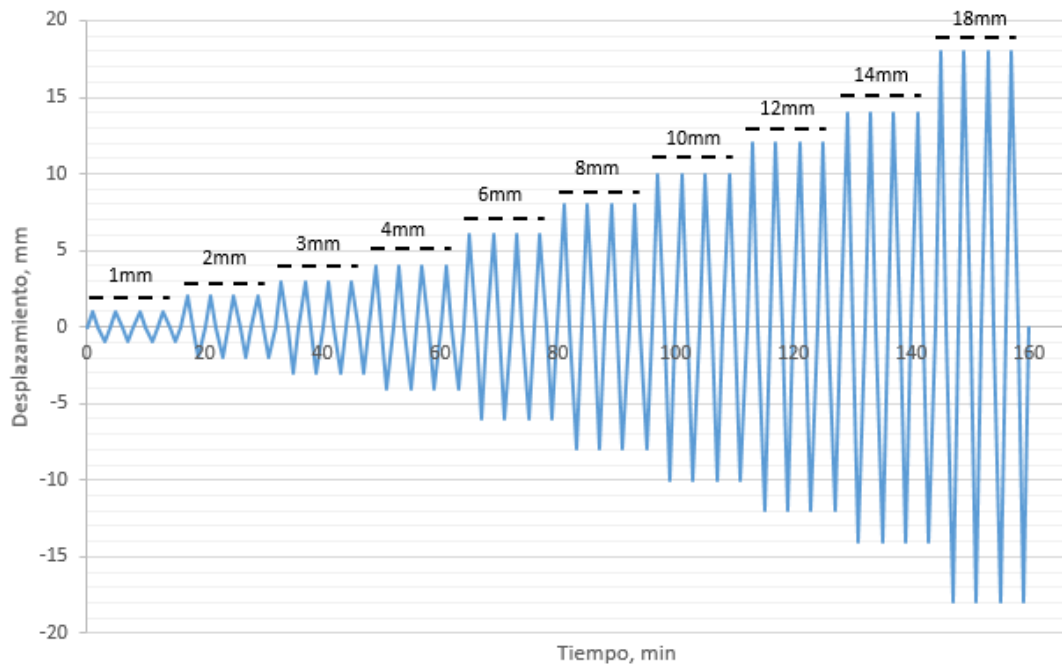
### **3.3 Protocolo de carga**

El experimento se controló por desplazamientos tomando cuatro ciclos por cada nivel de desplazamientos, se empezó por 1 mm hasta llegar a 18 mm, tal como se muestra en la *figura 3.9*. Los desplazamientos fueron aplicados de manera cuasi-estática mediante un actuador MTS de 1000 kN de capacidad y una carrera de  $\pm 180$

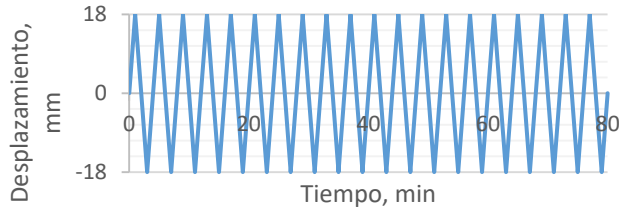


mm, conectado al muro de reacción y al marco de concreto reforzado, tal como se muestra en la *figura 3.9*

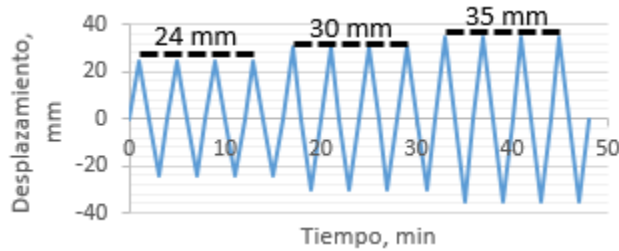
Adicional a los desplazamientos mostrados en la *figura 3.9*, se realizaron pruebas adicionales con los disipadores. Al disipador tipo 1 se aplicaron veinte ciclos a un nivel de desplazamientos de 18 mm en el actuador (*Figura 3.10*). Para los disipadores tipo 2 se realizaron pruebas adicionales llevando el espécimen a 24, 30 y 35 mm de desplazamiento (*Figura 3.10*). Ambas pruebas adicionales se realizaron con la intención de observar el nivel de desplazamientos en el que se obtenía la falla de los disipadores.



*Figura 3.9 Protocolo de desplazamientos-carga*



a) Pruebas adicionales a disipador tipo 1



b) Pruebas adicionales a disipador tipo 2

Figura 3.10 Protocolos de desplazamiento- carga en pruebas adicionales

### 3.4 Instrumentación

Para la medición de los desplazamientos se realizó una instrumentación del marco y el muro. Dicha instrumentación se realizó con transductores de desplazamiento tipo CDP de la marca Tokyo Sokki Kenkyujo con una carrera de  $\pm 25$  mm. Se colocaron ocho CDP's en la estructura, colocando el primero justo al nivel del marco en donde se aplicaron los desplazamientos con el actuador. Esto con la intención de comparar los desplazamientos del marco con los reportados por el actuador MTS. Los demás se colocaron sobre las columnas y los disipadores. El arreglo se puede observar en la *figura 3.11*.

Adicional a los CDP's se colocaron LED's a lo largo de la estructura que con la ayuda de una cámara de alta resolución del tipo Optotrak Certus HD. Con este equipo se pudo registrar el histórico de desplazamientos de los puntos en los que se colocaron LED's, en las direcciones ortogonales "x", "y" y "z". El arreglo de los LED's se puede observar en la *figura 3.12*.



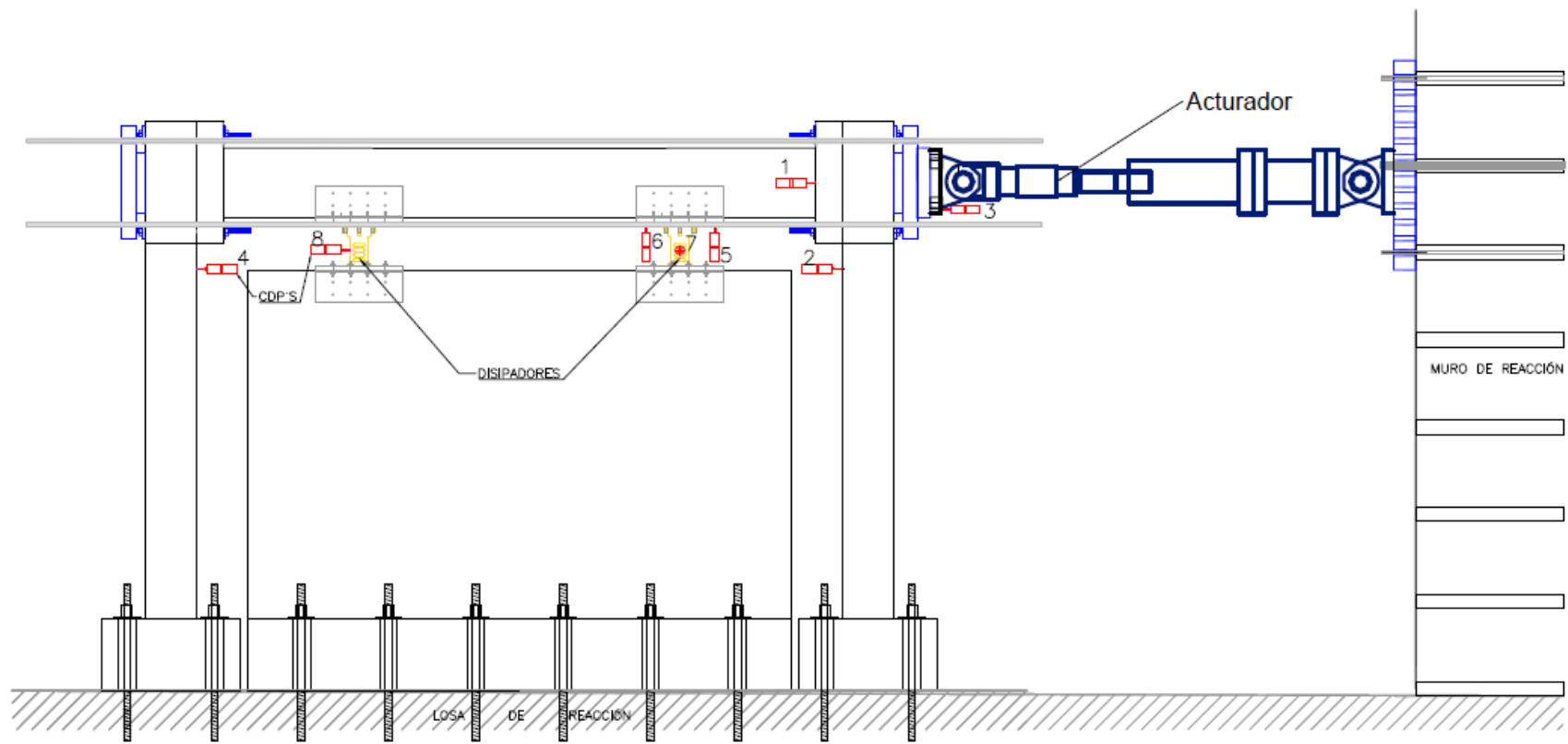


Figura 3.11 Instrumentación con CDP's

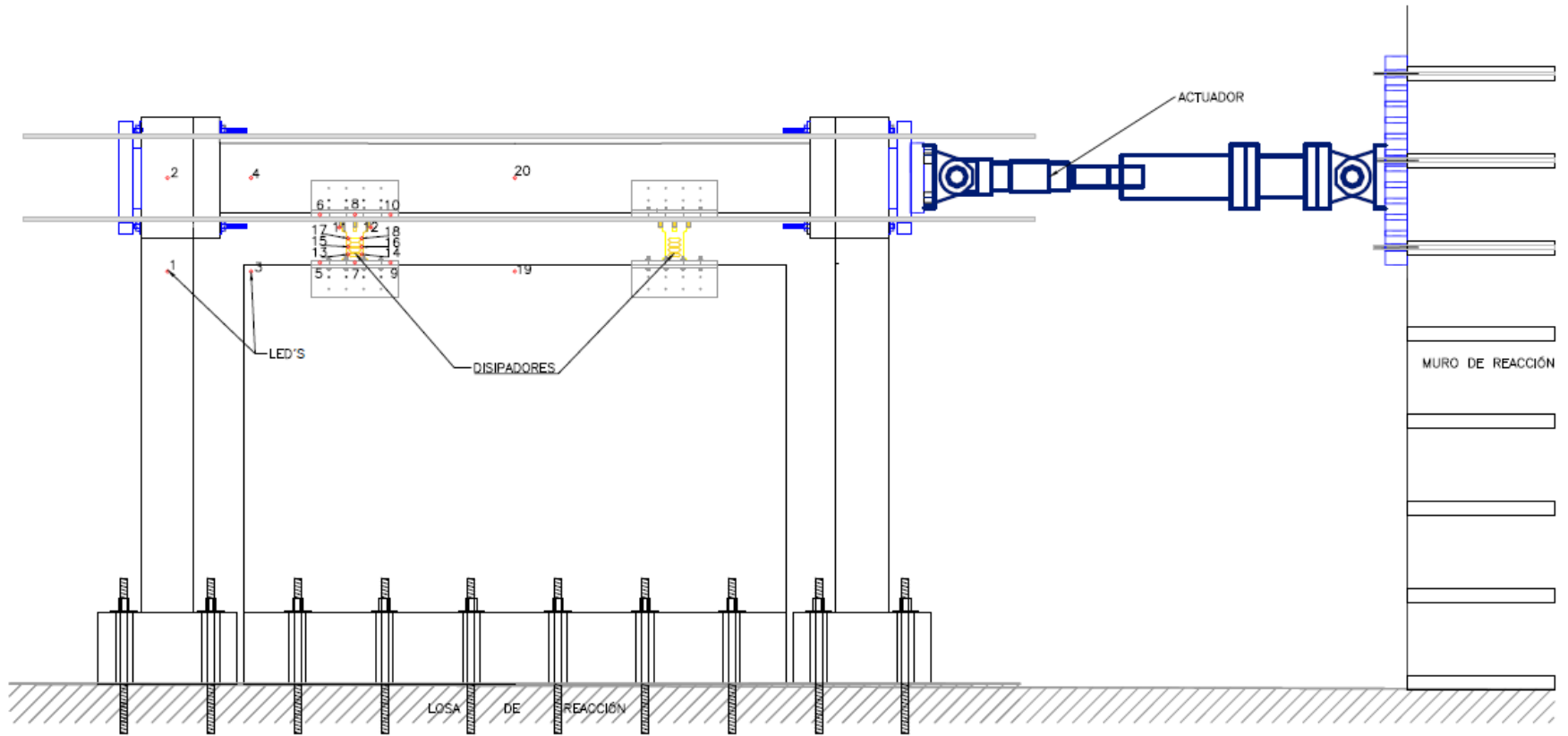


Figura 3.12 Instrumentación con LED'S

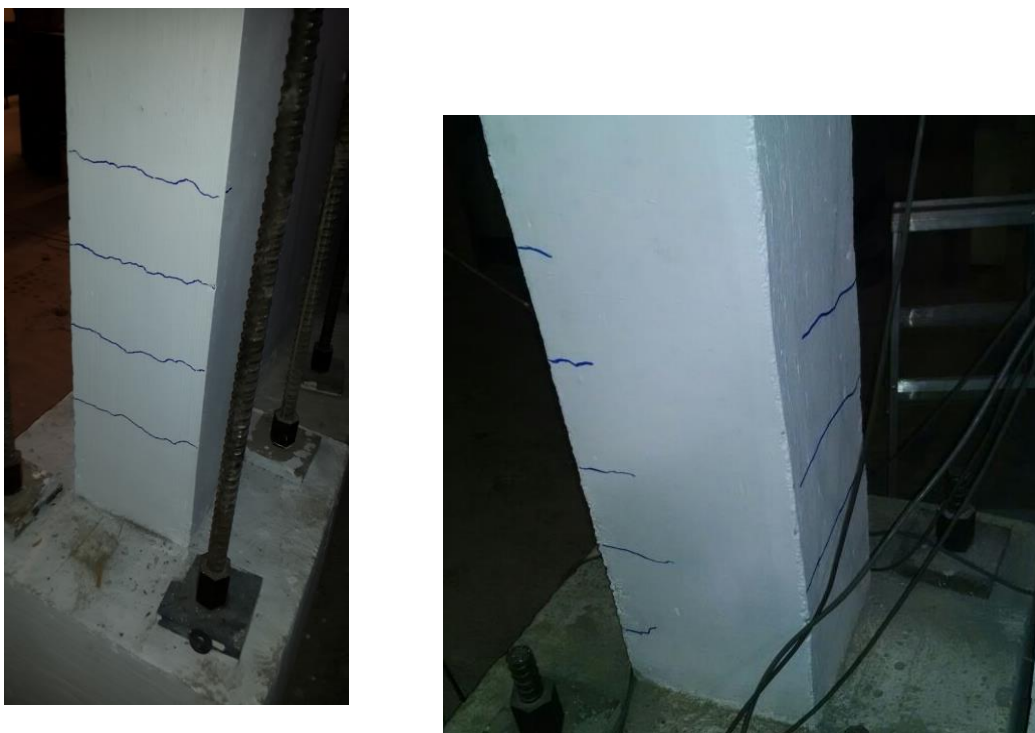
## 4. Resultados.

### 4.1 Inspección y daños visuales.

Antes de presentar el comportamiento histerético del marco y los disipadores es conveniente mencionar que, al finalizar las pruebas se realizó una inspección visual de daños tanto a los elementos estructurales como a los disipadores.

En cuanto a los elementos estructurales, se observaron daños en las columnas, representadas por grietas pequeñas (menores a 1 mm) por flexión en ambas columnas aproximadamente a cada 20 cm, lo que indica la posición de los estribos en ellas. En la *Figura 4.1* se muestran las grietas marcadas con tinta para su identificación

En la trabe no se presentaron grietas significativas visibles (*Figura 4.2*); sin embargo, en el muro se presentaron algunos daños generados durante las pruebas adicionales. Los daños del muro se ven focalizados en el apoyo de las placas de los disipadores (*figura 4.2*).

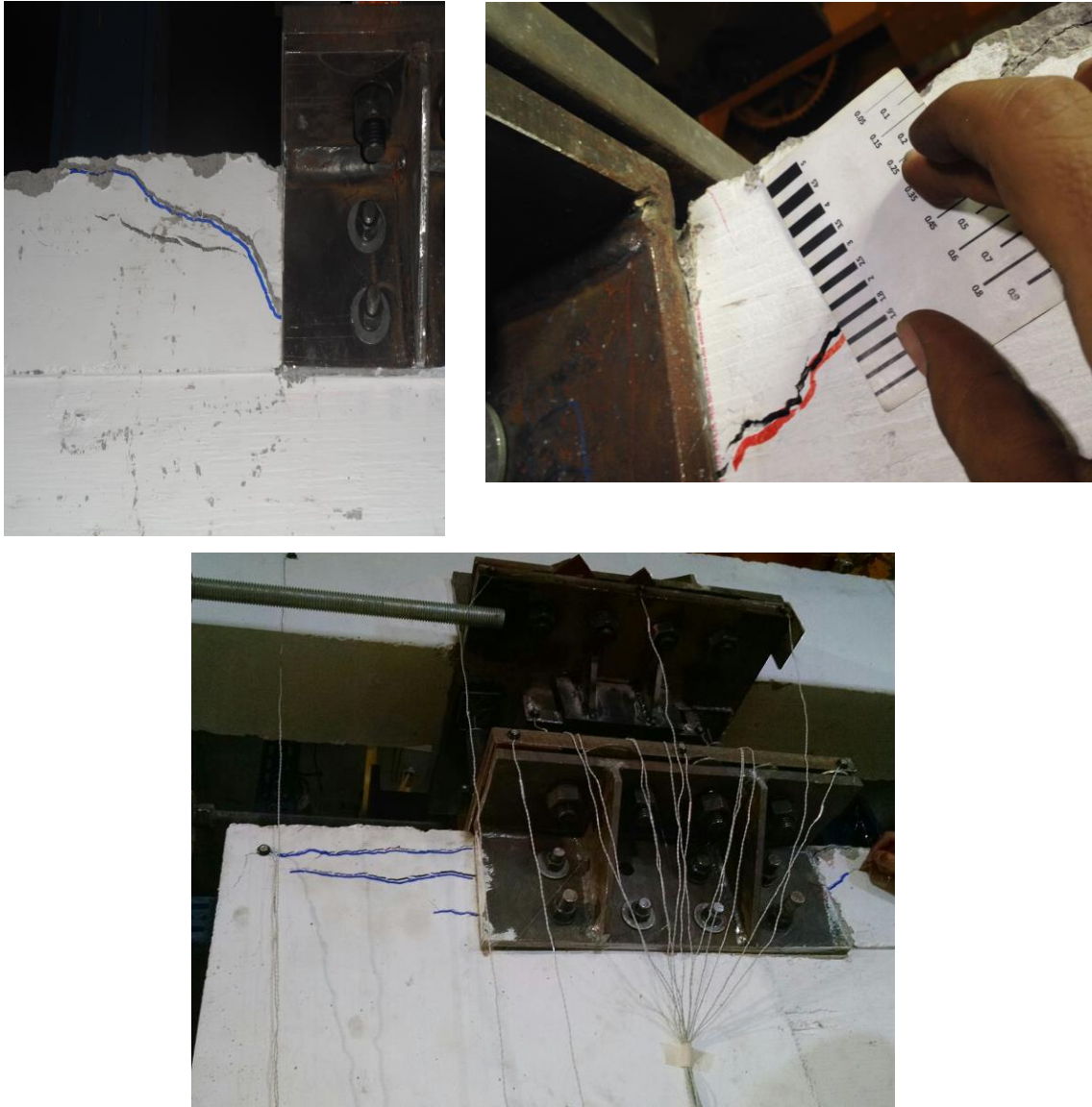


*Figura 4.1. Daños en las columnas*



*Figura 4.2 Trabe después de las pruebas (sin daños)*

Los daños en el muro se debieron principalmente a la rotación que presentaba la placa de conexión del dissipador en el momento de la aplicación de carga severa por el actuador. Dicha rotación era impedida por el mismo muro, lo cual generó que, a mayor nivel de desplazamiento, la presión de la placa sobre el muro aumentara significativamente, llegando incluso a desprender concreto de la parte superior, dejando el acero expuesto (*figura 4.3*).

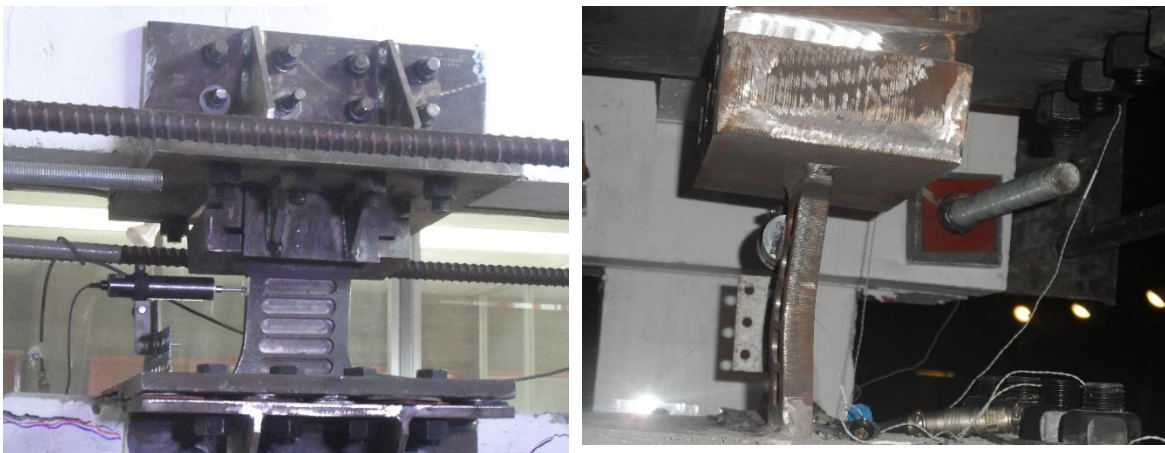


*Figura 4.3 Daños en el muro ante cargas severas*

Por otra parte se presentaron daños en los disipadores debidos a la fluencia del acero. Durante las prueba adicionales de los disipadores tipo 1, uno de ellos (el más cercano al actuador) presentó una desviación fuera del plano provocando por un pandeo pronunciado en la placa del nucleo. También los disipaodres tipo 2 tuvieron daños expresados en pandeo de las placas, esto se dió durante las pruebas adicionales. Dichos daños se presentan en la *figuras 4.4 y 4.5*



*Figura 4.4 Daños en disipadores tipo 1*

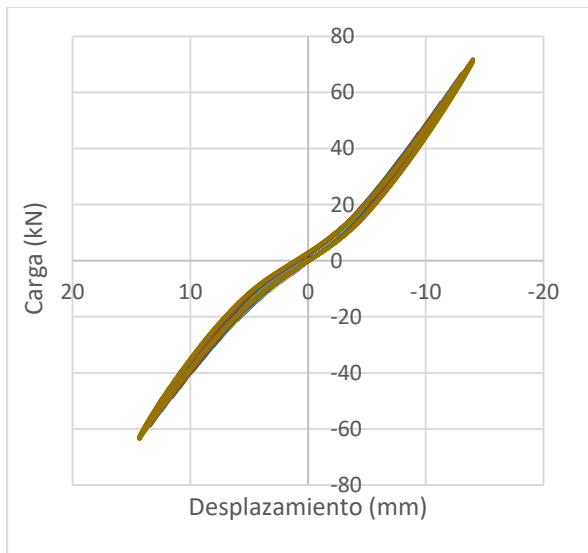


*Figura 4.5 Daños en disipadores tipo 2*

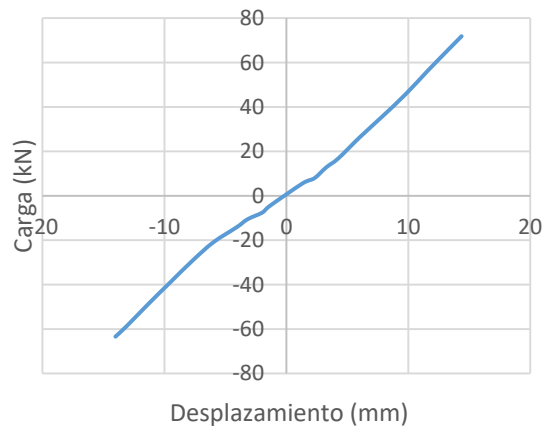
## **4.2 Curvas carga-desplazamiento**

Se obtuvieron las curvas de histéresis de cada una de las pruebas y con ellas su envolvente respectiva, las cuales se presentan a continuación.

En la prueba sin disipadores se observa un comportamiento lineal y se obtuvo una carga máxima de 7 toneladas en el nivel de desplazamiento de 15 mm. Se presentan en la *figura 4.6*.



a) Curva de histéresis por nivel de desplazamiento

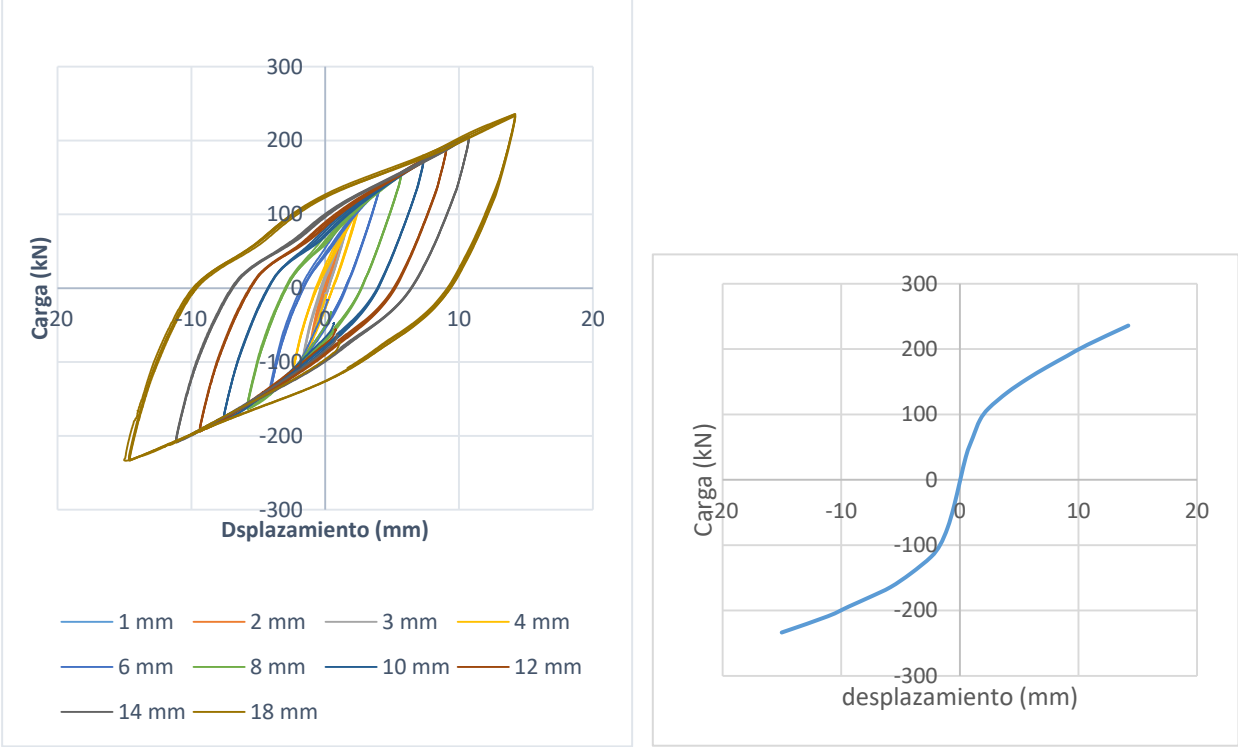


b) Envolvente

*Figura 4.6 Curvas de histéresis y envolvente de experimento sin disipadores*



Con los datos obtenidos de la prueba con disipadores tipo 1 se trazaron sus respectivas curvas (figura 4.7 y 4.8). En la curva de histéresis se puede observar que el comportamiento del marco con los disipadores fue no lineal y una carga máxima de 240 kN en el nivel de desplazamiento de 15 mm.



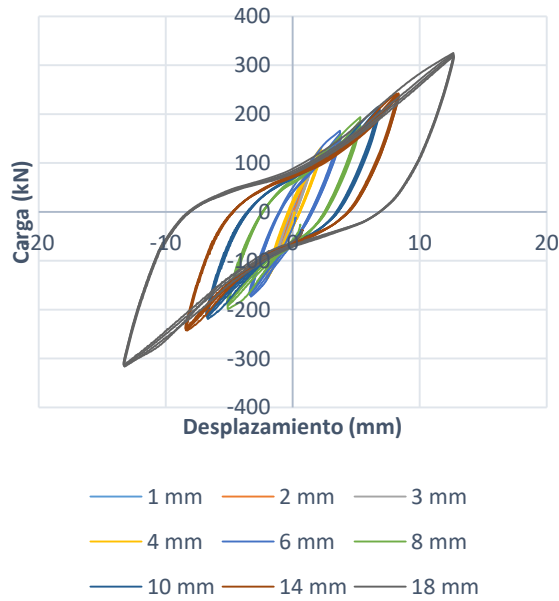
a) Curva de histéresis por nivel de desplazamiento

b) Envolvente

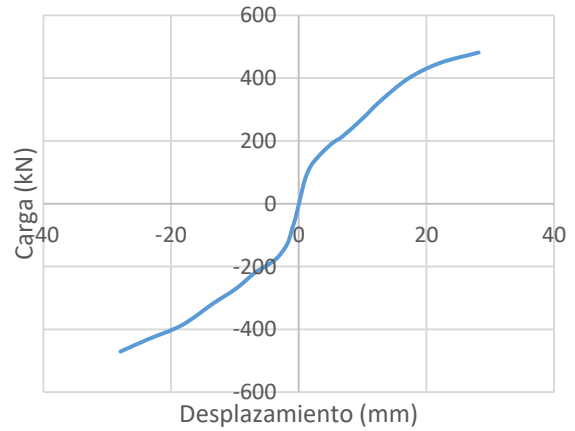
Figura 4.7 Curvas de histéresis y envolvente de prueba con disipadores tipo 1

De la misma manera, se obtuvieron las curvas de histéresis para la prueba de los disipadores tipo 2, en estas se observa que el marco tiene un comportamiento no lineal, además de que se observa un alargamiento de las curvas (Figura 4.8)





a) Curva de histéresis por nivel de desplazamiento



b) Envoltente

Figura 4.8 Curvas de histéresis y envoltente de prueba con disipadores tipo 2

### Curvas de energía disipada

Mediante la ecuación 3 se obtuvo la energía disipada de cada dispositivo.

$$U = \sum P * \Delta x \quad (3)$$

Para cada prueba se obtuvo la curva de energía disipada acumulada de la misma prueba conforme al tiempo. En ella se puede observar que la energía acumulada conforme aumenta el tiempo. Para el disipador tipo 1 la energía aumenta formando una curva ascendente, cóncava positiva (Figura 4.9).

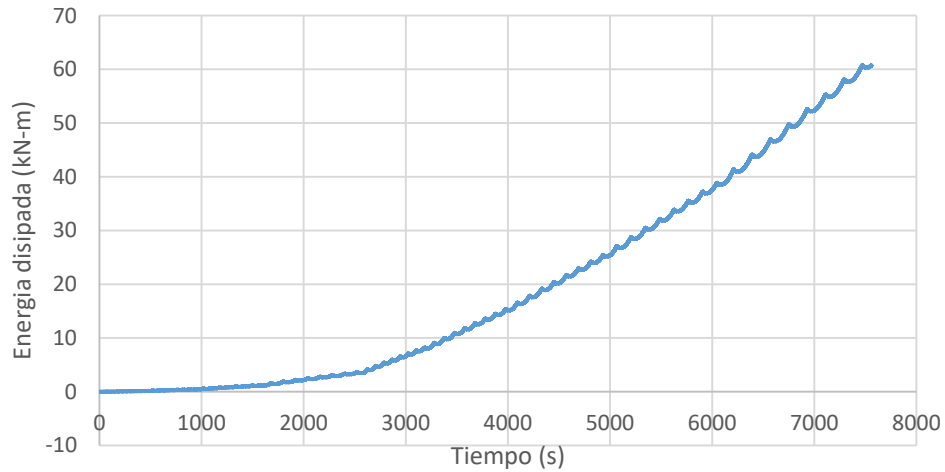


Figura 4.9 Curva de energía disipada de prueba con dispositivo tipo 1

Para los disipadores tipo 2 se obtuvo la curva de energía disipada acumulada conforme al tiempo, de la misma forma que en la prueba de disipadores tipo 1. Se observa el mismo comportamiento que con los dispositivos tipo 1, a diferencia que la pendiente de la curvatura aumento, observar *Figura 4.10*.

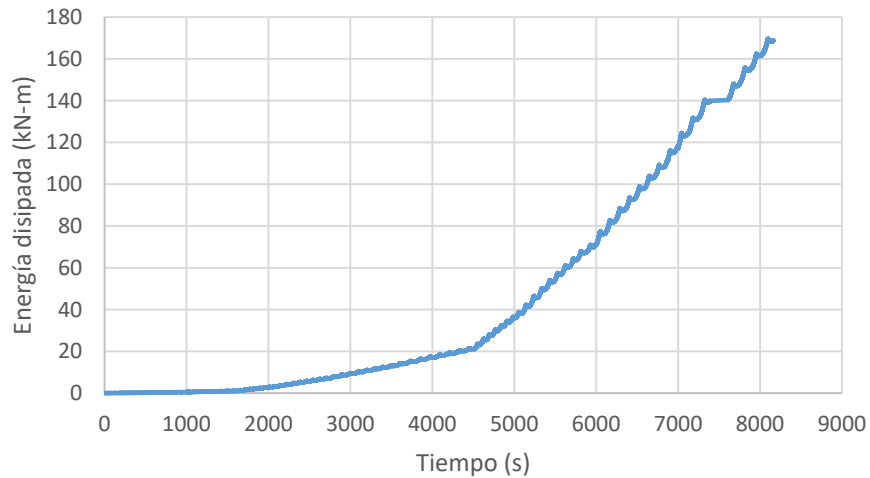
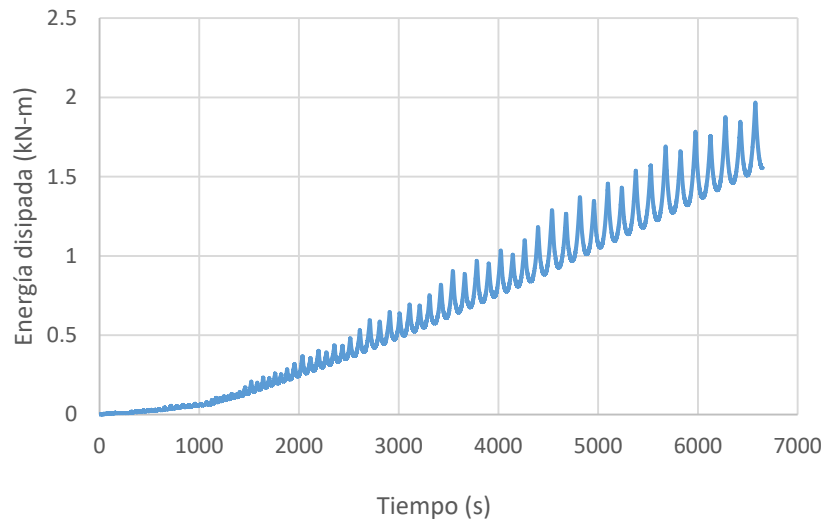


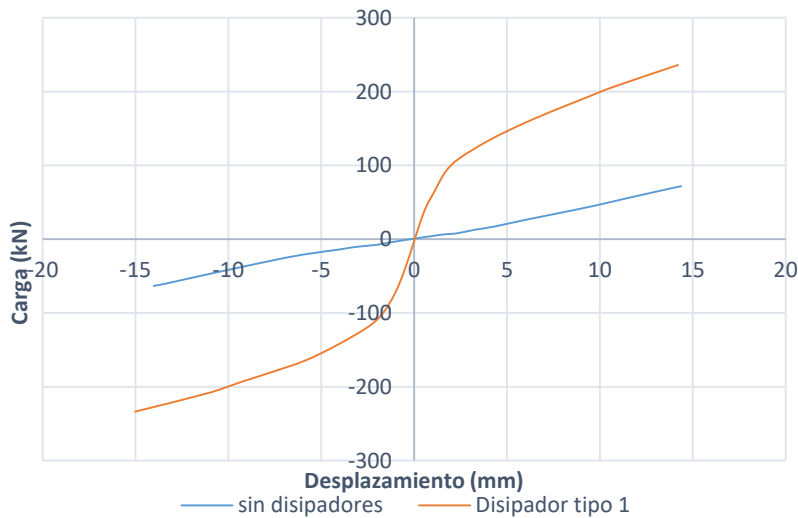
Figura 4.10 Curva de energía disipada del dispositivo tipo 2

Por otro lado, se observa la curva de energía disipada del experimento sin disipadores, en la cual se observa una curva con concavidad muy tenue. *Figura 4.11*



*Figura 4.11 Curva de energía disipada del experimento sin disipadores*

Con los resultados obtenidos se realizó una comparación entre el sistema sin disipadores y cada uno de los sistemas equipados con los disipadores. En las *figuras 4.12 Y 4.13* se observa dicha comparación en las que se puede ver la diferencia de la carga tomada por el marco solo y con disipadores.



*Figura 4.12 Comparación de envolventes de marco sin disipadores y con disipadores tipo 1*

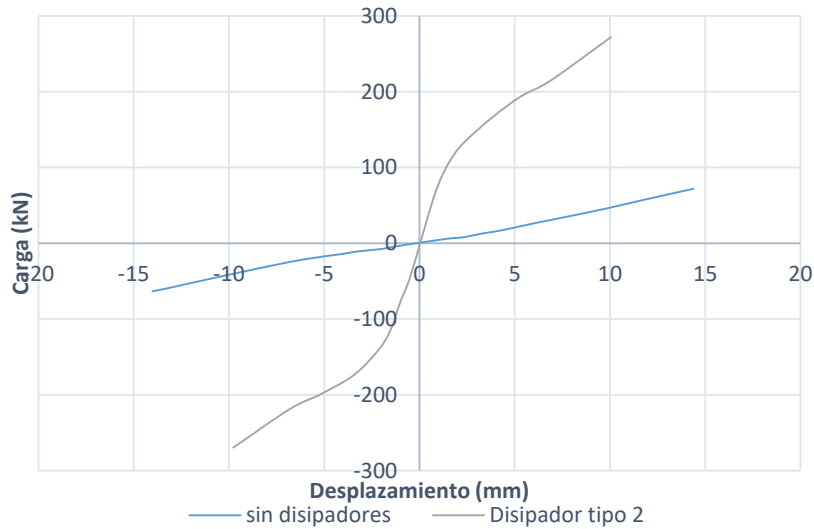


Figura 4.13 Comparación de envolturas de marco sin disipadores y con disipadores tipo 2

Se realizó una gráfica de comparación con las curvas de la energía disipada de cada experimento, en la cual se puede observar la diferencia en cuando a la energía disipada, expresada principalmente por la pendiente de la curva (Figura 4.14). Se observa que el marco sin disipadores disipó el 1% del arreglo con disipadores tipo 2, mientras que el marco con disipadores tipo 1 disipó un 44% del tipo 2.

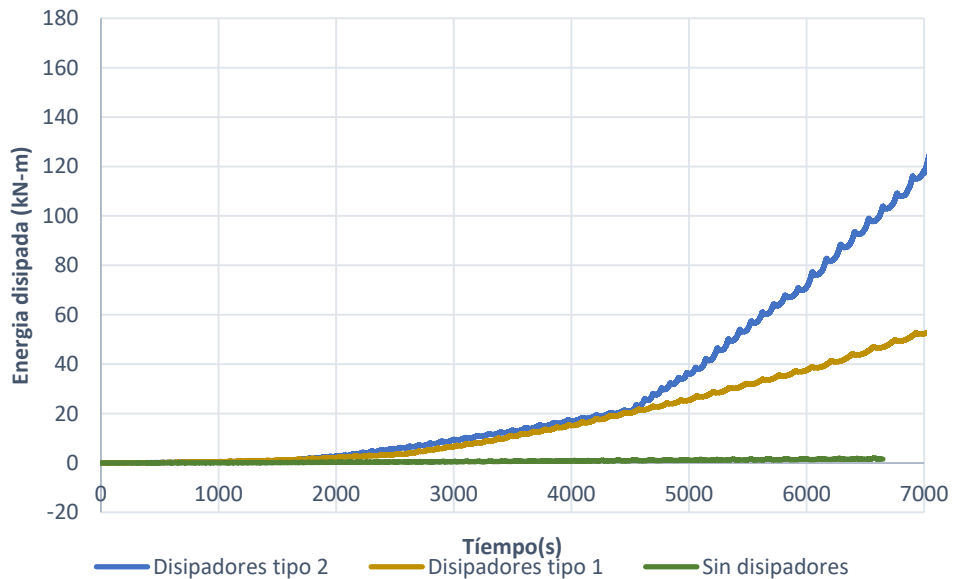
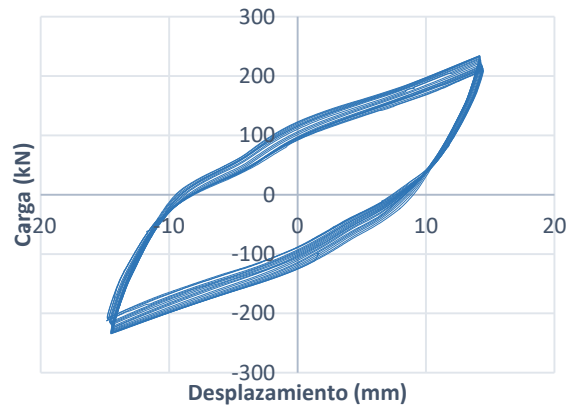


Figura 4.14 Comparación de curvas de energía disipada en cada prueba

Adicionales a las condiciones planeadas se realizaron pruebas adicionales en los experimentos con disipadores. En la prueba con los disipadores tipo 1, se aplicaron 20 ciclos adicionales a los del protocolo original (*Figura 3.9*), a 15 mm de desplazamiento y se obtuvieron curvas de histéresis, las cuales se presentan en la *figura 4.15*. Se observa un comportamiento muy estable



*Figura 4.15 Curva de histéresis de ciclos adicionales en experimento de disipadores tipo 1*

Durante la prueba de los disipadores tipo 2, se realizaron pruebas adicionales, aplicando ciclos de carga a los niveles adicionales de 24, 30 y 35 mm, para observar el comportamiento de los disipadores. Se obtuvieron curvas de histéresis de estos ciclos, los cuales se presentan en la *figura 4.16*. Una vez más, se aprecia comportamiento estable, aunque con adelgazamiento en desplazamientos cercanos a cero, producidos probablemente por deslizamiento de las placas de conexión.

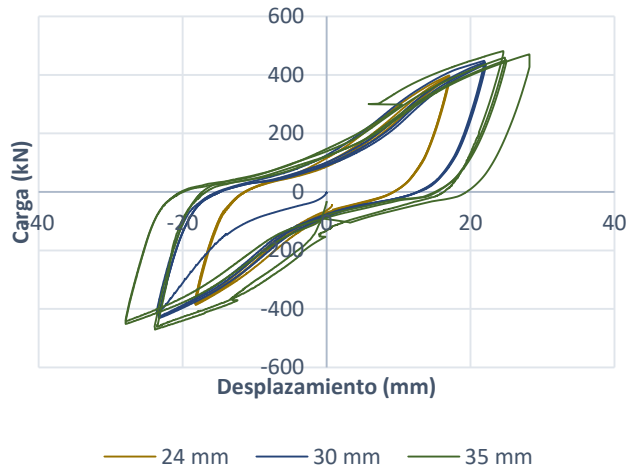


Figura 4.16 Curvas de histéresis de pruebas adicionales a los disipadores tipo 2

## 5. Conclusiones y recomendaciones

### Conclusiones

Se presentaron los resultados de un experimento de un marco de concreto reforzado equipado con disipadores tipo “SLB”. Se hicieron tres pruebas, esto es: 1) Pruebas con disipadores tipo 1; 2) Prueba con sin disipadores; y 3) prueba con disipadores tipo 2.

Con las características mostradas en los capítulos anteriores, se observaron algunos fenómenos ocurridos en los experimentos. Estas características resultan de gran interés pues demuestran el funcionamiento de los disipadores e información que funcionará para dar pautas sobre instalación y uso de los mismos.

Las conclusiones a las que se llegaron fueron las siguientes:

- En la *figura 4.12* se observa que el marco sin disipadores tomó 71 kN de carga y el marco equipado con los disipadores tipo 1 tomó 235 kN, por lo cual únicamente el par de disipadores absorbieron 81.5 kN cada uno, lo cual es el 63% más de la capacidad calculada.

- En la prueba en la cual se ensayó el dissipador tipo 1 se observó que la curva de histéresis es simétrica, lo cual nos indica que la disipación de energía es en ambas direcciones en cuanto al movimiento generado por la distorsión de entrepiso. Esto se puede observar en la gráfica de disipación de energía histerética; que llegó a 60 kN-m en el último nivel de desplazamiento de 15 mm.
- La fluencia del sistema comenzó a los 2 mm desplazamiento y 100 kN de carga. (Observar *figura 4.7*)
- Al finalizar el experimento con los dissipadores tipo 1, se observó que el dissipador más cercano al actuador sufrió un pandeo y salió de su plano, a esto se atribuye una pérdida de resistencia. Dicho inconveniente fue tomado en cuenta para el experimento con el dissipador tipo 2 pues a este se le pusieron dos placas como topes en los laterales, lo cual impidió el movimiento fuera del plano.
- Durante la prueba de con los dissipadores tipo 2, se puede observar que la fluencia comenzó a dar aproximadamente a los 2 mm y 140 kN de carga. En la *figura 4.8* se puede observar esta aseveración en la envolvente.
- Se puede observar en la *figura 4.13* que el marco sin dissipadores tomó 71 kN, mientras que el sistema equipado con los dissipadores tipo 2 tomó 313 kN. La diferencia entre estos dos es de 242 kN que corresponde a la carga tomada por el par dissipadores, es decir, cada dissipador tomo una carga de 121 kN. Esto corresponde al 21 % más de la carga calculada.
- En la prueba de los dissipadores tipo 2 se observó que las placas que estaban apoyadas en la parte superior del muro rotaban, generando un aplastamiento del concreto y agrietamiento importante en la estructura ante cargas severas (Ver *figura 4.2*). Este comportamiento es indeseable, ya que una parte de la carga estaba siendo transmitida al muro en lugar de ser disipada por la histéresis del dissipador.
- Se puede observar en la *figura 4.14*, que, sin dissipadores, en marco tiene muy poca disipación histerética, únicamente proporcionada por el amortiguamiento de sus

elementos, a diferencia de los experimentos con disipadores, donde se puede observar que la curva de disipación de energía crece de manera considerable.

- En las curvas de energía se observa que hay una relación directa entre la pendiente de las curvas y la capacidad de los disipadores, pues claramente es visible que mientras aumenta la capacidad, aumenta la pendiente o concavidad de las mismas.

### **Recomendaciones.**

- La recomendación principal es el mejoramiento de la conexión del sistema de disipadores con la estructura, pues en el experimento se observó que parte de la carga dañaba la estructura antes de alcanzar la carga reportada por el fabricante. Esto resulta poco útil si se busca que el sistema funcione como un “fusible” estructural.

Por otro lado, se observó que el deslizamiento de las placas de conexión, generó un adelgazamiento en las curvas de histéresis (II-UNAM, 2017)

- Adaptar un sistema de arriostramiento lateral a la placa del disipador, para evitar el pandeo fuera del plano observado durante el experimento, ayuda a evitar reducciones de la capacidad de los disipadores.

- En cuanto al sistema estructural, se recomienda sugerir un armado adicional al muro en las zonas de conexión para dar confinamiento adecuado. Esto para absorber las fuerzas de tensión generadas por la rotación de la placa de conexión.



## 6. Referencias bibliográficas

- Aguirre, M. y Sánchez, R, 1990, Disipadores de energía sísmica, Construcción y tecnología, Vol III, No. 27, pp 15-19
- Aiken, Ian D.; Nims, Douglas K.; Whittaker, Andrew S. and Kelly, James M. *Testing of passive energy dis-sipation systems*. Earthquake Spectra Vol. 9, No. 3, 1993.
- Arrollo, E., Terán, A., Gama, E., Guerrero, J., (2009), Estudio Experimental de Contravientos Restringidos Contra Pandeo: Desarrollo Conceptual y Detalles de Implementación, Universidad Autónoma Metropolitana, México.
- Benavent A., Hirishi A. (1999), Proyecto De Estructuras Sismorresistentes Utilizando Dos Nuevos Disipadores De Energía De Tipo Histerético. Primer Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica. Murcia España.
- Christopoulos, C., Filiatrault, A., & Bertero, V. V. (2006). *Principles of passive supplemental damping and seismic isolation*. Pavia, Italy: IUSS Press.
- Escobar, J., Guerrero, H., Durán, R., Gómez, R., Cecilio, V, (2012), Pruebas experimentales en mesa vibradora de dos modelos prefabricados de concreto reforzado (modelo con contravientos), Instituto de Ingeniería, UNAM.
- Gatica, Victor, (2012), Respuesta sísmica de un edificio de estructura metálica con aisladores. Alternativas de diseño. Trabajo fin de master, Universidad politécnica de Madrid.
- Instituto de ingeniería, UNAM, (2017) Ensaye experimental de un marco de concreto reforzado equipado con disipadores de energía sísmica "SLB".
- Jara J. M., (1994) Estado del arte sobre dispositivos para reducir daños provocados por temblores, Revista de Ingeniería Sísmica, No. 47, 35-39.
- Lama Chong, Waleon Fernando, (2013), Análisis y Diseño de estructuras de acero con disipadores viscoelásticos para la ciudad de Guayaquil, Ecuador, Tesis de la Universidad católica de Santiago de Guayaquil.

- Merrit S, Uang C-M, Benzoni G. (2003) *Subassemblage testing of core brace bucklingrestrained braces*. La Jolla (California): University of California, San Diego
- Oviedo, Juan Andrés, Duque, María del Pilar, (2006) Sistemas de control de respuesta sísmica en edificaciones. Revista EIA [en línea].
- Pimiento, Juan, Salas, Andrés, & Ruiz, Daniel. (2014). Desempeño sísmico de un pórtico con disipadores de energía pasivos de placas ranuradas de acero. Revista ingeniería de construcción, 29(3), 283-298.
- Sistema Geológico Mexicano,(2017) Tectónica de placas, Museo Virtual, <http://www.sgm.gob.mx/Web/MuseoVirtual/Riesgos-geologicos/Tectonica-de-placas.html>.
- Zabala, F., Bustos, José L., Masanet, Alberto R., Santalucía, Jorge R., (2001) Desarrollo de disipadores de fluencia de metales y su aplicación a sistemas pasivos de protección sísmica, Instituto de investigaciones antisísmicas. Universidad Nacional de San Juan, Argentina.