



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

**MODELACIÓN NUMÉRICA NO LINEAL DE 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**

**GERARDO ARRIAGA ARÉVALO**

**DIRECTOR DE TESIS**

**HÉCTOR GUERRERO BOBADILLA**



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2018





UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

DIVISIÓN DE INGENIERÍAS CIVIL Y GEOMÁTICA  
COMITÉ DE TITULACIÓN  
FING/DICyG/SEAC/UTIT/005/18

Señor  
GERARDO ARRIAGA ARÉVALO  
Presente

En atención a su solicitud me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor DR. HÉCTOR GUERRERO BOBADILLA, que aprobó este Comité, para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de INGENIERO CIVIL.

**"MODELACIÓN NUMÉRICA NO LINEAL DE UN MARCO DE CONCRETO REFORZADO, EQUIPADO CON DISIPADORES DE ENERGÍA SÍSMICA"**

- INTRODUCCIÓN
- I. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA
- II. MODELO EXPERIMENTAL
- III. RÍGIDEZ Y RESISTENCIA DE ELEMENTOS ESTRUCTURALES
- IV. MODELACIÓN NUMÉRICA
- V. RESULTADOS Y COMPARACIONES
- VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el Título de ésta.

Asimismo le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar Examen Profesional.

Atentamente  
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"  
Cd. Universitaria a 23 de enero del 2018.  
EL PRESIDENTE

M.I. GERMÁN LÓPEZ RINCÓN

GLR/MTH\*gar.

A mi madre que me dio la vida y que siempre ha estado incondicionalmente para mí, impulsando mis metas para aspirar a mejores ámbitos en la vida.

**Te amo**

A mi padre que siempre me ha extendido su apoyo incondicional en todo momento y me ha enseñado grandes valores en la vida.

**Te amo**

A mis hermanos que son lo más hermoso que la vida pudo darme y quienes son los que me motivan para seguir siendo un ejemplo para ellos en la vida.

**Los amo**

A mi compañera de vida quien siempre ha caminado a mi lado y es parte importante de cada paso que doy.

**Te amo**

## **Agradecimientos**

A la Universidad Nacional Autónoma de México y a la Facultad de Ingeniería por formarme como estudiante, como profesional e inculcarme el símbolo universitario, portando con orgullo el estandarte de la máxima casa de estudios.

Al Instituto de Ingeniería que me abrió sus puertas para iniciar mi carrera profesional y que siempre me sentiré orgulloso de haber pertenecido a esta gran institución.

Al Dr. Héctor Guerrero Bobadilla al cual admiro por las labores que ha desempeñado a lo largo de su trayectoria académica pero más aún por la forma siempre humana, sencilla y humilde de ser como persona.

Al Dr. José Alberto Escobar Sánchez el cual me abrió las puertas para dedicarme a lo que me apasiona en el ámbito profesional como lo es la Ingeniería Estructural.

Al Ing. Víctor Franco y al Ing. Roberto Abraham Sánchez Ramírez por abrirme las puertas del Instituto de Ingeniería.

Al deporte universitario el cual me ayudo a seguir el mejor camino para una mejor formación física y académica, la cual siempre ha caracterizado mi perfil de toda la vida.

A mis amigos y demás personas que me apoyaron de manera personal y académica para concluir con esta gran meta. Gracias

Y a ti Arriaga Arévalo Gerardo porque sabes que esta meta es la más importante en tu vida y que a través de mucho trabajo, constancia, dedicación y sacrificio la llevaste a cabo. Felicidades!!!

## **RESUMEN**

En esta tesis, primero se presentan los resultados experimentales de un marco de concreto reforzado equipado con disipadores de tipo histerético. Se obtuvieron las resistencias, rigideces y rigideces post-fluencia de los disipadores ensayados. Después de obtener dichas propiedades se realizó un modelo numérico en el programa de análisis estructural SAP2000. Los resultados obtenidos del modelo numérico fueron comparados con los resultados del modelo experimental los cuales fueron muy similares.

## **Abstract**

In this thesis, we first present the experimental results of a reinforced concrete frame equipped with hysterical dissipaters. The resistances, stiffness and post-creep stiffness of the dissipaters tested were obtained. After obtaining these properties, a numerical model was made in the SAP2000 structural analysis program. The results obtained from the numerical model were compared with the results of the experimental model, which were very similar.

## CONTENIDO

<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	4
OBJETIVOS DE LA TESIS.....	4
DESCRIPCIÓN DEL CONTENIDO .....	5
<b>1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>7</b>
1.1 LOS DISIPADORES DE ENERGÍA SÍSMICA.....	8
1.1.1 TIPOS DE DISIPADORES.....	8
1.2 COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL DE DISIPADORES DE ENERGÍA SÍSMICA.....	11
1.3 RESPUESTA DE ESTRUCTURAS EQUIPADAS CON DISIPADORES DE ENERGÍA SÍSMICA .....	12
<b>2. MODELO EXPERIMENTAL.....</b>	<b>16</b>
2.1 MATERIALES.....	17
2.2 GEOMETRÍA DEL MODELO .....	17
2.2.1 GEOMETRÍA GLOBAL.....	17
2.2.2 SECCIONES TRANSVERSALES.....	18
2.3 DISIPADORES DE ENERGIA SÍSMICA USADOS .....	20
2.3.1 DISIPADORES TIPO 1.....	20
2.3.2 DISIPADORES TIPO 2.....	20
2.4 INSTRUMENTACIÓN.....	21
2.5 PROTOCOLO DE CARGAS .....	24
2.6 DESCRIPCIÓN DE PRUEBAS EXPERIMENTALES .....	25
2.6.1 MODELO EXPERIMENTAL SIN DISIPADOR (SD).....	26
2.6.2 MODELO EXPERIMENTAL CON DISIPADOR TIPO 1.....	26
2.6.3 MODELO EXPERIMENTAL CON DISIPADOR TIPO 2.....	27
2.7 COMPORTAMIENTO EXPERIMENTAL.....	28
2.7.1 COMPORTAMIENTO SIN DISIPADOR (SD).....	28
2.7.2 COMPORTAMIENTO DISIPADOR TIPO 1.....	28
2.7.3 COMPORTAMIENTO DISIPADOR TIPO 2.....	30
<b>3. RIGIDEZ Y RESISTENCIA DE ELEMENTOS ESTRUCTURALES.....</b>	<b>33</b>
3.1 RESISTENCIA TEÓRICA Y EXPERIMENTAL.....	34
3.1.1 RESISTENCIA DISIPADOR TIPO 1.....	35
3.1.2 RESISTENCIA DISIPADOR TIPO 2.....	36
3.2 COMPARACIÓN DE RESISTENCIAS TEORICAS Y EXPERIMENTALES.....	38
3.3 RIGIDEZ DEL MODELO.....	40
3.3.1 RIGIDEZ DEL MODELO CON DISIPADOR TIPO 1.....	41
3.3.2 RIGIDEZ DEL MODELO CON DISIPADOR TIPO 2.....	41
3.4 DEFORMACIÓN EXPERIMENTAL DEL MURO.....	42

3.4.1 DEFORMACIÓN EXPERIMENTAL DEL MURO CON EL DISIPADOR TIPO 1.....	42
3.4.2 DEFROMACIÓN EXPERIMENTAL DEL MURO CON EL DISIPADOR TIPO 2.....	43
3.5 RIGIDEZ EFECTIVA DE LOS DISIPADORES.....	43
3.5.1 RIGIDEZ EFECTIVA DEL DISIPADOR TIPO 1.....	45
3.5.2 RIGIDEZ EFECTIVA DEL DISIPADOR TIPO 2.....	46
3.6 COMPARACIÓN DE RIGIDECES TEÓRICAS Y EXPERIMENTALES.....	47
3.7 RIGIDEZ POST-FLUENCIA.....	49
3.7.1 RIGIDEZ POST-FLUENCIA DEL DISIPADOR TIPO 1.....	50
3.7.2 RIGIDEZ POST-FLUENCIA DEL DISIPADOR TIPO 2.....	52
<b>4. MODEALCIÓN NUMÉRICA.....</b>	<b>54</b>
4.1 PROPIEDADES DEL MODELO NUMÉRICO.....	55
4.2 MODELO NUMÉRICO EN EL PROGRAMA DE ANALISIS ESTRUCTURAL SAP2000.....	56
4.2.1 MODELO DEL MARCO SIN DISIPADOR (SD).....	56
4.2.2 MODELO DEL MARCO CON DISIPADOR TIPO 1.....	57
4.2.3 MODELO DEL MARCO CON DISIPADOR TIPO 2.....	59
4.3 COMPORTAMIENTO ANTE CARGAS LATERALES.....	60
4.3.1 MARCO.....	60
4.3.1.1 DIAGRAMAS DE ELEMENTOS MECÁNICOS SIN DISIPADOR (SD).....	60
4.3.1.2 DIAGRAMAS DE ELEMENTOS MECÁNICOS CON DISIPADOR TIPO 1.....	61
4.3.1.3 DIAGRAMAS DE ELEMENTOS MECÁNICOS CON DISIPADOR TIPO 2.....	63
4.3.2 MURO.....	64
4.3.2.1 ESFUERZOS CON DISIPADOR TIPO 1.....	64
4.3.2.2 ESFUERZOS CON DISIPADOR TIPO 2.....	68
<b>5. RESULTADOS Y COMPARACIONES.....</b>	<b>72</b>
5.1 RESULTADOS EXPERIMENTALES.....	73
5.1.1 CURVAS CARGA-DEFORMACIÓN DEL MARCO SIN DISIPADOR (SD).....	73
5.1.2 CURVAS CARGA-DEFORMACIÓN CON DISIPADOR TIPO 1.....	75
5.1.3 CURVAS CARGA-DEFORMACIÓN CON DISIPADOR TIPO 2.....	76
5.2 RESULTADOS NUMÉRICOS.....	79
5.2.1 MODELO.....	79
5.2.1.1 CURVAS CARGA-DEFORMACIÓN NUMÉRICAS DEL MARCO SIN DISIPADOR (SD).....	79
5.2.1.2 CURVAS CARGA-DEFORMACIÓN NUMÉRICAS CON DISIPADOR TIPO 1.....	80

5.2.1.3	CURVAS CARGA-DEFORMACIÓN NUMÉRICAS CON DISIPADOR TIPO 2.....	81
5.2.2	MARCO.....	82
5.2.2.1	DIAGRAMAS DE ELEMENTOS MECÁNICOS SIN DISIPADOR (SD).....	82
5.2.2.2	DIAGRAMAS DE ELEMENTOS MECÁNICOS CON DISIPADOR TIPO 1.....	82
5.2.2.3	DIAGRAMAS DE ELEMENTOS MECÁNICOS CON DISIPADOR TIPO 2.....	83
5.2.3	MURO.....	83
5.2.3.1	ESFUERZOS CON DISIPADOR TIPO 1.....	83
5.2.3.2	ESFUERZOS CON DISIPADOR TIPO 2.....	84
5.3	COMPARACIÓN DE RESULTADOS EXPERIMENTALES Y NUMÉRICOS.....	84
5.3.1	COMPARACIÓN DE RESULTADOS SIN DISIPADOR (SD).....	90
5.3.1.1	CURVAS CARGA DEFORMACIÓN.....	90
5.3.1.2	DIAGRAMAS DE ELEMENTOS MECÁNICOS.....	90
5.3.2	COMPARACIÓN DE RESULTADOS CON DISIPADOR TIPO 1.....	91
5.3.2.1	CURVAS CARGA DEFORMACIÓN.....	91
5.3.2.2	DIAGRAMAS DE ELEMENTOS MECÁNICOS.....	91
5.3.2.3	ESFUERZOS EN EL MURO.....	92
5.3.3	COMPARACIÓN DE RESULTADOS CON DISIPADOR TIPO 2.....	92
5.3.3.1	CURVAS CARGA DEFORMACIÓN.....	92
5.3.3.2	DIAGRAMAS DE ELEMENTOS MECÁNICOS.....	92
5.3.3.3	ESFUERZOS EN EL MURO.....	93
<b>6.</b>	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>	<b>94</b>
6.1	CONCLUSIONES.....	95
6.2	RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS.....	95
	<b>REFERENCIAS.....</b>	<b>96</b>
	<b>ANEXOS.....</b>	<b>99</b>

## INTRODUCCIÓN

---

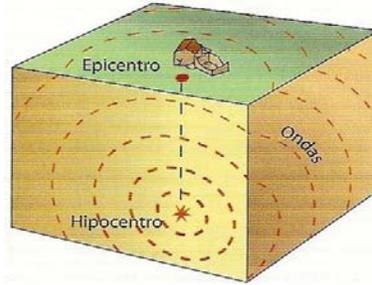
Desde hace muchos años se ha notado el impacto que los fenómenos naturales tienen sobre la sociedad. Una de ellas es el impacto de los terremotos. Estos se generan por la liberación de energía acumulada y se reproducen como un sistema de ondas sísmicas, algunas de las principales causas que generan este tipo de fenómenos se deben al choque de placas debido al límite que presentan cada una de ellas y que se originan por la fricción entre estas mismas para acomodarse (Figura 1).



*Fig. 1 Localización de placas tectónicas (créditos: Servicio Sismológico Nacional UNAM)*

En el país donde nos encontramos las placas que intervienen directamente son tres placas: la primera y más grande es la Placa Continental Norteamericana, la segunda es la Placa del Pacífico y la tercera la Placa de Cocos (Figura 1); estas dos últimas tienden a tener un deslizamiento hacia el interior de la placa intercontinental provocando lo que se conoce como subducción. Estas placas oceánicas se deslizan por debajo de la placa continental hasta comprimirla sin detener su desplazamiento, provocando así fracturas entre estas, lo que genera una liberación de energía acumulada que se propaga por medio de ondas sísmicas a varios kilómetros de la superficie terrestre.

Al generarse este roce de placas al interior de la tierra, ocurre la liberación de energía en un punto de origen llamado hipocentro que es el lugar donde se origina un terremoto. Posteriormente estas ondas siguen avanzando hasta llegar a la superficie terrestre la cual recibe esta energía en su denominado punto llamado epicentro, este punto es perpendicular al hipocentro y es el lugar donde generalmente resulta el más afectado al ocurrir este fenómeno. Estos puntos se pueden apreciar mejor en la figura 2.



*Fig. 2 Puntos específicos de un sismo (créditos: Ciencias de la tierra, 2018)*

Los terremotos tienen características propias como su magnitud y su intensidad, en donde la magnitud corresponde a dimensionar el tamaño de un sismo y a la energía sísmica liberada, mientras que la intensidad hace referencia a la interacción de las ondas sísmicas con el subsuelo, que dependiendo de cada tipo de zona puede ser mayor o menor.

Algunos de los terremotos más importantes ocurridos en México se presentan a continuación:

1. El sismo de mayor magnitud en México

Éste evento se registró el 28 de marzo de 1787 con una magnitud de 8.6 grados, con epicentro en las costas de Oaxaca a las 11:00 hrs. También es conocido como “El gran tsunami mexicano” debido a que este fenómeno provocó uno de los mayores daños en la historia de Oaxaca.

2. Sismo del 19/Sep/1985

Este sismo ocurrió el 19 de Septiembre de 1985 con magnitud de 8.1 grados, con epicentro en las costas de Michoacán a más de 350 kilómetros de la Ciudad de México con hora local de 7:17 hrs. Se presentaron afectaciones muy serias en la capital del país provocando más de 10 mil víctimas mortales, cerca de 50 mil heridos, 250 mil personas sin hogar y más de 700 edificios colapsados o severamente dañados. La figura 3a y 3b presenta imágenes de este sismo en la Ciudad de México.



a)



b)

*Fig.3 Afectación de estructuras en la Ciudad de México debido al sismo de 1985 (créditos: El Universal, 2017)*

### 3. El sismo del Ángel

Ocurrió el 27 de julio de 1957 con una magnitud de 7.8 grados, con epicentro en la costa del estado de Guerrero con hora local de 2:43 hrs. Se presentaron daños como la caída del monumento a la independencia que posteriormente sería restaurado y reforzado en 1958. Se generaron pérdidas de 700 víctimas y 2500 heridos.

### 4. El sismo con más réplicas en la historia

Éste se registró el 20 de Marzo de 2012 con una magnitud de 7.5 grados, con epicentro en Ometepec, Guerrero a las 12:02 hrs. Lo que distingue a este sismo son las réplicas sucesoras del sismo con 44 eventos superiores a 4.5 grados durante los siguientes 30 días de haber sucedido el evento principal. Comparado con el sismo de 1985 este tuvo tres veces más réplicas.

### 5. Sismo del 19/Sept/2017

Éste sismo ocurrió el 19 de Septiembre del 2017 a las 13:14 hrs, con una magnitud de 7.1 grados, con epicentro en Axochiapan Morelos, a 128 km de la Ciudad de México a las 13:14 hrs. Dejando una cifra de 369 víctimas entre los estados de Morelos, Puebla, Estado de México, Guerrero y Oaxaca. Dejó miles de damnificados y cuantiosos daños materiales en edificios públicos, así como en inmuebles comerciales y particulares. En la figura 4a y 4b se muestran algunas de las afectaciones que derivó este sismo.



a)



b)

*Fig. 4 Afectaciones en la Ciudad de México debido al sismo de 2017 (créditos. G. Arriaga)*

## **PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

Los sismos han mostrado la fuerza devastadora de la naturaleza. Estos han tenido un impacto muy significativo en la sociedad; lo que ha creado un amplio campo de dudas y cuestionamientos acerca de la seguridad de las estructuras y los problemas que llegan a presentarse en su comportamiento ante estos fenómenos.

Teniendo en cuenta esto, nos hemos preguntado cómo poder ayudar de manera eficiente y accesible a la sociedad con la seguridad de los recintos en donde laboran o habitan, tratando de que estos se comporten de la mejor manera si se presenta un fenómeno de este tipo.

Desde lo ocurrido en el sismo de 1985 la Ciudad de México trato de restablecerse implementando normas de emergencia y modificaciones al reglamento de construcciones del Distrito Federal para mejorar el comportamiento de los recintos ante los sismos y otros factores.

Una de las medidas más eficientes para reducir daños en las estructuras son los sistemas de protección sísmica. Existen diferentes sistemas de protección los cuales pueden ayudar a mejorar el comportamiento estructural ante movimientos sísmicos. Al equipar las estructuras con este tipo de dispositivos se busca que estos elementos reduzcan de cierta manera la energía sísmica de un terremoto. Hay dispositivos que protegen a la estructura a través del aislamiento de ésta con el propio suelo, y otros dispositivos que son implementados sobre la propia estructura, cuya función que es la disipación de energía y son reemplazables.

Estos últimos son conocidos como disipadores de energía sísmica, y se han desarrollado a lo largo de los años para ayudar a disipar la energía que un sismo induce en una estructura. Los dispositivos son diseñados para que disipen la mayor cantidad de energía que llega a la estructura, siendo estos los que trabajan para disipar la energía de entrada y no los elementos principales de una estructura.

En el mercado actual existen varios modelos de estos dispositivos, de los cuales se hablará más adelante, teniendo en cuenta sus alcances y limitaciones dependiendo del uso de la estructura.

## **OBJETIVOS DE LA TESIS**

El objetivo general de esta tesis es realizar un modelo numérico que represente los resultados obtenidos en pruebas experimentales de una estructura equipada con disipadores de energía sísmica en el laboratorio de materiales del Instituto de Ingeniería de la UNAM. Los objetivos particulares son:

- Verificar el correcto funcionamiento de los disipadores empleados, mediante la comparación de resultados experimentales y numéricos.

- A partir de resultados experimentales, obtener las propiedades de cada tipo de disipador empleado. Establecer una referencia sustentada de que las estructuras que se equipen con este tipo de disipadores podrán asegurar su correcto funcionamiento al presentarse un fenómeno sísmico.
- Proponer parámetros de modelación numérica de los disipadores utilizados en las pruebas experimentales.

## **DESCRIPCIÓN DEL CONTENIDO**

### *Capítulo 1*

En este capítulo se muestra un panorama general del comportamiento y tipos de disipadores de energía sísmica que existen hoy en día y que se tienen patentados, además de información que reporta el uso activo de estos dispositivos implementados sobre las propias estructuras y como han sido los resultados al utilizarse estos.

### *Capítulo 2*

En este capítulo se muestra el modelo experimental de los ensayos realizados. Se presenta su descripción, los materiales que fueron utilizados, así como sus propiedades. Se describe la geometría de los elementos estructurales utilizados, así como la instrumentación que se utilizó para medir las cargas y desplazamientos a los que fue sometida la estructura. Se describe puntualmente las características de cada tipo de disipador utilizado, tanto del disipador tipo 1 como el disipador tipo 2. Se establece un protocolo de cargas en cada tipo de prueba, tomando como base el desplazamiento requerido. Finalmente se describe el comportamiento estructural para cada tipo de ensayo el cual dependerá del tipo de disipador que se utilizó en cada prueba.

### *Capítulo 3*

En este capítulo se obtienen las propiedades de cada tipo de disipador, tales como su rigidez, su resistencia y su rigidez post-fluencia. Además se estiman los desplazamientos del muro a partir de la instrumentación implementada en el modelo experimental.

### *Capítulo 4*

En este capítulo se reproduce un modelo numérico en el programa de análisis estructural SAP2000, mismo que representa el comportamiento estructural del modelo experimental observado en el laboratorio. Este modelo se realizó para tres pruebas ejecutadas; utilizando las propiedades de los disipadores, obtenidas en el capítulo 3. También se obtiene el comportamiento de los elementos estructurales que integran al sistema, como los diagramas de elementos mecánicos en el marco y los esfuerzos generados en el muro.

## *Capítulo 5*

Se presentan los resultados experimentales obtenidos por la instrumentación a través de curvas histeréticas, así como sus respectivos resultados generados por la modelación numérica. Los resultados son comparados para establecer si se cumplió con el objetivo de esta tesis. Se presentan los resultados del modelo numérico para el marco y muro, mismos que también se comparan con resultados teóricos obtenidos de las normas técnicas para diseño y construcción de estructuras de concreto de la Ciudad de México. Estos resultados y comparaciones se realizan para los tres tipos de pruebas implementados.

## *Capítulo 6*

Se presentan las conclusiones de los resultados obtenidos, haciendo referencia a los objetivos propios de esta tesis. Además se dan recomendaciones para la correcta implementación de los dispositivos usados y se recomiendan trabajos futuros que pueden ser apoyados con esta tesis.

## **1 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA**

## 1.1 LOS DÍSSIPADORES DE ENERGÍA SÍSMICA

Los disipadores sísmicos tienen como función objetiva disipar las acumulaciones de energía, evitando que otros elementos de la estructura sean sobre esforzados, lo que genera que estos capturen la fuerza telúrica y se deformen, ayudando a que la estructura sufra un menor impacto. En conclusión estos dispositivos incrementan la amortiguación y generan una reducción de deformaciones en la estructura.

### 1.1.1 Tipos de disipadores

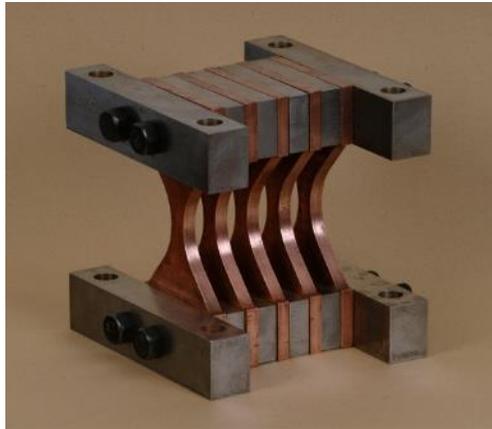
Existe una amplia gama de dispositivos, cuya función es disipar la energía en un evento sísmico.

Estos dispositivos se pueden clasificar en los siguientes tipos:

1. *Disipadores de deformación (fluencia, fricción)*
2. *Disipadores de velocidad (visco elásticos)*
3. *Disipadores de fluido viscoso*

#### *Disipadores de deformación (fluencia)*

Son dispositivos que transforman la energía recibida en calor, deformando al material más allá de su límite de fluencia.



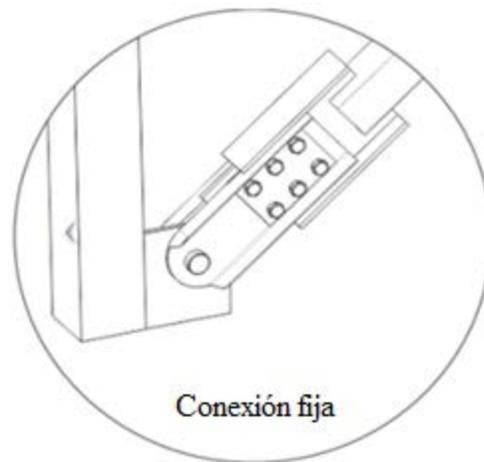
*Fig. 1.1 Disipador de fluencia [créditos: Seismic Protection Technologies, 2017]*

Un ejemplo de estos dispositivos se muestra en la figura 1.1 éste tipo de dispositivos consiste en una placa de acero en forma de X que se fija con pernos y espárragos al piso y a la parte inferior de la trabe del piso superior. Esta colocación le permite al dispositivo deformarse mientras existen movimientos de la trabe respecto al piso, lo que resulta en la transmisión de esfuerzos y la energía no disipada desde el nivel inferior hacia los niveles superiores cuando ocurre un sismo.

Una de las desventajas que hay al utilizar este tipo de disipadores es que rigidizan a la estructura y al momento de ser demandados sufren deformaciones permanentes, por lo que después de ser utilizados podrían ser reemplazados.

#### *Disipadores de deformación (fricción)*

Estos dispositivos funcionan a través de la fricción entre sólidos metálicos disipando la energía por calor en un sismo. Este tipo de disipadores presentan una curva de histéresis en forma rectangular por lo que su diseño sólo dependerá de la fuerza aplicada y el desplazamiento obtenido. También este tipo de diseño funciona para reaccionar antes de que los elementos estructurales principales alcancen estados plásticos. En la figura 1.2 se muestra un disipador de deformación por fricción.



*Fig.1.2 Disipador de deformación por fricción [créditos: Quaketek, 2018]*

#### *Disipadores de velocidad (viscos elásticos)*

El principio general de este dispositivo es mover un elemento a través de un material visco elástico. Éste material generara fuerzas que se oponen al movimiento de dicho elemento y que es proporcional a la velocidad.

Los materiales visco elásticos utilizados para estos dispositivos son por lo general polímeros y sustancias vidriosas que disipan la energía cuando están sujetas a fuerzas cortantes. Un disipador visco elástico consiste en capas visco elásticas que se encuentran entre placas de acero, tal como el mostrado en la figura 1.3a y 1.3b.

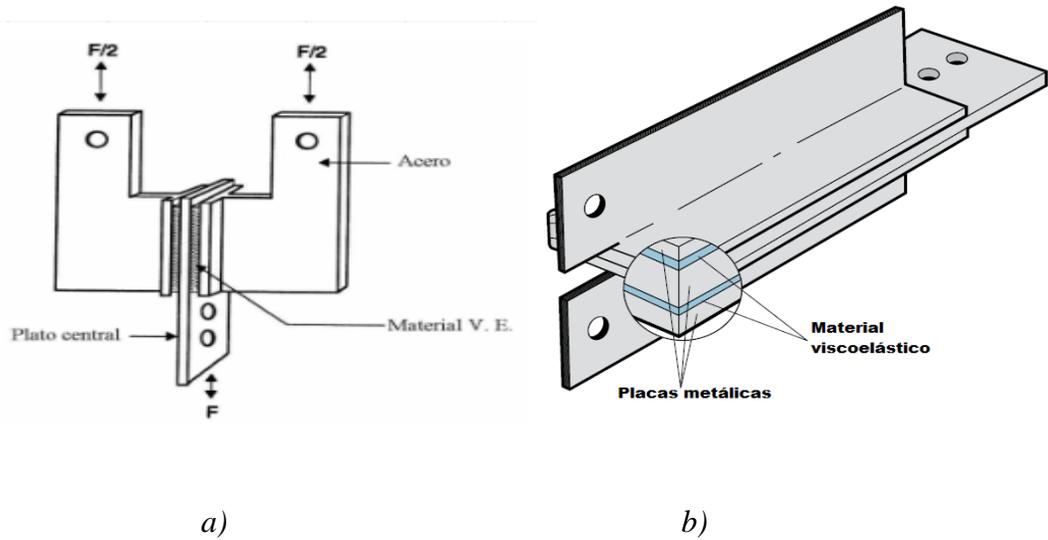


Fig. 1.3 Disipadores viscos elásticos (créditos: Byron Hoffmann, 2017)

La disipación de energía ocurre cuando existe movimiento mutuo entre la placa central de acero y las capas visco elásticas laterales.

#### Disipadores de fluido viscoso

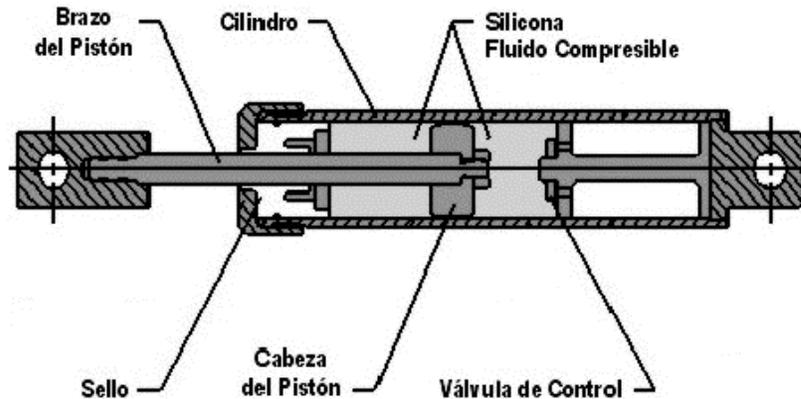
El funcionamiento de estos dispositivos consiste en mover un elemento a través de fluido viscoso, por lo general estos fluidos son siliconas y aceites, estos generan fuerzas que se oponen al movimiento de dicho elemento de magnitud proporcional a la velocidad. La figura 1.4 muestra un disipador de tipo viscoso.



Fig. 1.4 Disipador de fluido viscoso [créditos: CDV Ingeniería antisísmica, 2018]

Componentes del disipador de fluido viscoso:

Los disipadores de este tipo son hechos de acero inoxidable y el fluido que amortigua el movimiento por lo general es de aceite de silicona. En la figura 1.5 se puede ver los componentes de este tipo de disipador. El amortiguamiento se atribuye al fluido a través de la cabeza del pistón que es sumergido en el interior del cilindro y el exterior de la cabeza del pistón.



*Fig. 1.5 Componentes del disipador de fluido viscoso [Créditos: Ingeniería sísmica y la construcción civil, 2018]*

## 1.2 COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL DE DISIPADORES DE ENERGÍA SÍSMICA

Pruebas hechas en otros países como Italia, Portugal, Perú; reportan que el comportamiento de los dispositivos de fluencia llegan a soportar fuerzas de 2 t a 50 t con un desplazamiento de fluencia desde 1mm, esto debido a la forma de disipación de energía a través de calor. Se ha mencionado que este tipo de disipadores no necesariamente tienen que ser reemplazados después de un evento sísmico severo, bastará con la inspección visual del dispositivo para determinar si se debe de hacer esta sustitución. En la figura 1.6 se puede ver el comportamiento de un disipador por fluencia ante cargas similares a las de un sismo.

La implementación de disipadores de energía sísmica se basa en aportar propiedades en un sistema estructural tal como la ductilidad y rigidez. Esto genera una respuesta positiva ante fuerzas sísmicas.



*Fig. 1.6 Disipador de fluencia sometido a cargas laterales de corte [créditos: Luis Bozzo Estructuras y Proyectos S.L, 2017]*

### **1.3 RESPUESTA DE ESTRUCTURAS EQUIPADAS CON DISIPADORES DE ENERGÍA SÍSMICA**

En los últimos tiempos se han buscado técnicas y métodos de diseño para salvaguardar las estructuras de los efectos de sismos. Para esto se han implementado el uso de técnicas de control de respuesta sísmica tratando que estas sean viables en costo y funcionales para la reducción de daños estructurales.

El uso de estas técnicas de respuesta está relacionada con el tipo de estructura, su sistema estructural, propósito de diseño (nuevo o rehabilitación), sus condiciones de sitio y la economía a la que este restringida. Estas técnicas tratan de complementar al diseño tradicional de una estructura implementando elementos no estructurales para disipar la mayor parte de la energía sísmica. Estos elementos se colocan específicamente en ciertos puntos de la estructura principal para así aprovechar sus propiedades de disipación en elementos estructurales principales y poder ser detectados después de un evento sísmico para su posible remplazo sin poner en riesgo la estabilidad y funcionalidad de la estructura.

Clasificación de técnicas de control de respuesta:

Según Oviedo, Juan (2009) y Duque, María (2009) estas técnicas se clasifican en técnicas de control pasivo, técnicas de control activo e híbrido.

Las técnicas de control pasivo cuentan con dispositivos como los disipadores de energía histeréticos, viscosos y de fricción. Además de contar con los denominados aisladores de base. Mientras que las técnicas de control activo e híbrido necesitan de algún sistema de energía adicional para su ejecución.

Enfocando la atención en las técnicas de control pasivo se cuenta con las siguientes ventajas para su implementación:

- Procesos sencillos de verificación del estado de los dispositivos para su mantenimiento y remplazo en la vida útil de la estructura.
- Utilizar menos componentes adicionales que intervienen en la respuesta de la edificación ante efectos externos.
- Sencillos procedimientos de análisis y diseño estructural, aptos para la práctica profesional.

En la tabla 1.1 se muestra una comparación de técnicas de control pasivo que en base a prácticas actuales de diseño y construcciones se ven las ventajas de cada tipo de dispositivo según Oviedo, Juan (2009) y Duque, María (2009).

*Tabla 1.1 Comparación de técnicas de control pasivo*

<b>Aspectos</b>	<b>Aisladores</b>	<b>Disipadores histeréticos</b>
<i>Bajo costo de instalación y colocación en obra de los dispositivos de control</i>		X
<i>Larga vida útil de los dispositivos</i>	X	X
<i>Bajo costo de mantenimiento de los dispositivos de control</i>	X	X
<i>Bajo costo de reemplazo de los dispositivos de control</i>		X
<i>Baja probabilidad de reemplazo post-sismo de los dispositivos de control</i>	X	
<i>Bajo costo de fabricación de los dispositivos de control</i>		X
<i>Instalación simple en obra de los dispositivos de control</i>		X
<i>Reducción del daño estructural por sismo</i>	X	X
<i>Simplicidad en el uso para la rehabilitación o reforzamiento de estructuras existentes</i>		X
<i>Simplicidad en la implementación en sistemas de marcos</i>	X	X
<i>Simplicidad en la implementación en sistemas de muros de carga</i>		X
<i>No requiere mano de obra altamente calificada para la instalación de los dispositivos de control</i>		X
<i>Alto control de daño en contenidos</i>	X	
<i>Bajo impacto en las prácticas de construcción actuales</i>		X
<i>Fácil disponibilidad de materiales necesarios para la fabricación</i>		X
<i>Baja interrupción del continuo funcionamiento de estructuras indispensables durante la instalación o reemplazo de dispositivos de control</i>	X	X

Como se muestra en la tabla 1.1 se puede ver que los disipadores histeréticos aportan más ventajas que los aisladores de base, cabe destacar que estos disipadores ofrecen además medidas de rehabilitación y reforzamiento estructural sin comprometer de manera significativa la arquitectura y brindando así una mayor seguridad en comparación con otras técnicas de control.

### *Disipadores histeréticos*

Estos dispositivos disipan energía por fluencia de un material, por ejemplo: acero. El acero ofrece una resistencia y ductilidad buena en comparación con otros materiales, siendo este material ideal para el control de la disipación de la energía. El tipo de acero estructural más utilizado hoy en día es el A36, que ofrece uno de los mejores comportamientos en cuanto a la estabilidad de sus propiedades mecánicas y principalmente su punto de fluencia, siendo este uno de los aspectos muy importantes para la implementación de dispositivos histeréticos por deformación.

### Instalación de disipadores histeréticos

Este tipo de disipadores son instalados en el plano de los marcos del sistema estructural principal. Dependiendo de la geometría de estos dispositivos se pueden conectar a los marcos de diferentes formas. Estas conexiones son las siguientes:

1. Conexión directa
2. Conexión indirecta
3. Conexión con sistemas especiales

#### Conexión directa:

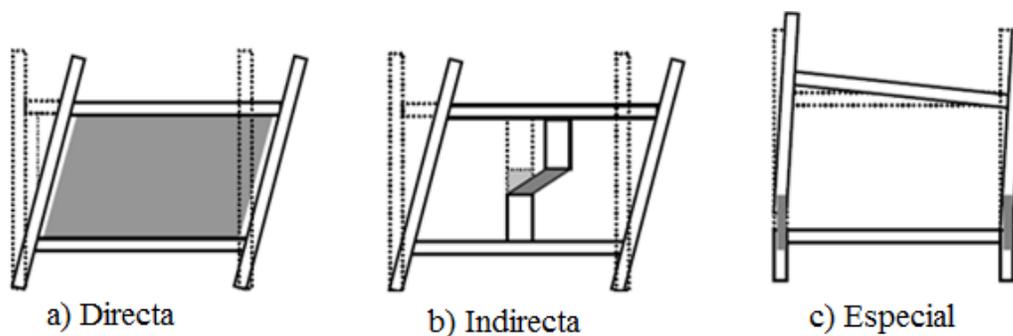
En éste tipo de conexión los dispositivos se conectan directamente a los elementos estructurales del sistema de entrepiso en donde están instalados, controlando los desplazamientos relativos. En la figura 1.7a se puede ver este tipo de conexión.

#### Conexión indirecta:

En éste tipo de conexión los dispositivos se conectan las vigas, controlando el desplazamiento relativo de entrepiso. En la figura 1.7b se puede ver este tipo de conexión.

#### Conexión con sistemas especiales:

En éste tipo de conexión los dispositivos se colocan en vigas o columnas, desconectando los elementos estructurales para que estos trabajen y disipen energía. En la figura 1.7c se puede ver esta conexión.



*Fig. 1.7 Conexiones de dispositivos histeréticos en estructuras [créditos: Revista EIA, 2018]*

Cabe señalar que los disipadores de conexión directa han sido los más utilizados ya que tienen mayor eficiencia y control de respuesta estructural aportando rigidez al sistema evitando vibraciones.

El uso de este tipo de disipadores tiene como requisito la estabilidad de los ciclos de histéresis de los dispositivos ante cargas dinámicas. Esta estabilidad es la que garantiza que las estructuras se comporten de acuerdo a los criterios de análisis y diseño.

El diseño propio de las estructuras está ligado con las fuerzas que esta tiene que soportar dentro de límites aceptables de deformación, si esta no está dentro de límites establecidos la estructura debe modificarse y verificarse nuevamente la deformación, no así para deformaciones que estén dentro de los límites, ya que el nivel de daño estructural puede ser controlado por el nivel de deformación de una estructura.

Según Oviedo, Midorikawa y Asari (2008) al realizar comparaciones de edificaciones de concreto reforzado de 10 niveles con y sin disipadores se demostró que existió una reducción significativa de daño estructural en la estructura principal; esta reducción es de un 60 % en desplazamientos y daños de entre piso. La reducción de desplazamientos se debió al aumento de rigidez del sistema dado por los disipadores, además de la disipación propia de energía de vibración.

## **2 MODELO EXPERIMENTAL**

## 2.1 MATERIALES

Se utilizaron los siguientes materiales para los diferentes componentes que integran el modelo  
*Disipadores*

Se utilizaron 2 tipos de disipadores comerciales conocidos como “SLB”. Cada tipo de disipador tuvo una respectiva resistencia. El primer tipo de disipador (tipo 1) con una resistencia lateral de 5.62 t, mientras que el segundo tipo (tipo 2) con una resistencia de 10.11 t. El material de los disipadores es acero estructural tipo A-36, con una resistencia nominal  $f_y=2550 \text{ kg/cm}^2$ .

Para conectar los disipadores al muro y a la trabe se utilizaron tornillos de alta resistencia de 19 mm y 25 mm. Los tornillos de 19 mm se colocaron horizontalmente entre las placas del disipador y el concreto, mientras que los tornillos de 25 mm se utilizaron para conectar la placa superior con la inferior de los disipadores.

Para cada disipador se utilizó un total de 32 tornillos, 16 para la parte superior y 16 para la parte inferior.

### *Marco de concreto reforzado*

Este modelo consta de elementos prefabricados que cuentan con dos columnas una trabe y un muro como se muestra en la figura 2.1

El concreto utilizado para columnas, trabe y muro presentó una resistencia promedio de  $f'_c=350 \text{ kg/cm}^2$  en pruebas hechas en el laboratorio.

El acero de refuerzo utilizado para estos elementos tiene una resistencia nominal  $f_y=4200 \text{ kg/cm}^2$ .

## 2.2 GEOMETRÍA DEL MODELO

### 2.2.1 Geometría global

Para el experimento se utilizaron los elementos mostrados en la figura 2.1 para conformar el sistema estructural a ensayar. En la figura se muestra la geometría de cada uno. Las columnas están ligadas a la trabe a base de conexiones rígidas atornilladas. A su vez el marco reforzado es unido al muro por los disipadores formando el modelo (marco-disipador-muro).

El modelo en general está anclado por barras de acero y tornillos a una losa de reacción de un espesor de 40 cm y tensadas a 20 t cada una.



### Trabe

Se tiene una trabe de 340 cm de largo con dos conexiones rígidas de 70x60x15 cm. En la figura 2.3 se muestra la geometría de la trabe.

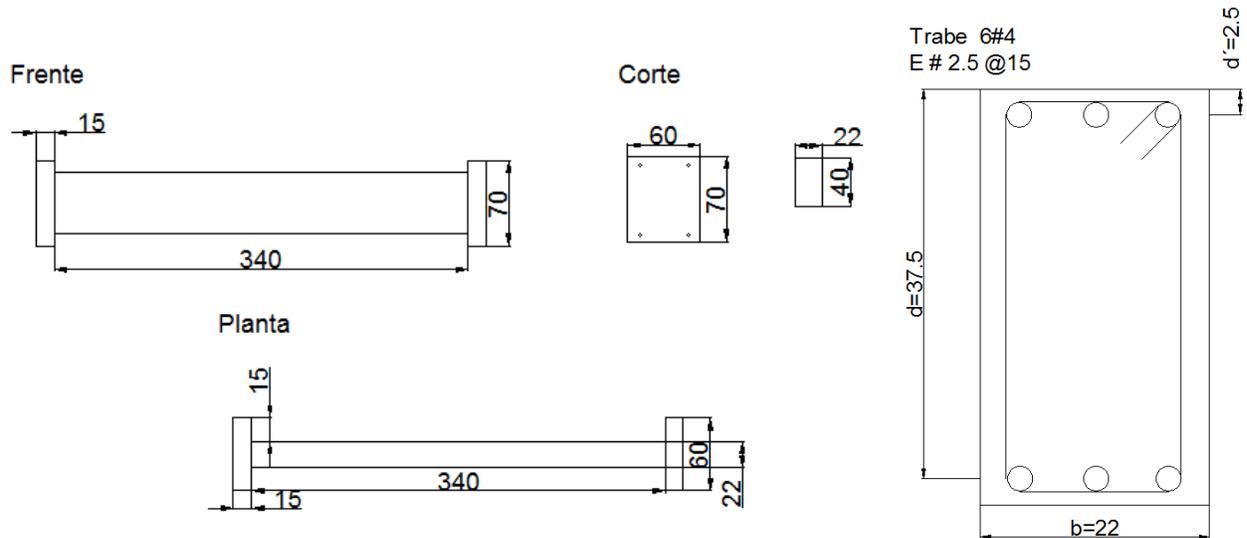


Fig. 2.3 Geometría de la trabe

### Muro

Se tiene un muro de 3.12m de largo por 2m de altura, su espesor es de 15 cm y una base de 312x45x40 cm como se muestra en la figura 2.4.

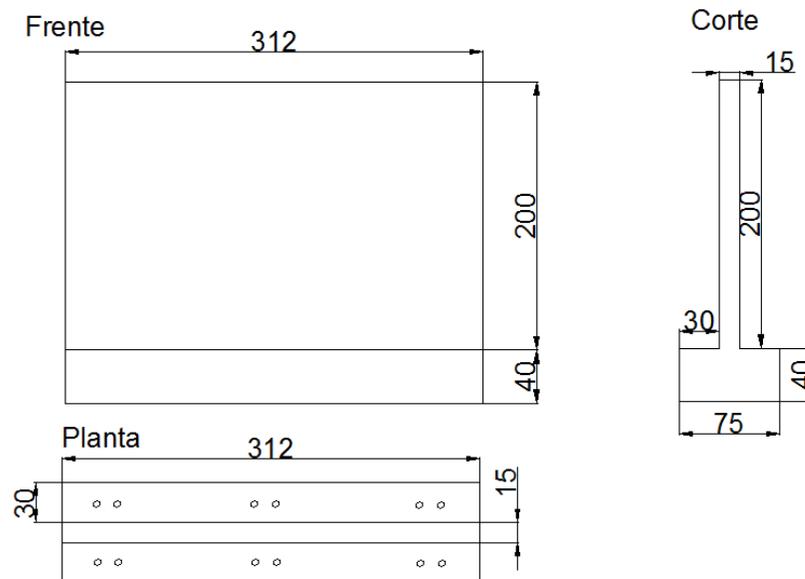


Fig. 2.4 Geometría del muro

## 2.3 DISIPADORES DE ENERGÍA SÍSMICA USADOS

### 2.3.1 Disipadores tipo 1

El primer disipador (tipo 1), con capacidad de 5.62 t presenta la geometría que se especifica en la figura 2.5.

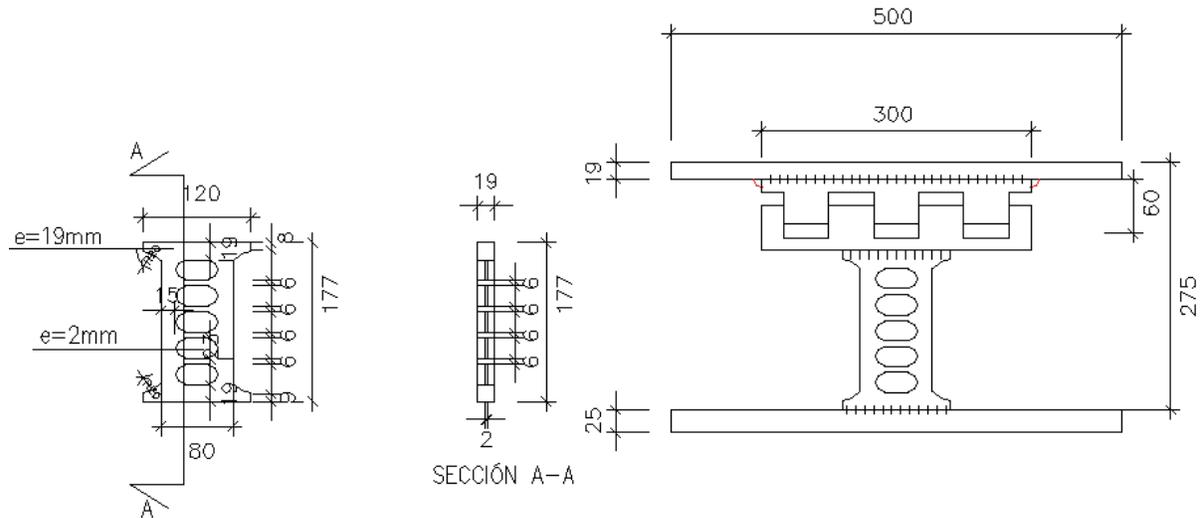


Fig. 2.5 Disipador tipo 1

### 2.3.2 Disipadores tipo 2

El segundo tipo de disipador (tipo 2), con capacidad de 10.11 t, presenta la geometría y características que se especifican en la figura 2.6.

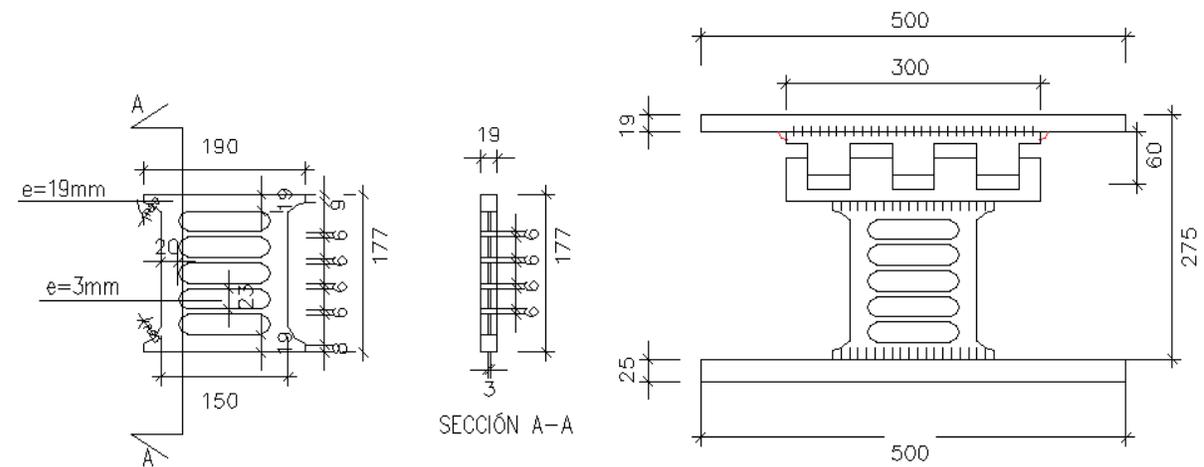
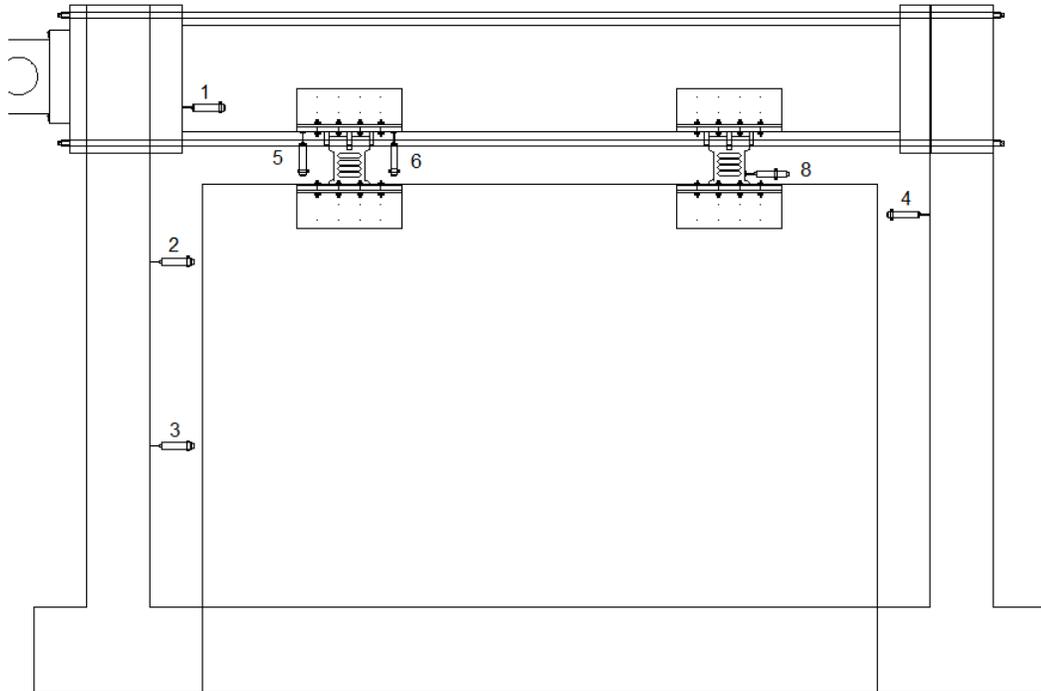


Fig. 2.6 Disipador tipo 2

## 2.4 INSTRUMENTACIÓN

Para instrumentar este modelo se utilizaron transductores de 15 y 30 cm, respectivamente, dependiendo del desplazamiento máximo esperado. Este tipo de instrumentos son usados para frecuencias relativamente bajas y se emplean para medir desplazamientos axiales en ejes con relación a su posición de origen. En total se colocaron 8 transductores alrededor de todo el modelo y se acomodaron como se muestra de la figura 2.7 a la 2.10. Se implementó un actuador que cuenta con un desplazamiento de tensión/compresión máximo de  $\pm 20$  cm y cuenta con una carga máxima de aplicación de  $\pm 100$  t.



*Fig. 2.7 Colocación de transductores en el modelo*



*Fig. 2.8 Colocación de transductor 4*

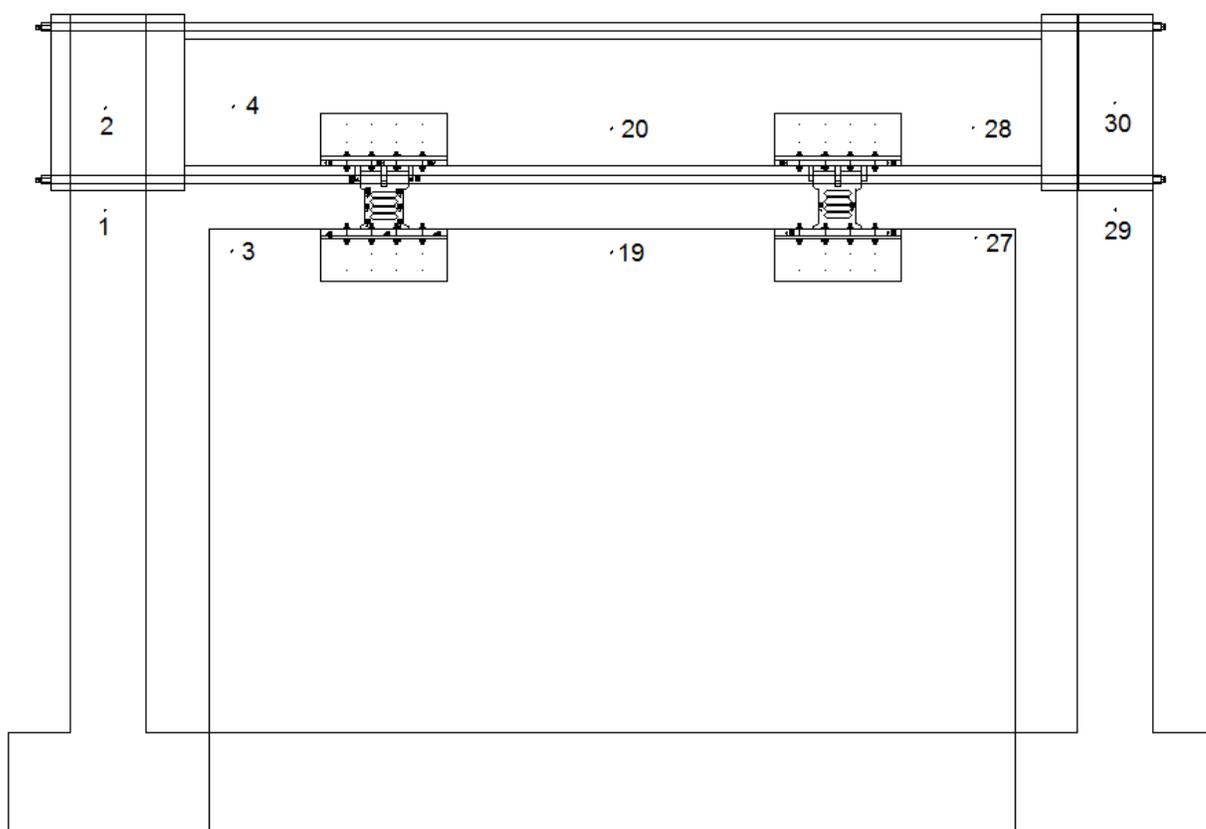


*Fig. 2.9 Colocación de transductor 8*



*Fig. 2.10 Colocación de transductores 5 y 6*

Se utilizaron componentes *Leds* para la ubicación de coordenadas de diferentes puntos del modelo en los cuales se midió el desplazamiento respecto a un punto de origen. La colocación de estos *Leds* se muestra de la figura 2.11 a la 2.14.



*Fig.2.11 Colocación de Leeds sobre el modelo*

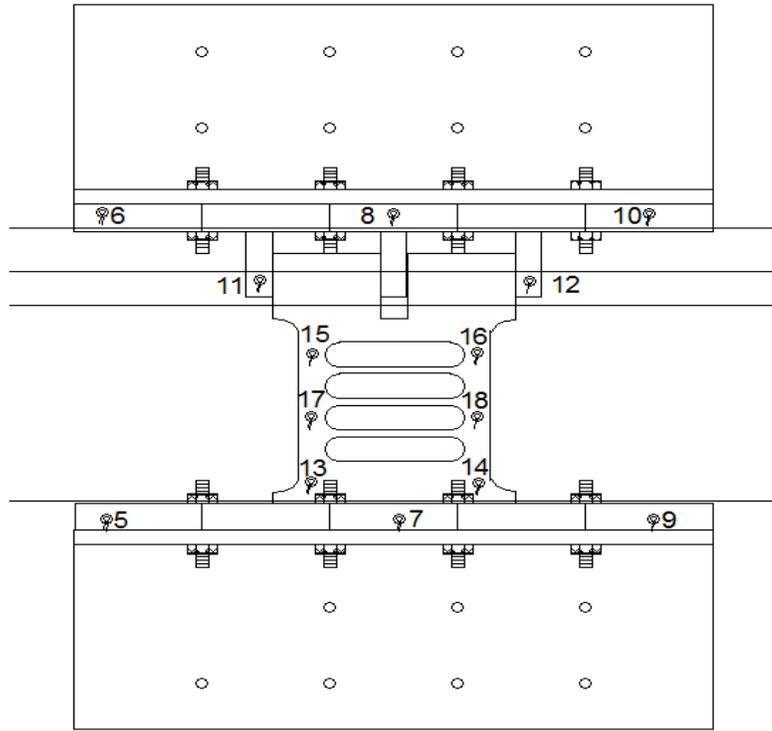


Fig. 2.12 Colocación de Leds sobre el disipador cercano al actuador

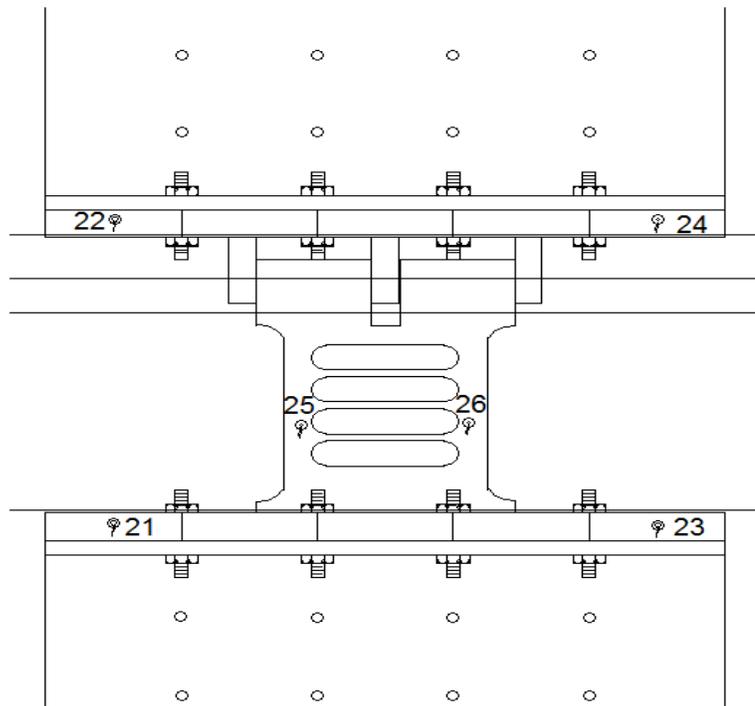


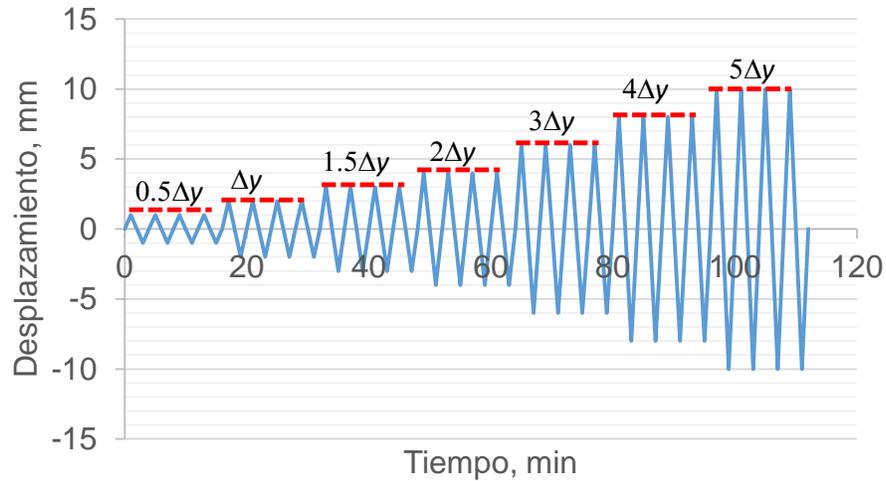
Fig. 2.13 Colocación de Leds sobre el disipador lejano al actuador



*Fig. 2.14 Colocación de Leds sobre el modelo*

## 2.5 PROTOCOLO DE CARGAS

El protocolo de cargas utilizado en estas pruebas cuasi-estáticas consta de ciclos controlados por desplazamiento. En la figura 2.15 se presenta el protocolo utilizado en este experimento. Se siguieron las recomendaciones de ACI 374 R. Se aprecia que se aplicaron cuatro ciclos para cada nivel de desplazamiento objetivo. Se inició con desplazamientos elástico-lineales y se llegó a desplazamientos de cinco veces el desplazamiento de fluencia ( $\Delta y$ ).



*Fig. 2.15 Protocolo de carga para pruebas cuasi-estáticas. [Instituto de Ingeniería, UNAM,2018]*

## 2.6 DESCRIPCION DE PRUEBAS EXPERIMENTALES

En el sistema estructural, cada elemento aporta características específicas, el marco aportara flexibilidad, los disipadores ductilidad y el muro la rigidez.

Es importante mencionar que las pruebas fueron diseñadas para no causar daño alguno en el marco, pues los niveles de deformación que se impusieron a éste están muy por debajo de los niveles que causarían daño. Esto se hizo precisamente con la intención de probar la efectividad de los disipadores sísmicos para proteger la estructura. Es decir, todo el daño se concentra en los disipadores mientras que el marco principal permanece sin daño alguno. De estudios numéricos y experimentales, se estima que el marco fluye a un desplazamiento cercano de 15 mm. Por lo tanto, los desplazamientos máximos que se impusieron al sistema marco-disipador fueron menores a 15 mm. Con eso se asegura que no se causara daño al marco existente.

Para este modelo experimental se utilizaron disipadores de tipo comercial mejor conocidos como SLB. Estos disipadores constan de placas metálicas que disipan energía por fluencia del metal generado por la aplicación de cargas laterales.

Para las pruebas, se utilizaron dos tipos de disipadores ya mencionados. El primero tendrá una capacidad de carga a la fluencia de 5.62 t y el segundo 10.11 t. Detalles de la geometría y capacidades se muestran en la tabla 2.1.

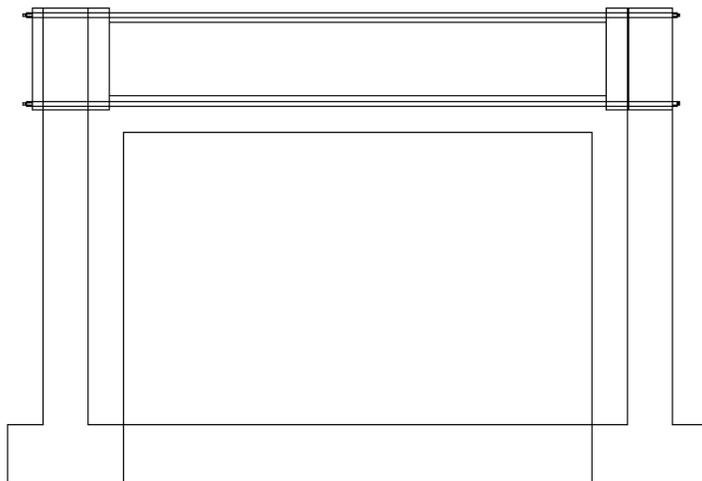
*Tabla 2.1 Propiedades de los disipadores*

<i>Propiedad</i>	<i>Valor para disipador</i>		<i>Unidades</i>
	Tipo 1	Tipo 2	
<i>Altura total</i>	300	300	mm
<i>Ancho total</i>	500	500	mm
<i>Carga de fluencia</i>	5.62	10.11	t
<i>Carga última</i>	8.43	15.17	t
<i>Desplazamiento de fluencia</i>	2	2	mm
<i>Desplazamiento último</i>	20	20	mm

En este modelo experimental se realizaron 3 pruebas diferentes. La primera prueba consistió en el ensayo del marco sin ningún tipo de disipador. La segunda consistió en el ensayo del modelo con los disipadores del tipo 1 y la última consistió en ensayar el modelo con los disipadores tipo 2. A continuación se describe puntualmente cada una de ellas.

### 2.6.1 Modelo experimental sin disipador (SD)

Esta prueba se realizó con el modelo del marco sin ningún tipo de disipador (Figura 2.16). Se realizó la prueba satisfactoriamente para desplazamientos de 1mm, 2mm, 3mm, 4mm, 6mm, 8mm, 10mm, 12mm, 14mm y 15 mm.



*Fig. 2.16 Modelo sin disipador*

### 2.6.2 Modelo experimental con disipador tipo 1

Para esta prueba se montaron 2 disipadores del tipo 1 en la parte superior del muro uniéndolo con la trabe del marco reforzado (Figuras 2.17 y 2.18). Se aplicaron 4 ciclos de carga como en la sección anterior.



*Fig. 2.17 Colocación del disipador tipo 1*

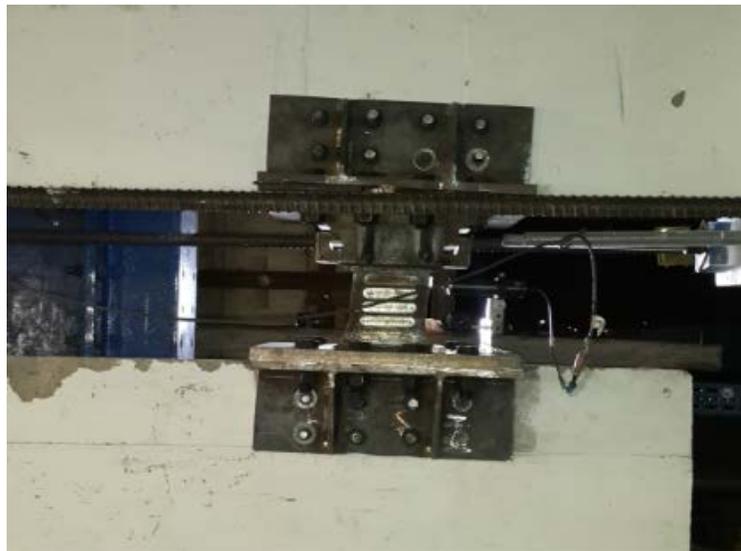


*Fig.2.18 Modelo con disipadores del tipo 1*

Los desplazamientos para los cuales se realizó la prueba fueron a 1mm, 2mm, 3mm, 4mm, 6mm, 8mm, 10mm, 12mm, 14mm y 18mm.

### **2.6.3 Modelo experimental con disipador tipo 2**

Después de haber ensayado el marco con los disipadores tipo 1 se montaron los disipadores del tipo 2 en la parte superior del muro (Figura 2.19). Para esta prueba se aplicaron 4 ciclos de carga y descarga para desplazamientos de 1 mm, 2mm, 3mm, 4mm, 6mm, 8mm, 10mm, 14mm y 18 mm.



*Fig. 2.19 Colocación del disipador tipo 2*

## 2.7 COMPORTAMIENTO EXPERIMENTAL

El comportamiento que se presentó en cada prueba tuvo características particulares, dependiendo de las cargas aplicadas respecto al desplazamiento deseado. De cada una de ellas se describe su respectivo comportamiento.

### 2.7.1 Comportamiento sin disipador (SD)

El comportamiento del modelo sin ningún tipo de disipador se realizó a un desplazamiento máximo de 18 mm y tuvo un comportamiento elástico lineal. El marco presentó fisuras mínimas de flexión al someterse al máximo desplazamiento aplicado.

Estas fisuras se presentan en la figura 2.20. Una vez que se retiró la carga las fisuras se cerraron.



*Fig. 2.20 Fisura en la parte media de la columna*

### 2.7.2 Comportamiento disipador tipo 1

La prueba con el disipador tipo 1 se realizó hasta un desplazamiento máximo de 18 mm. El disipador presentó esfuerzo cortante sobre su alma del disipador (Figura 2.21). Posteriormente, el alma comenzó a presentar torsión (Figura 2.22) debido al desplazamiento del patín superior que comenzó a salir de su posición, esto sucedió en el disipador más cercano del actuador.

Mientras que el disipador más lejano al actuador solo sufrió deformaciones laterales menores (Figura 2.23) y un pandeo ligero en el alma (Figura 2.24)

Esta prueba se realizó satisfactoriamente para el desplazamiento máximo objetivo que fue de 18mm.



*Fig. 2.21 Esfuerzo cortante en el alma del dissipador*



*Fig. 2.22 Torsión en el alma del dissipador*



*Fig. 2.23 Deformación lateral mínima*



*Fig. 2.24 Pandeo mínimo del alma*

El modelo además de presentar afectaciones en los dissipadores, presentó algunas fisuras menores, principalmente en el cuerpo de las columnas como se puede apreciar en las figuras 2.25 y 2.26.



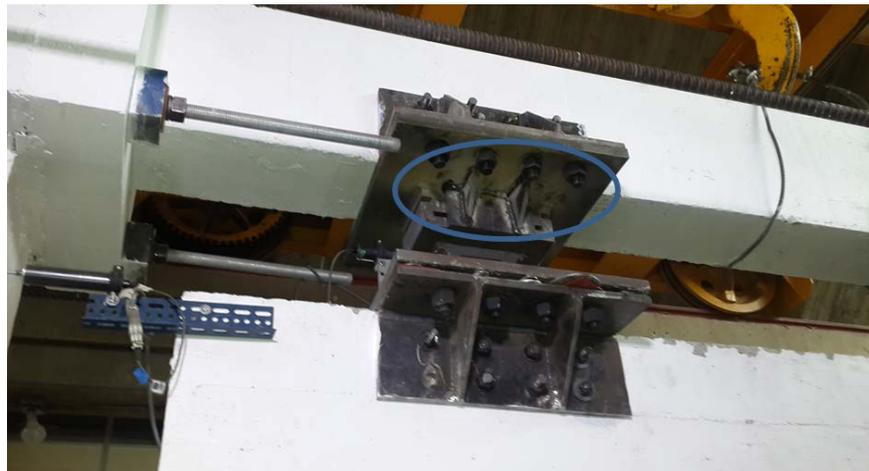
*Fig. 2.25 Fisura en la base de la columna*      *Fig.2.26 Fisura en la parte media dela columna*

Estas fisuras se presentaron durante los desplazamientos máximos de 14 y 18 mm, respectivamente, y se cerraron al retirar la carga del actuador hidráulico.

### **2.7.3 Comportamiento disipador tipo 2**

A esta prueba se le realizó una adecuación adicional para los disipadores tipo 2, esto debido a lo que se presentó en la prueba con los disipadores del tipo 1 para evitar que la placa superior del disipador se deslizara fuera del plano y generara torsión en el alma del disipador.

Se añadieron topes de placa, como se muestra en la figura 2.27, para evitar estos movimientos y así mejorar el comportamiento del disipador ante las cargas aplicadas.



*Fig. 2.27 Disipador tipo 2 con tope lateral*

La figura 2.28 muestra el estado de deformación de uno de los disipadores tipo 2 durante la aplicación del desplazamiento máximo.



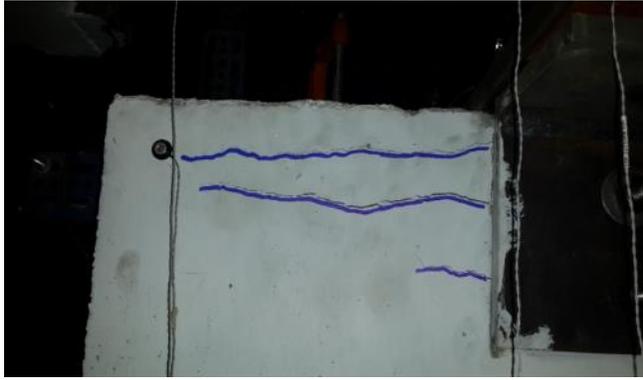
*Fig. 2.28 Deformación lateral del disipador tipo 2*

Al final, esta prueba se realizó satisfactoriamente para el desplazamiento máximo objetivo de 18mm.

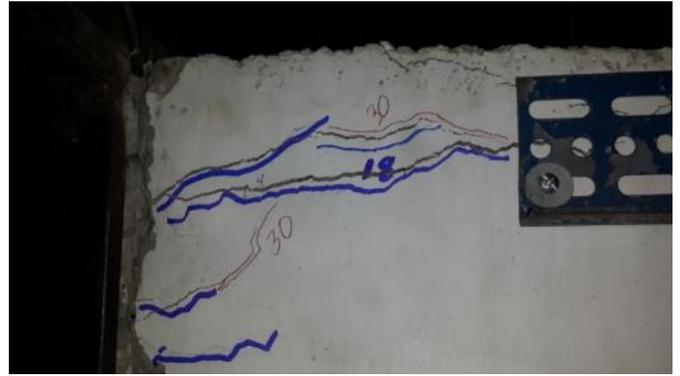
Al igual que en la prueba con los disipadores del tipo 1 se presentaron, fisuras para el desplazamiento máximo de 18 mm en las columnas y esta vez también en el muro.

Esta prueba fue originalmente considerada para un desplazamiento máximo de 18 mm. Sin embargo, al ver que el modelo tenía una capacidad mayor, se decidió aumentar el nivel de desplazamientos para entender el desplazamiento total que podría acomodar.

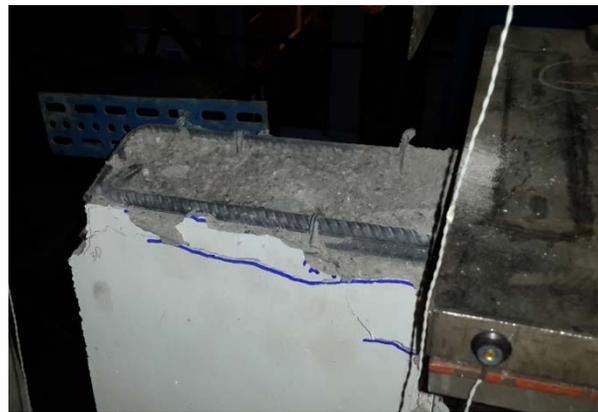
Se implementaron desplazamientos de 18, 24,30 y 35 mm. Se presentaron agrietamientos considerables del modelo, principalmente en la unión del muro y el disipador (Figuras 2.29 y 2.30). Se observa el desconchamiento del concreto en la parte superior del muro debido a que estaba sujeta a la fuerza inducida por el disipador (Figuras 2.31 y 2.32).



*Fig. 2.29 Formación de grietas a 24 mm*



*Fig. 2.30 Formación de grietas a diferentes desplazamientos*



*Fig. 2.31 Falla del muro en la conexión del lado izquierdo.*



*Fig. 2.32 Falla del muro en la conexión del lado derecho.*

Al estar ensayando el modelo a un desplazamiento de 35 mm se detuvo la prueba debido a que el dissipador ya no estaba cumpliendo su función de proteger a la estructura, además, se podría dañar el equipo de medición.

### **3 RIGIDEZ Y RESISTENCIA DE ELEMENTOS ESTRUCTURALES**

Después de haber realizado el ensayo del modelo experimental se obtuvieron las resistencias teóricas y experimentales de los disipadores. A continuación, se muestran los valores obtenidos.

### 3.1 RESISTENCIA TEÓRICA Y EXPERIMENTAL

#### *Resistencia teórica*

La resistencia teórica cortante obtenida para los disipadores se obtuvo haciendo un corte transversal en el alma del disipador, obteniendo así una sección tipo I, para la cual se utilizó la fórmula de resistencia cortante que se puede encontrar en libro de mecánica de materiales (Popov 1990, pág. 377). La cual establece que la resistencia cortante es igual al esfuerzo nominal de fluencia por el área efectiva del alma de la sección transversal. Es decir

$$V = f_y A_w \quad (3-1)$$

De dónde:

V: Resistencia cortante

$f_y$  : Esfuerzo nominal de fluencia

$A_w$ : Área transversal del alma

#### *Resistencia experimental*

La resistencia experimental se determinó por la máxima carga horizontal aplicada para cada nivel de desplazamiento.

Es importante señalar que a las máximas cargas aplicadas de cada prueba se les restó, la resistencia que aporta el marco sólo, que en este caso resultó de 7.3255 t aplicado a un desplazamiento máximo de 14 mm, esto se hizo para saber la resistencia real de los disipadores. Estas resistencias se obtuvieron para un nivel máximo y a la fluencia del disipador. Teniendo así

$$V_{exp} = P_{tot} - P_{marco} \quad (3-2)$$

De donde:

$V_{exp}$  : Resistencia cortante experimental

$P_{tot}$  : Carga total lateral

$P_{marco}$  : Carga del marco

### 3.1.1 Resistencia disipador tipo 1

Para el cálculo de la resistencia teórica a la fluencia ( $V_{y1}$ ) del disipador tipo 1 se utilizó la fórmula (3-1) teniendo los siguientes datos del área transversal (Figura 3.1) y teniendo el esfuerzo nominal de fluencia para acero A-36 igual a  $f_y=2550 \text{ kg/cm}^2$

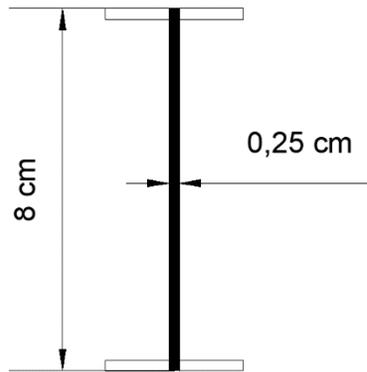


Fig.3.1 Geometría transversal tipo 1

Entonces:

$$V_{y1} = (2550)(8.0)(0.25)$$

$$V_{y1} = 5100 \text{ Kg} = 5.10 \text{ t}$$

La resistencia experimental máxima del disipador tipo 1 fue de 24.05 t para un desplazamiento máximo de 14 mm. Teniendo en cuenta que la carga que aporta el marco por si solo es de 7.32 t entonces la resistencia real de los dos disipadores será la diferencia de la carga total menos la del marco. Utilizando la expresión (3-2) tenemos:

$$V_{\text{exp máx } 1} = 24.05 - 7.32 = 16.73 \text{ t}$$

Teniendo así para un solo disipador:

$$V_{\text{exp máx } 1} = \frac{16.73}{2} = 8.36 \text{ t}$$

La resistencia experimental a fluencia del disipador tipo 1 fue de 10.19 t para un desplazamiento máximo de 2 mm. Teniendo en cuenta que la carga que aporta el marco por si solo es de 0.84 t entonces la resistencia real de los dos disipadores será la diferencia de la carga total menos la del marco. Utilizando la expresión (3-2) y la figura 3.3 tenemos:

$$V_{\text{exp}y1} = 10.19 - 0.84 = 9.35 \text{ t}$$

Teniendo así para un solo disipador:

$$V_{\text{exp}y1} = \frac{9.35}{2} = 4.67 \text{ t}$$

### 3.1.2 Resistencia disipador tipo 2

Al igual que inciso anterior se calculó la resistencia a la fluencia teórica para el disipador tipo 2 con la expresión (3-1) teniendo el área transversal (Figura 3.2) y la resistencia nominal de fluencia del acero A-36.

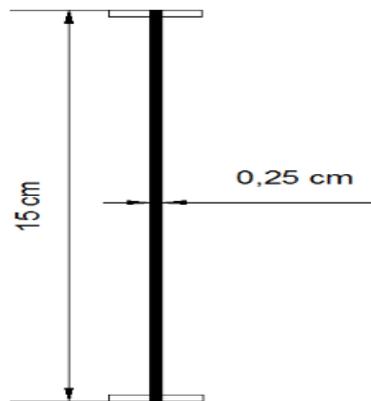


Fig. 3.2 Geometría transversal tipo 2

Entonces:

$$V = (2550)(15)(0.25)$$

$$V = 9562.5 \text{ Kg} = 9.56 \text{ t}$$

La resistencia experimental máxima del disipador tipo 2 fue de 34.2844 t para un desplazamiento máximo de 14 mm. Teniendo en cuenta que la carga que aporta el marco por si solo es de 7.3255 t entonces la resistencia real de los dos disipadores será la diferencia de la carga total menos la del marco. Utilizando la expresión (3-2) tenemos:

$$V_{\text{exp} \text{máx}} = 34.28 - 7.32 = 26.69 \text{ t}$$

Teniendo así para un solo disipador:

$$V_{\text{exp máx}} = \frac{26.96}{2} = 13.34 t$$

La resistencia experimental a fluencia del disipador tipo 2 fue de 13.25 t para un desplazamiento máximo de 2 mm. Teniendo en cuenta que la carga que aporta el marco por si solo es de 0.84 t entonces la resistencia real de los dos disipadores sería la diferencia de la carga total menos la del marco. Utilizando la expresión (3-2) y la figura 3.3 tenemos:

$$V_{\text{exp y2}} = 13.25 - 0.84 = 12.41 t$$

Teniendo así para un solo disipador:

$$V_{\text{exp y2}} = \frac{12.41}{2} = 6.20 t$$

## 3.2 COMPARACIÓN DE RESISTENCIAS TEORICAS Y EXPERIMENTALES

### *Comparación teórica*

De las resistencias teóricas a fluencia obtuvieron resultados diferentes para ambos disipadores. Para estos resultados se obtuvo el error relativo con la siguiente ecuación:

$$\% E = \frac{|V_{y \text{ teórica}} - V_{y \text{ experimental}}|}{V_{y \text{ teórica}}} \times 100 \quad (3-3)$$

#### Disipador tipo 1

Se obtuvo una resistencia experimental a fluencia de 4.67 t, mientras que teóricamente se obtuvo una resistencia a fluencia de 5.10 t.

Utilizando la ecuación (3-3) se tiene:

$$\% E = \frac{|5.10 - 4.67|}{5.10} \times 100 = 8.43 \%$$

#### Disipador tipo 2

Se obtuvo una resistencia experimental a fluencia de 6.20 t, mientras que teóricamente se obtuvo una resistencia a fluencia de 9.56 t.

Utilizando la ecuación (3-3) se tiene:

$$\% E = \frac{|9.56 - 6.20|}{9.56} \times 100 = 35.14 \%$$

### *Comparación experimental*

En la comparación experimental tomamos un desplazamiento fijo de 14 mm para las tres pruebas, las cuales mediante los datos proporcionados por los transductores se obtuvieron las cargas para este nivel de desplazamiento.

En la figura 3.3 se muestra el comportamiento experimental de las tres pruebas realizadas.

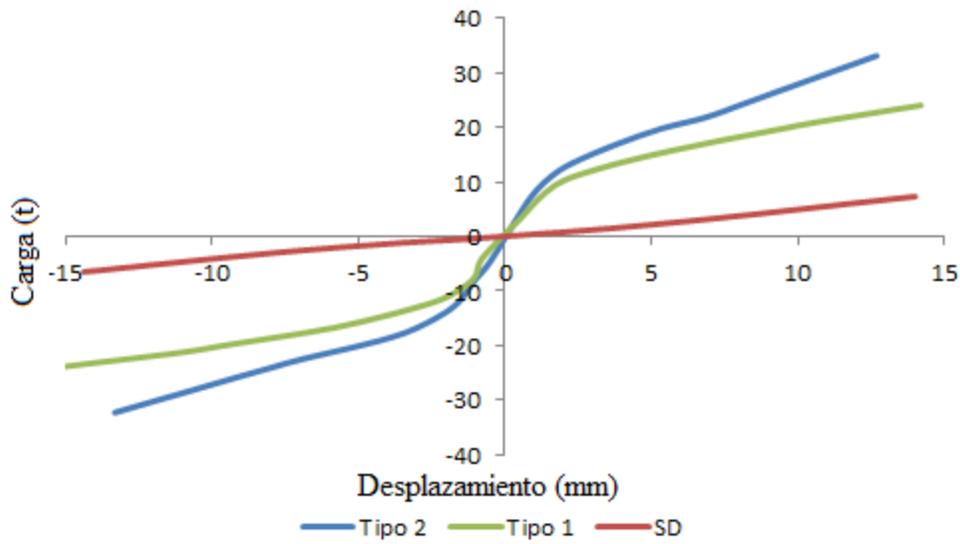


Fig. 3.3 Curvas carga-deformación de las 3 pruebas realizadas

#### Comparación experimental máxima y a fluencia

En la figura 3.4 se puede ver que, para la prueba con el disipador tipo 1, su máxima carga fue de 24.05 t para un desplazamiento de 14 mm. Restando el valor al del marco sin disipador de 7.32 t se obtiene una resistencia de los dos disipadores tipo 1 de 16.73 t.

De manera similar, para la prueba con el disipador tipo 2, la carga máxima fue de 34.28 t para el desplazamiento de 14 mm. Restando el valor del marco sin disipador, se tiene una resistencia de 26.96 t.

Estos resultados corroboran los cálculos obtenidos en las secciones 3.1.1 y 3.1.2 para los valores de resistencia máxima.

Así mismo se observan los valores experimentales a fluencia, para el caso del disipador tipo 1, su máxima carga fue de 10.19 t para un desplazamiento a la fluencia de 2mm. Restando el valor del marco sin disipador de 0.84 t se obtiene una resistencia de 9.35 t.

De manera similar para el caso del disipador tipo 2, su máxima carga fue de 13.25 t para un desplazamiento a la fluencia de 2 mm. Restando el valor del marco sin disipador de 0.84 t se obtiene una resistencia de 12.41 t.

Estos resultados corroboran los obtenidos en las secciones 3.1.1 y 3.1.2 para los valores de resistencia a la fluencia.

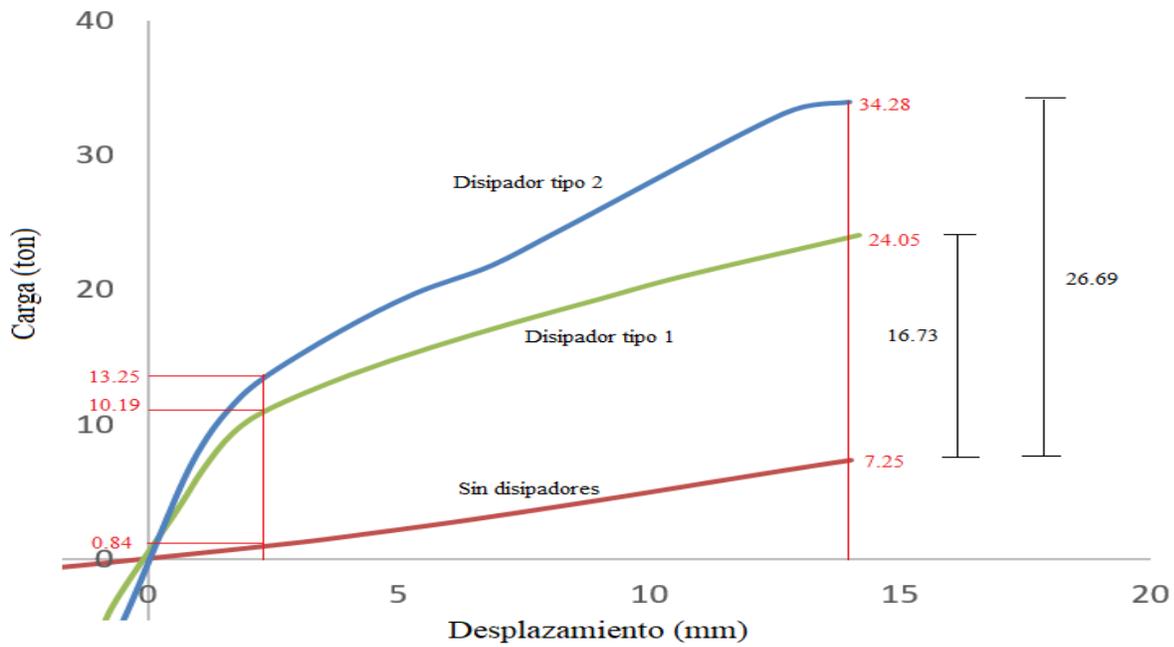


Fig. 3.4 Comparación de resistencias máximas y a fluencia

### 3.3 RIGIDEZ DEL MODELO

En este subcapítulo se obtiene la rigidez para el modelo en conjunto (marco-disipadores).

Para las tres pruebas realizadas se observó que el modelo tuvo un comportamiento elástico-lineal hasta llegar a un desplazamiento cercano a 2 mm.

En la figura 3.5 se puede apreciar la zona elástica-lineal para las tres pruebas, así como los límites de carga en los que se presentó dicho comportamiento.

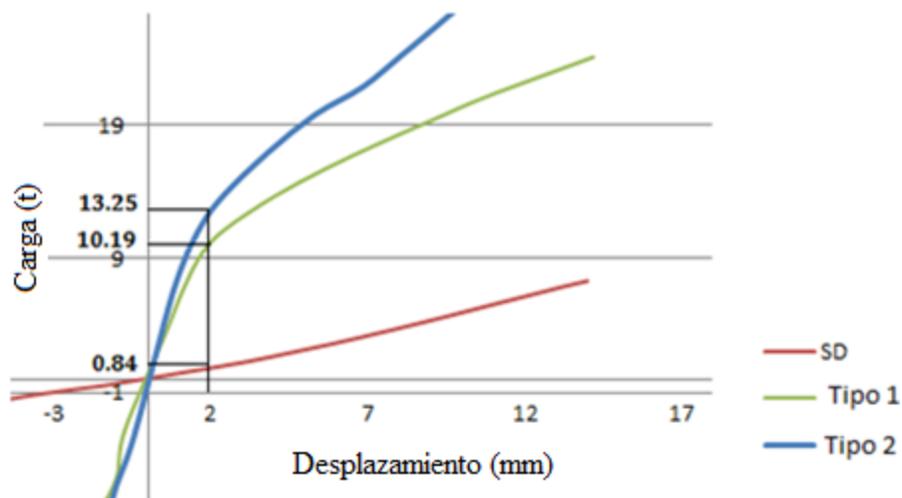


Fig. 3.5 Comportamiento elástico lineal de las 3 pruebas

Se puede ver que el comportamiento elástico-lineal para el disipador tipo 1 se presentó a una carga de 10.19 t donde comenzó a fluir el acero.

Así mismo, para el disipador tipo 2 se presentó este comportamiento a una carga de 13.25 t. Se puede apreciar que el disipador tipo 1 y el disipador tipo 2 presentaron comportamiento inelástico para desplazamientos mayores a 2 mm.

Es importante señalar que el comportamiento del marco sin disipador mantuvo un comportamiento elástico-lineal a lo largo de toda la prueba. Para fines del cálculo de la rigidez se tomó un valor de 0.84 t para el desplazamiento de 2 mm.

Para calcular la rigidez de los disipadores se usó el cociente de la fuerza entre el desplazamiento de fluencia. Teniendo así

$$K = \frac{p_y}{d_y} \quad (3-4)$$

De donde:

$K$  : Rigidez

$p_y$  : Carga lateral a la fluencia

$d_y$  : Desplazamiento de fluencia

### 3.3.1 Rigidez del modelo con disipador tipo 1

Para el cálculo de la rigidez elástica del disipador tipo 1 ( $K_1$ ) debemos de tener en cuenta que busquemos sólo la rigidez del disipador, lo que conlleva a descartar la rigidez del marco. Esto es, restar la rigidez del marco sin disipador a la rigidez del sistema marco-disipador.

Utilizando la expresión (3-4) se tiene:

$$K_1 = \frac{P_{y1} - P_{marco}}{d}$$

En dónde  $P_{y1}$  y  $P_{marco}$  se determinan en la figura 3.4 y 3.5, Entonces:

$$K_1 = \frac{10.19 - 0.84}{2} = 4.67 \frac{t}{mm}$$

### 3.3.2 Rigidez del modelo con disipador tipo 2

Para el cálculo de la rigidez de los disipadores del tipo 2 ( $K_2$ ), al igual que en el caso anterior se debe restar la rigidez del marco sin disipador a la rigidez del sistema marco-disipador.

Utilizando la expresión (3-4) se tiene:

$$K_1 = \frac{P_{y2} - P_{marco}}{d}$$

En donde  $P_{y2}$  y  $P_{marco}$  se determinan en la figura 3.4 y 3.5.

$$K_2 = \frac{13.25 - 0.84}{2} = 6.205 \frac{t}{mm}$$

### 3.4 DEFORMACIÓN EXPERIMENTAL DEL MURO

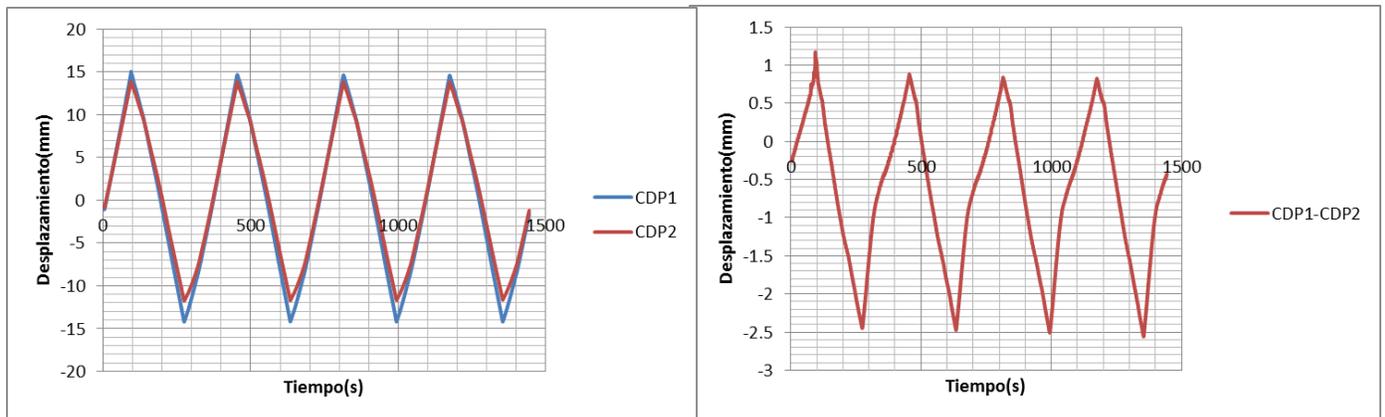
Durante el análisis de la información experimental, se observó que el muro de concreto reforzado sufrió deformaciones importantes.

Se revisó cuidadosamente la deformación del muro para cada prueba, pues ésta influyó en el cálculo de las propiedades de cada tipo de disipador debido a que se había estimado una deformación total del disipador sin considerar la deformación que aporta el muro.

Mediante los datos obtenidos por los transductores y Leds de la instrumentación del modelo se pudo observar que el muro efectivamente presentó una deformación.

Estas deformaciones se presentaron tanto para el ensayo del modelo con los disipadores tipo 1, como para el tipo 2. A continuación se observará el comportamiento de la deformación del muro para cada tipo de prueba.

#### 3.4.1 Deformación experimental del muro con el disipador tipo 1



a) Comparación CDPS 1 y 2

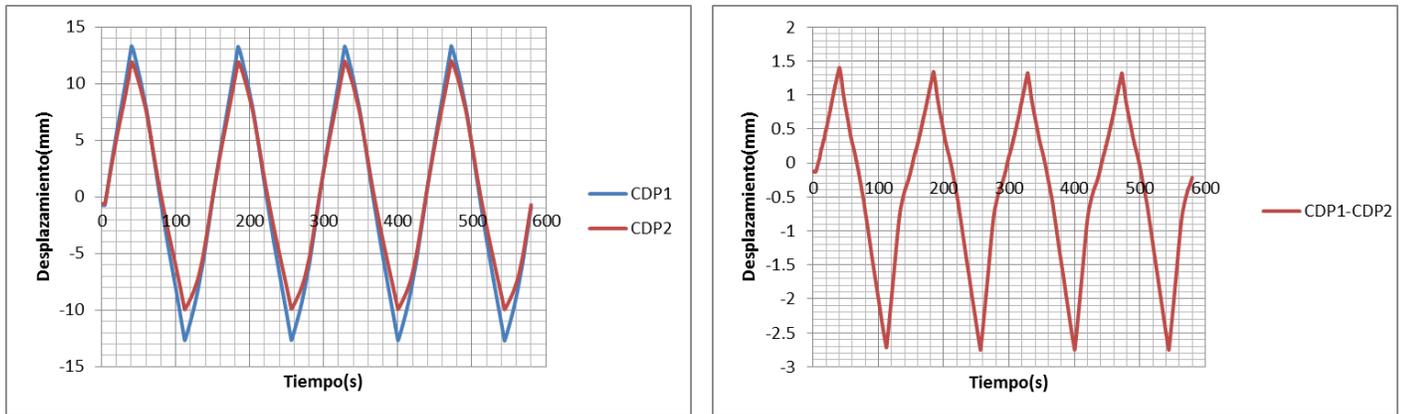
b) Diferencia de CDP1 y CDP2

Fig.3.6 Deformación en el muro con disipador tipo 1

En la figura 3.6a se pueden observar los desplazamientos obtenidos para el transductor 1 y el transductor 2 (ver figura 2.7), estos transductores están colocados en el marco y muro además de ser también los más cercanos al actuador.

En la figura 3.6b se observa la resta de desplazamientos del transductor 1 menos los desplazamientos del transductor 2, resultando así un desplazamiento real del muro, con los disipadores del tipo 1, cercano a 1 mm en la parte positiva y 2.5 mm en la parte negativa.

### 3.4.2 Deformación experimental del muro con el disipador tipo 2



a) Comparación CDPS 1 y 2

b) Diferencia de CDP1 y CDP2

Fig. 3.7 Deformación del muro con disipador tipo 2

En la figura 3.7a se muestra el comportamiento de los transductores 1 y 2. En la gráfica 3.7b se muestra la diferencia de los dos transductores; teniendo, en la parte positiva de la gráfica una deformación del muro con los disipadores del tipo 2 cercana a 1.5 mm. Por otra parte, el lado negativo la deformación del muro fue cercana a 2.8 mm.

### 3.5 RIGIDEZ EFECTIVA DE LOS DISIPADORES

Una vez calculada la deformación del muro, se calculó la rigidez efectiva de los disipadores ya que en el cálculo de la rigidez del modelo como conjunto (marco-disipadores), calculado anteriormente, no se consideró la deformación del muro.

Para calcular la rigidez de cada tipo de disipador se realizó el análisis detallado de la siguiente información:

Sabiendo que el muro sufre una deformación tenemos ahora un triángulo formado por, marco-disipadores-muro. Si a la carga máxima ejercida sobre el modelo se le resta la carga del marco solo, se obtiene la carga que soporta únicamente los disipadores y el muro. Así tendríamos

$$P_{dis+muro} = P_{Total} - P_{Marco} \quad (3-5)$$

Teniendo así (para la carga de los disipadores más la del muro) una reducción de la carga efectiva que resisten juntos. Dado que el disipador transfiere la carga directamente al muro, se puede representar el sistema muro-disipador como dos resortes trabajando en serie como se ve en la figura 3.8.

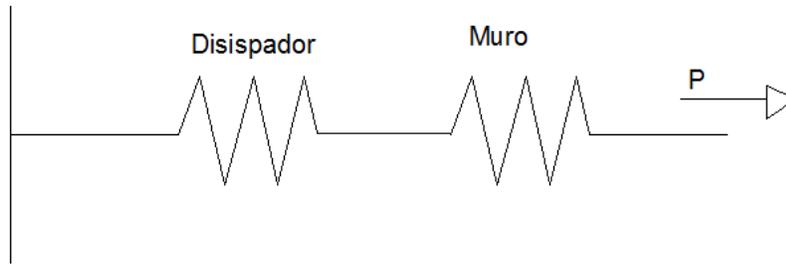


Fig. 3.8 Representación del sistema

así , por equilibrio:

$$P_{Total} = P_{muro} = P_{disip} \quad (3-6)$$

$P_{Total}$  : Carga total del sistema

$P_{muro}$  : Carga que soporta el muro

$P_{disip}$  : Carga que soporta los disipadores

Por compatibilidad de deformaciones, el desplazamiento total ( $d_{Total}$ ) se determina como:

$$d_{Total} = d_{muro} + d_{disipador} \quad (3-7)$$

$d_{Total}$  : Deformación del sistema

$d_{muro}$  : Deformación del muro

$d_{disipador}$  : Deformación de los disipadores

Ahora bien, si sabemos que:

$$K = \frac{P}{d} \quad (3-8)$$

Sustituyendo el desplazamiento en la expresión (3-6) tendríamos:

$$\frac{P_{Total}}{K_{Total}} = \frac{P_{muro}}{K_{muro}} + \frac{P_{disip}}{K_{disip}}$$

Simplificando de (3-5)

$$\frac{1}{K_{Total}} = \frac{1}{K_{muro}} + \frac{1}{K_{disip}} \quad (3-9)$$

Para obtener es la rigidez del disipador ( $K_{disip}$ ), basta con calcular el valor de la rigidez del muro ( $K_{muro}$ ); sabiendo que la rigidez total ( $K_{Total}$ ) se calculó anteriormente en el subíndice 3.3.1 y 3.3.2

Obteniendo la  $K_{muro}$ :

De (3-8) para el muro

$$K_{muro} = \frac{P_{muro}}{d_{muro}} \quad (3-10)$$

Despejando de (3-9) tenemos:

$$\frac{1}{K_{disip}} = \frac{1}{K_{Total}} - \frac{1}{K_{muro}} \quad (3-11)$$

### 3.5.1 Rigidez efectiva del disipador tipo 1

Usando la ecuación (3-5)

$$P_{dis+muro} = P_{Total} - P_{Marco}$$

$$10.19 - 0.84 = 9.35 \text{ t}$$

Ahora para calcular la rigidez del muro ( $K_{muro}$ ), se utiliza la ecuación (3-10); sabiendo que la deformación del muro para el disipador tipo 1 fue de 1 mm.

Entonces:

$$K_{muro} = \frac{P_{muro}}{d_{muro}} = \frac{9.35}{1} = 9.35 \frac{\text{t}}{\text{mm}}$$

Teniendo los valores de la rigidez del muro y la total se usa la ecuación (3-11) para calcular la rigidez de los disipadores, es decir:

$$\frac{1}{K_{disip}} = \frac{1}{4.675} - \frac{1}{9.35}$$

por lo que:

$$K_{disip} = \frac{1}{0.1069} = 9.35 \frac{t}{mm}$$

El valor de la rigidez obtenido es para los dos disipadores del tipo 1, entonces, para cada uno:

$$K_{disip} = \frac{9.35}{2} = 4.67 \frac{t}{mm}$$

### 3.5.2 Rigidez efectiva del disipador tipo 2

Usando la ecuación (3-5)

$$P_{dis+muro} = P_{Total} - P_{Marco}$$

$$13.25 - 0.84 = 12.41 t$$

Y la rigidez del muro ( $K_{muro}$ ) se calcula con la ecuación (3-10); sabiendo que la deformación del muro para el disipador tipo 2 fue de 1.4 mm. Entonces:

$$K_{muro} = \frac{P_{muro}}{d_{muro}} = \frac{12.41}{1.4} = 8.86 \frac{t}{mm}$$

Teniendo los valores de la rigidez del muro y la total, con la ecuación (3-11):

$$\frac{1}{K_{disip}} = \frac{1}{6.205} - \frac{1}{8.8642}$$

es decir:

$$K_{disip} = 20.68 \frac{t}{mm}$$

Sabiendo que este valor de la rigidez obtenido es para los dos disipadores del tipo 2, entonces para cada uno.

$$K_{disip} = \frac{20.6838}{2} = 10.34 \frac{t}{mm}$$

### 3.6 COMPARACIÓN DE RIGIDECES TEÓRICAS Y EXPERIMENTALES

Se obtuvo la rigidez teórica de los disipadores con la ecuación (3-12) la cual se obtuvo en libro de mecánica de materiales de Popov (1990, pág. 172), la cual establece lo siguiente:

$$k_s = \frac{GA}{t} \tag{3-12}$$

Dónde:

$k_s$  : Constante de rigidez

$G$  : Módulo de rigidez a cortante (784193 Kg/cm<sup>2</sup>)

$A$  : Área de la sección a cortante

$t$  : Peralte efectivo

*Rigidez teórica del disipador tipo 1*

De las figuras 2.5 y 3.1 se obtiene la geometría del disipador y se aplica la ecuación (3-12):

$$k_{s1} = \frac{(784193)(0.25)(8)}{17.7} = 8.86 \frac{t}{mm}$$

*Rigidez teórica del disipador tipo 2*

De las figuras 2.6 y 3.2 se obtiene la geometría del disipador y se aplica la ecuación (3-12):

$$k_{s2} = \frac{(784193)(0.25)(15)}{17.7} = 16.61 \frac{t}{mm}$$

A continuación se muestra la tabla 3.1 la cual muestra los resultados teóricos y experimentales para cada tipo de disipador.

Tabla 3.1 Rigideces teóricas y experimentales de los disipadores

	Disipador tipo 1	Disipador tipo 2
Rigidez experimental	4.67	10.34
Rigidez teórica	8.86	16.61

Con las rigideces obtenidas se calculó el porcentaje de error para ambos tipos de disipadores. A partir de la ecuación (3-13)

$$\% E = \frac{|K_{teórica} - K_{experimental}|}{K_{teórica}} \times 100 \quad (3-13)$$

Disipador tipo 1

$$\% E = \frac{|8.86 - 4.67|}{8.86} \times 100 = 47.3\%$$

Disipador tipo 2

$$\% E = \frac{|16.61 - 10.34|}{16.61} \times 100 = 37.8\%$$

Estos porcentajes de error son relativamente grandes; y se atribuyen a que la rigidez efectiva de los disipadores se vio afectada por la rotación de la placa de conexión de los disipadores al muro. Por esa razón la rigidez teórica resulta ser más grande que la experimental debido a la rotación de la placa de conexión.

### 3.7 RIGIDEZ POST-FLUENCIA

La figura 3.9 muestra un comportamiento bilineal típico para una estructura dada. Se ve que, después del comportamiento elástico lineal, con rigidez ( $K_1$ ), el modelo incursiona en la zona elasto plástica con rigidez, también conocida como rigidez post-fluencia ( $K_2$ ). En esta sección se obtiene la rigidez post-fluencia de cada tipo de disipador.

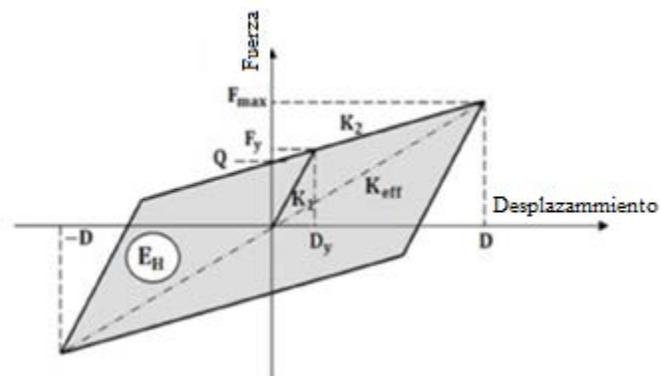


Fig.3.9 Esquema del comportamiento bilineal de una estructura dada [créditos: Scielo, 2018]

Como lo explican Guerrero (2017) y Ruiz García y Miranda (2006) la rigidez post-fluencia es de gran relevancia para el comportamiento sísmico de las estructuras. Por esa razón en esta sección se calcula dicho parámetro.

### 3.7.1 Rigidez post-fluencia del disipador tipo 1

Como se observa en la figura 3.10a, para obtener la rigidez post-fluencia de los disipadores, primero se resta a la envolvente marco+disipadores+muro, la curva correspondiente al marco sólo, lo que resulta en la curva carga-desplazamiento de los disipadores+muro como se muestra en la figura 3.10b.

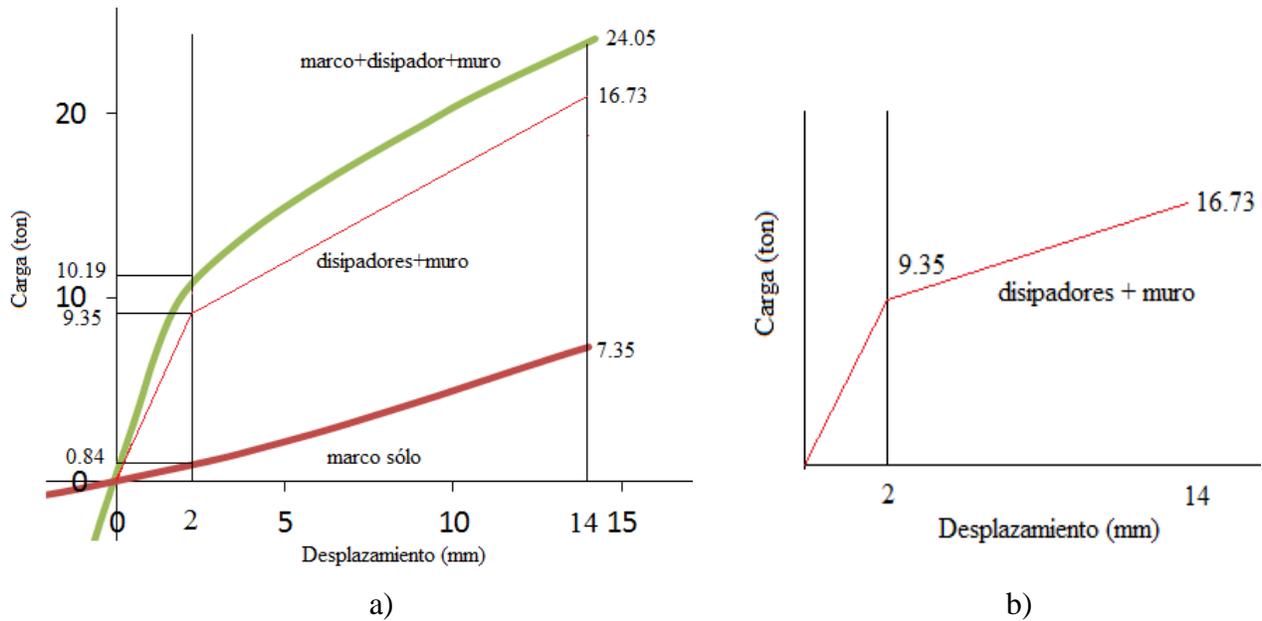


Fig. 3.10 Cálculo de la rigidez post-fluencia del disipador tipo 1

Dado que los disipadores y el muro se conectan en serie, por compatibilidad de deformaciones:

$$d_{muro} + d_{disip} = d_{muro} + d_{disip}$$

donde:

$d_{muro}$  : Desplazamiento del muro

$d_{disip}$  : Desplazamiento del disipador

$d_{muro} + d_{disip}$ : Desplazamiento del muro más el de los disipadores

Puesto que el desplazamiento del muro y disipadores a la carga de fluencia fue de 1 mm y asumiendo comportamiento elástico del muro, con la ayuda de la figura 3.11, se obtiene el desplazamiento máximo de los disipadores por simple regla de tres.

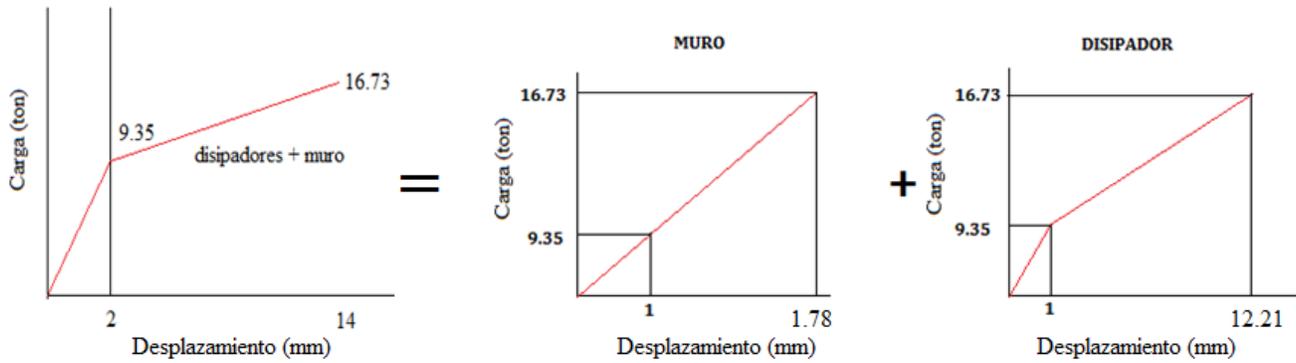


Fig. 3.11 Superposición de la pendiente post-fluencia del disipador tipo 1

La rigidez post-fluencia de los disipadores tipo 1 son, entonces:

$$K_{p1} = \frac{16.73 - 9.35}{12.21 - 1} = 0.65 \frac{t}{mm}$$

Y como porcentaje de la rigidez elástica:

$$\% r. postfluencia = \frac{K_{p1}}{K_{disip}} = \frac{0.65}{2(4.67)} = 0.07$$

Es decir 7 %

### 3.7.2 Rigidez post-fluencia del disipador tipo 2

Como se observa en la figura 3.12a para obtener la rigidez post-fluencia de los disipadores, primero se resta a la envolvente marco+disipadores+muro, la curva correspondiente al marco sólo, lo que resulta en la curva carga-desplazamiento de los disipadores+muro como se muestra en la figura 3.12b.

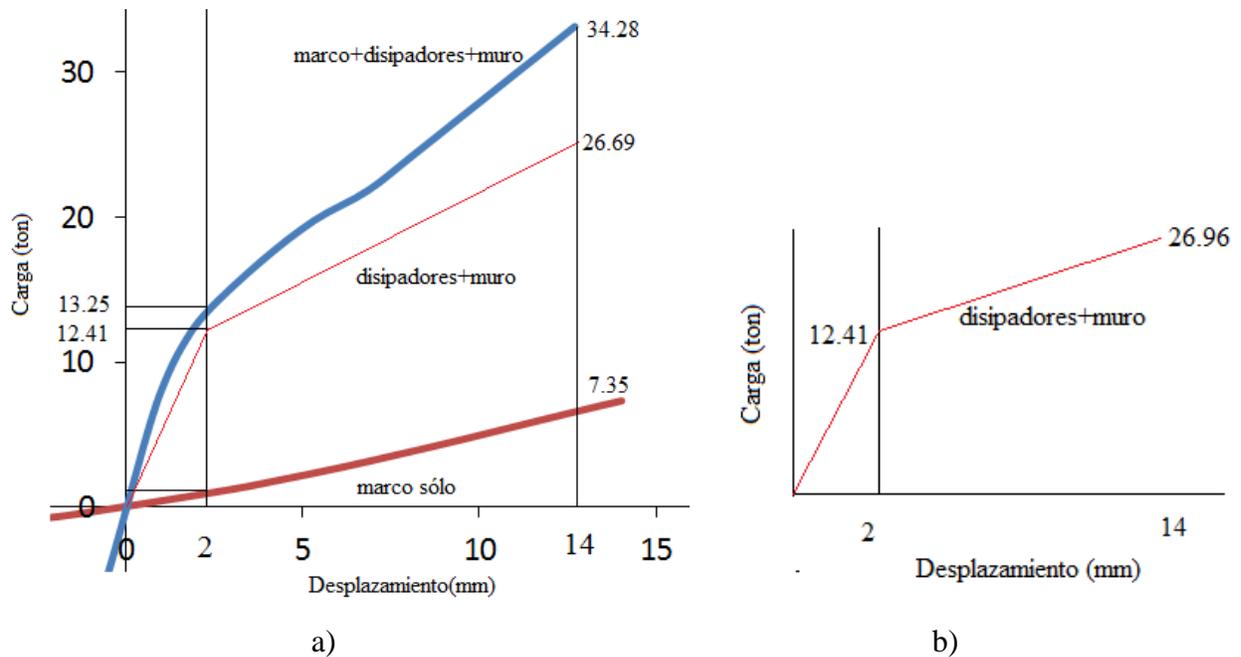


Fig. 3.12 Cálculo de la rigidez post-fluencia del disipador tipo 2

Dado que los disipadores y el muro se conectan en serie, por compatibilidad de deformaciones:

$$d_{muro} + d_{disip} = d_{muro} + d_{disip}$$

Puesto que el desplazamiento del muro y disipadores a la carga de fluencia fue de 1 mm y asumiendo comportamiento elástico del muro, con la ayuda de la figura 3.13, se obtiene el desplazamiento máximo de los disipadores por simple regla de tres.

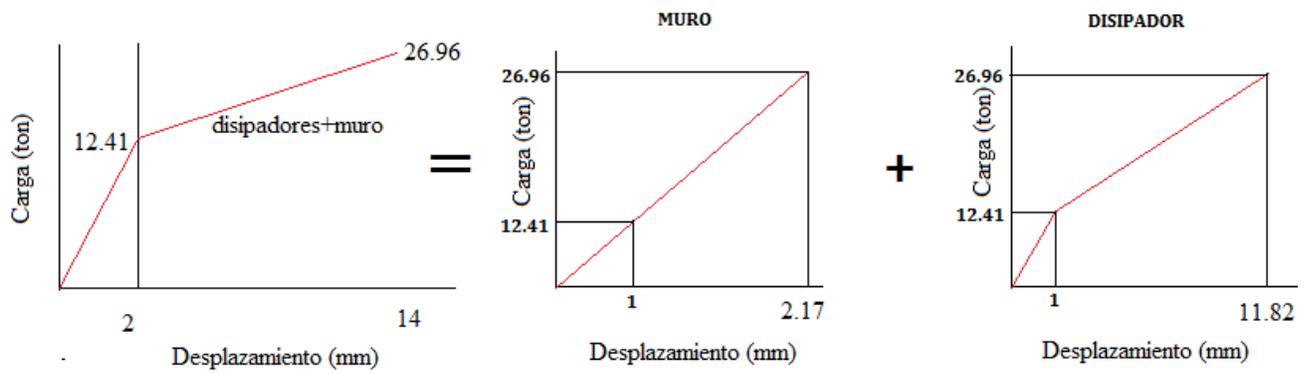


Fig. 3.13 Superposición de la pendiente post-fluencia del disipador tipo 2

La rigidez post-fluencia de los disipadores tipo 2 son, entonces:

$$K_{p2} = \frac{26.96 - 12.41}{11.82 - 1} = 1.34 \frac{t}{mm}$$

Y como porcentaje de la rigidez elástica:

$$\% r. postfluencia = \frac{K_{p2}}{K_{disip}} = \frac{1.34}{2(10.34)} = 0.064$$

Es decir 6.4 %

## **4 MODELACIÓN NUMÉRICA**

## 4.1 PROPIEDADES DEL MODELO NUMÉRICO

Se utilizó un modelo numérico de la estructura descrita en el capítulo 2. El modelo numérico fue sometido al mismo protocolo de carga que el modelo experimental. A continuación se describen las propiedades del modelo numérico, es decir: geometría, materiales y cargas aplicadas.

### *Geometría del modelo*

Se utilizó la geometría establecida anteriormente en el capítulo 2, figs. 2.1 a 2.6, en donde se muestran las características de cada elemento que conforma el modelo.

### *Columnas*

Las columnas estuvieron compuestas de una base de 80x80cm por 40cm de altura. La base se empotró a la losa de reacción. El cuerpo tuvo una sección transversal de 30x30 con altura de 215 cm y un cabezal de 60x30 cm con altura de 70 cm.

Los armados fueron de 8 varillas del #4 con estribos del #2.5 separados a 20 cm.

### *Trabe*

Se tuvo una trabe de 3.4 m de largo con dos zonas de conexión laterales de 70x60 cm y 15 cm de espesor. La sección transversal de la trabe fue de 22x40 cm.

Los armados fueron de 6 varillas del #4 con estribos del #2.5 separados a 15 cm.

### *Muro*

El muro tuvo dimensiones de 3.12x2.00 m, con un espesor de 15 cm y una zapata base de 312x45 cm.

### *Materiales*

El concreto utilizado para columnas, trabe y muro tuvo una resistencia promedio de  $f'c=350 \text{ kg/cm}^2$ . Esta resistencia se midió con cilindros de concreto, tomados durante el colado del concreto.

El acero de refuerzo utilizado para estos elementos tuvo una resistencia nominal  $f_y=4200 \text{ kg/cm}^2$ .

### *Cargas aplicadas*

Se aplicó el mismo protocolo del modelo experimental; mismo que se puede ver en la figura 2.15 del capítulo 2.

## 4.2 MODELO NUMÉRICO EN EL PROGRAMA DE ANALISIS ESTRUCTURAL SAP2000

El modelo numérico fue realizado en el programa de análisis estructural SAP2000, el cual se basa en la solución de estructuras por el Método de Elementos Finitos (MEF). Con este método, se obtuvo una solución numérica del modelo.

En las secciones que se muestran a continuación, se detalla la modelación de cada tipo de prueba, empleando las propiedades calculadas en el capítulo 3 para cada tipo de disipador.

### 4.2.1 Modelo del marco sin disipador (SD)

Se realizó el modelo para representar el marco sin ningún tipo de disipador para corroborar las cargas y los desplazamientos experimentales obtenidos en la prueba correspondiente. Se consideró que el marco de concreto reforzado tuvo los apoyos empotrados en la base. De la misma forma, el muro se consideró empotrado en su base. Posteriormente se definieron los casos de carga. Se aplicaron cargas lateralmente y se hizo un análisis estático-lineal. De los resultados experimentales se tomó la máxima carga obtenida para el desplazamiento de 14 mm; que fue de 7.32 t. Esta carga se definió en el programa dividido en dos cargas, cada una de 3.67 t y se aplicaron en los extremos de la trabe como se muestra en la figura 4.1.

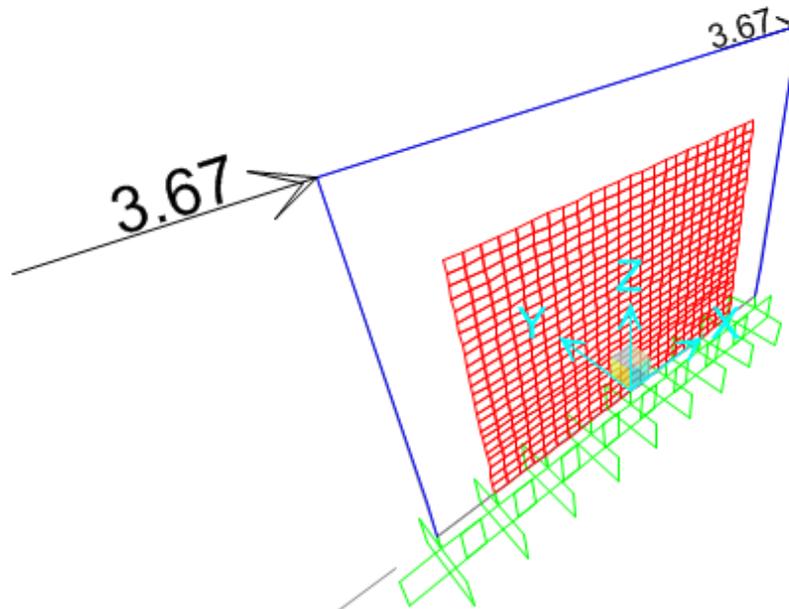
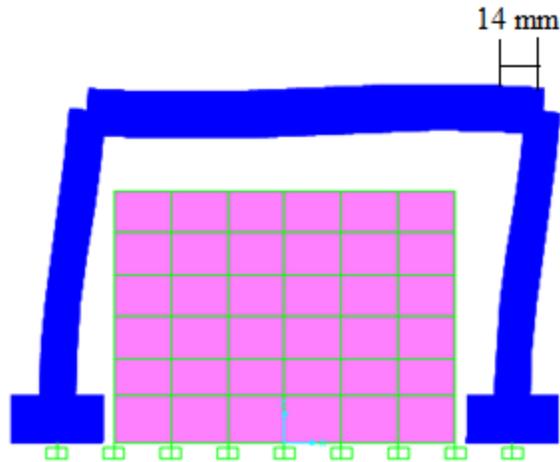


Fig. 4.1 Definición de cargas experimentales en el modelo numérico: caso sin disipadores

Al ejecutar el análisis se obtuvo el comportamiento mostrado en las figura 4.2



*Fig. 4.2 Deformada del modelo sin disipador*

En la figura 4.2 se puede apreciar la deformada del modelo una vez analizado, que muestra el comportamiento que tuvo éste ante las cargas laterales aplicadas.

Es importante mencionar que, como se sugiere en algunos reglamentos de diseño (ACI-318-05, 2017; RCDF, 2017), las secciones de concreto se consideraron como agrietadas. Se aplicó un factor de 0.70 en las columnas y 0.35 en la trabe. Estos factores se estimaron variándolos iterativamente hasta que el desplazamiento producido por las cargas laterales fue de 14 mm.

#### **4.2.2 Modelo del marco con disipador tipo 1**

Una vez realizado el modelo sin disipadores se procedió a analizar el modelo equipado con disipadores tipo 1. Éstos se modelaron como elementos “Link” o resortes inelásticos usando el modelo de Wen (M.A. Clemente 2011) en el programa. Se consideraron las rigideces calculadas previamente en el capítulo 3, el límite elástico y la rigidez post-fluencia.

En la tabla 4.1 se muestran estas propiedades que se introdujeron en el programa para el disipador tipo 1.

Tabla 4.1 Propiedades del disipador tipo 1 SAP2000

<b>Nombre:</b>	<b>Disipador tipo 1</b>
Dirección	U2(cortante)
Modelo:	Plástico(Wen)
No lineal:	si
<b>Propiedades usadas para el análisis lineal</b>	
Rigidez efectiva:	4.67
Amortiguación efectiva:	0
<b>Propiedades usadas para el análisis no lineal</b>	
Rigidez	4.67
Límite elástico	4.67
Rigidez post-fluencia	0.07
Exponente de transición de comportamiento elástico a inelástico	100

Es muy importante mencionar que para el análisis del modelo se realizó un análisis dinámico en el programa con un tiempo de integración muy largo para asegurar el comportamiento cuasi-estático. De esta manera se logró tener desplazamiento en direcciones positiva y negativa.

Otro aspecto importante es del análisis dinámico es que fue controlado por desplazamientos. Se aplicó el protocolo establecido en el capítulo 2 (figura 2.15)

Establecidas estas aclaraciones, se procedió al análisis del modelo con el disipador tipo 1, que mostró el comportamiento ilustrado en la figura 4.3.

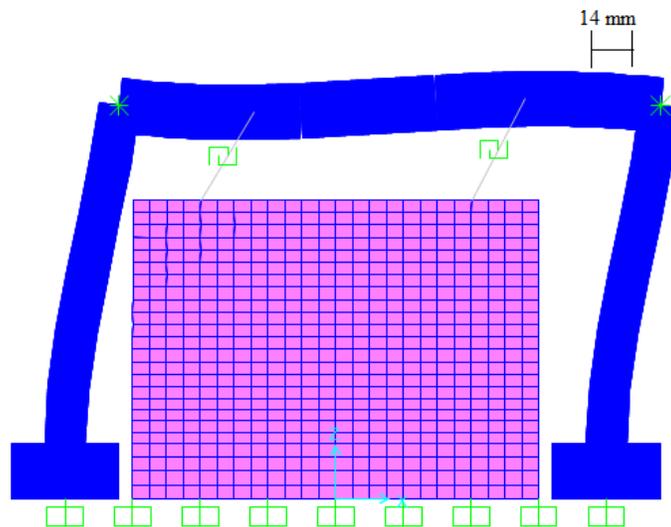


Fig. 4.3 Deformada del modelo con disipador tipo 1

### 4.2.3 Modelo del marco con disipador tipo 2

Una vez realizado el modelo con el disipador tipo 1, se procedió a realizar el análisis del modelo ahora con los disipadores tipo 2. Al igual que el tipo 1, se declararon sus propiedades y se realizó un análisis dinámico con un paso de tiempo largo.

En la tabla 4.2 se muestra las propiedades para el disipador tipo 2 tal y como fueron declaradas en el programa.

Tabla 4.2 Propiedades del disipador tipo 2 SAP2000

<b>Nombre:</b>	<b>Disipador tipo 2</b>
Dirección	U2(cortante)
Tipo:	Plástico(Wen)
No lineal:	si
<b>Propiedades usadas para el análisis lineal</b>	
Rigidez efectiva:	10.34
Amortiguación efectiva:	0
<b>Propiedades usadas para el análisis no lineal</b>	
Rigidez	10.34
Límite elástico	6.20
Rigidez post-fluencia	0.06
Exponente de transición de comportamiento elástico a inelástico	100

Otra vez, se aplicó el protocolo de cargas mostrado en la figura 2.15 y se realizó un análisis controlado por desplazamiento. Los resultados se muestran en la figura 4.4

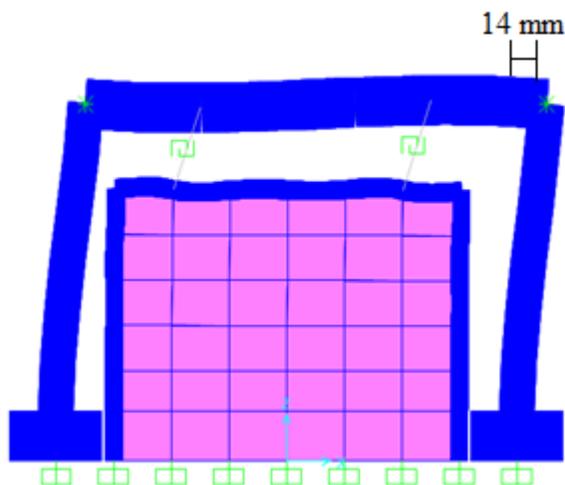


Fig.4.4 Deformada del modelo con disipador tipo 2

### 4.3 COMPORTAMIENTO ANTE CARGAS LATERALES

El sistema comprende los elementos del marco, disipadores y muro. Los cuales estuvieron sometidos a esfuerzos durante cada tipo de prueba realizada. Se analizó el comportamiento para el caso del marco obteniendo sus diagramas de elementos mecánicos y para el caso del muro observar los esfuerzos en éste.

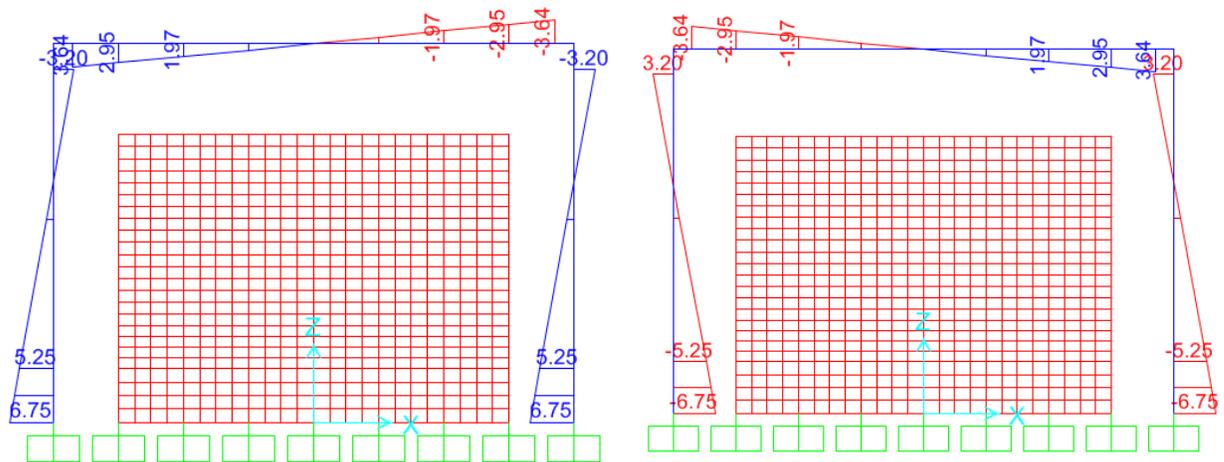
En esta sección se muestran los diagramas de elementos mecánicos y los esfuerzos en el muro producidos en el modelo numérico para cada prueba. Después, en el capítulo 5, los elementos mecánicos y esfuerzos actuantes se compararon con los resistentes en la estructura.

#### 4.3.1 Marco

##### 4.3.1.1 Diagramas de elementos mecánicos sin disipador (SD)

###### *Momento flexionante*

La figura 4.5 muestra los diagramas de momentos flexionantes para deformaciones máximas en ambas direcciones. Se aprecia que los momentos máximos con la trabe son 3.64 t·m y en la columna son 6.75 t·m.



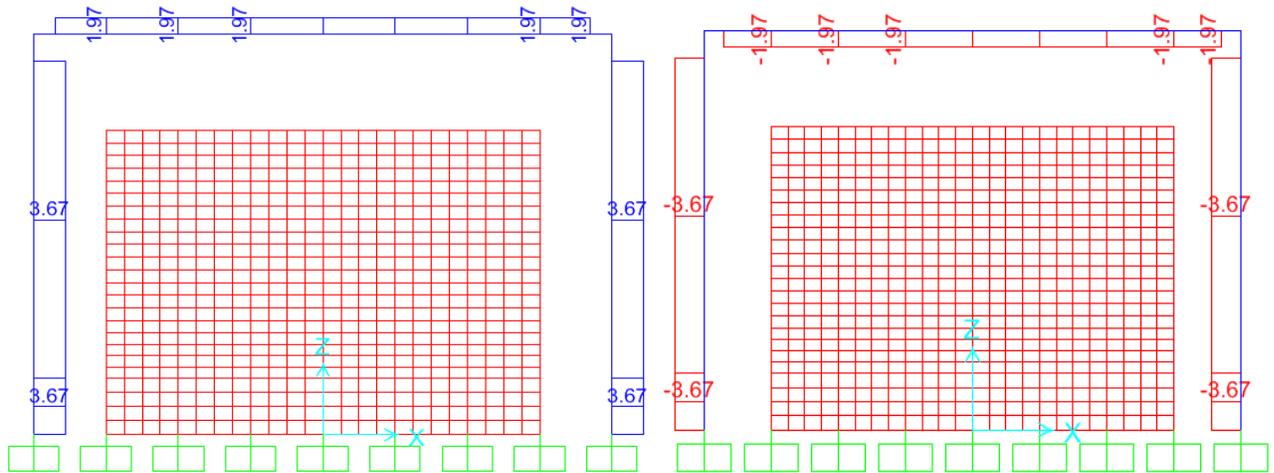
a) Deformación positiva máxima

b) Deformación negativa máxima

Fig.4.5 Diagramas de momentos flexionantes sin disipadores

### Fuerza cortante:

La figura 4.6 muestra los diagramas de fuerza cortante para los estados de deformación máxima en ambas direcciones. Se puede apreciar que el cortante máximo en las columnas es de 3.67 t y en la traveses es de 1.97 t.



a) Deformación positiva máxima

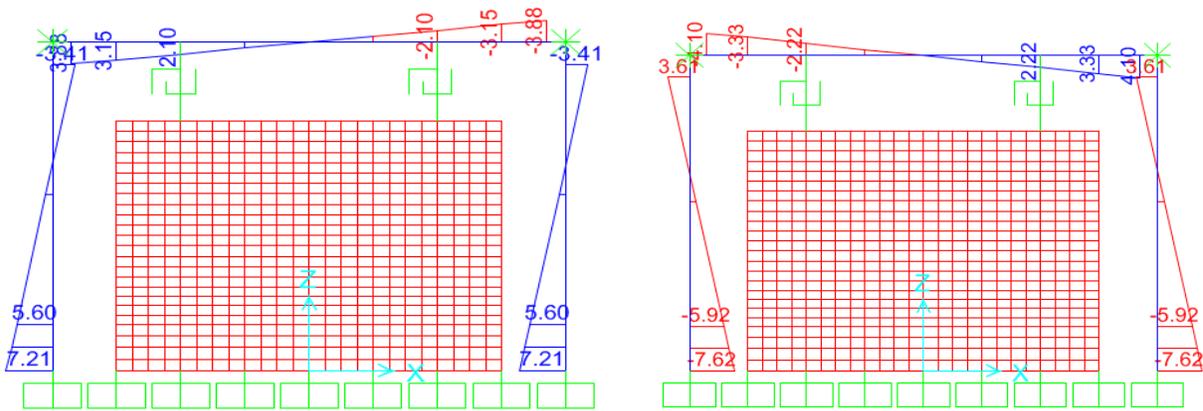
b) Deformación negativa máxima

Fig.4.6 Diagramas de fuerza cortante sin disipadores

### 4.3.1.2 Diagramas de elementos mecánicos con disipador tipo 1

#### Momento flexionante

La figura 4.7 muestra los diagramas de momentos flexionantes para deformaciones máximas en ambas direcciones. Se aprecia que los momentos máximos con la trabe son de 3.88 t·m para la deformación positiva máxima mientras que para la deformación negativa máxima es de 4.10 t·m y en la columna son de 7.21 t·m para la deformación positiva máxima mientras que para la deformación negativa máxima es de 7.62 t·m.



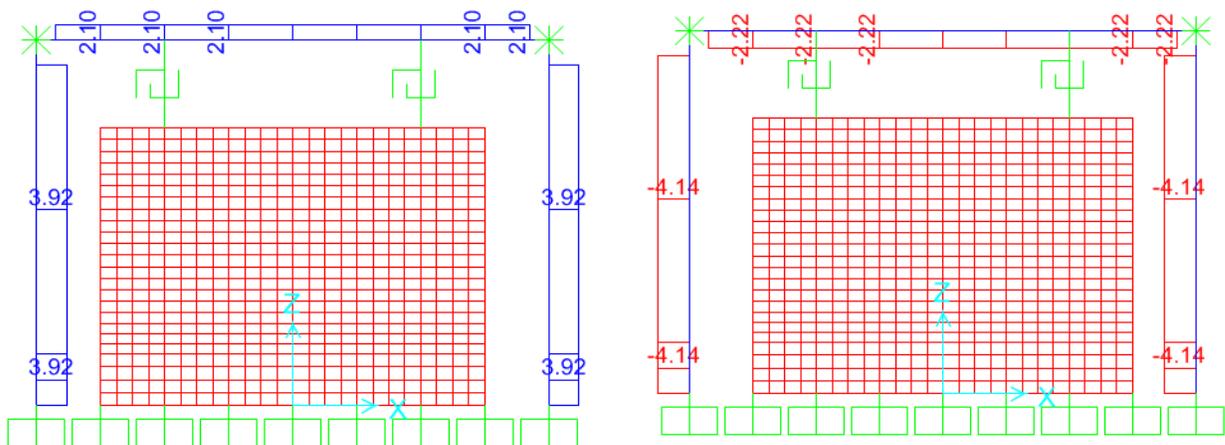
a) Deformación positiva máxima

b) Deformación negativa máxima

Fig.4.7 Diagramas de momentos flexionantes con disipadores tipo 1

#### Fuerza cortante

La figura 4.8 muestra los diagramas de fuerza cortante para los estados de deformación máxima en ambas direcciones. Se puede apreciar que el cortante máximo en las columnas es de 3.92 t para la deformación máxima positiva mientras que para la deformación máxima negativa es de 4.14 t así, en la traveses es de 2.10 t para la deformación máxima positiva mientras que para la deformación máxima negativa es de 2.22 t.



a) Deformación positiva máxima

b) Deformación negativa máxima

Fig.4.8 Diagramas de fuerza cortante con disipador tipo 1

### 4.3.1.3 Diagramas de elementos mecánicos con disipador tipo 2

#### Momento flexionante

La figura 4.9 muestra los diagramas de momentos flexionantes para deformaciones máximas en ambas direcciones. Se aprecia que los momentos máximos con la trabe son de 3.47 t·m para la deformación positiva máxima mientras que para la deformación negativa máxima es de 3.64 t·m y en la columna son de 6.44 t·m para la deformación positiva máxima mientras que para la deformación negativa máxima es de 6.76 t·m.

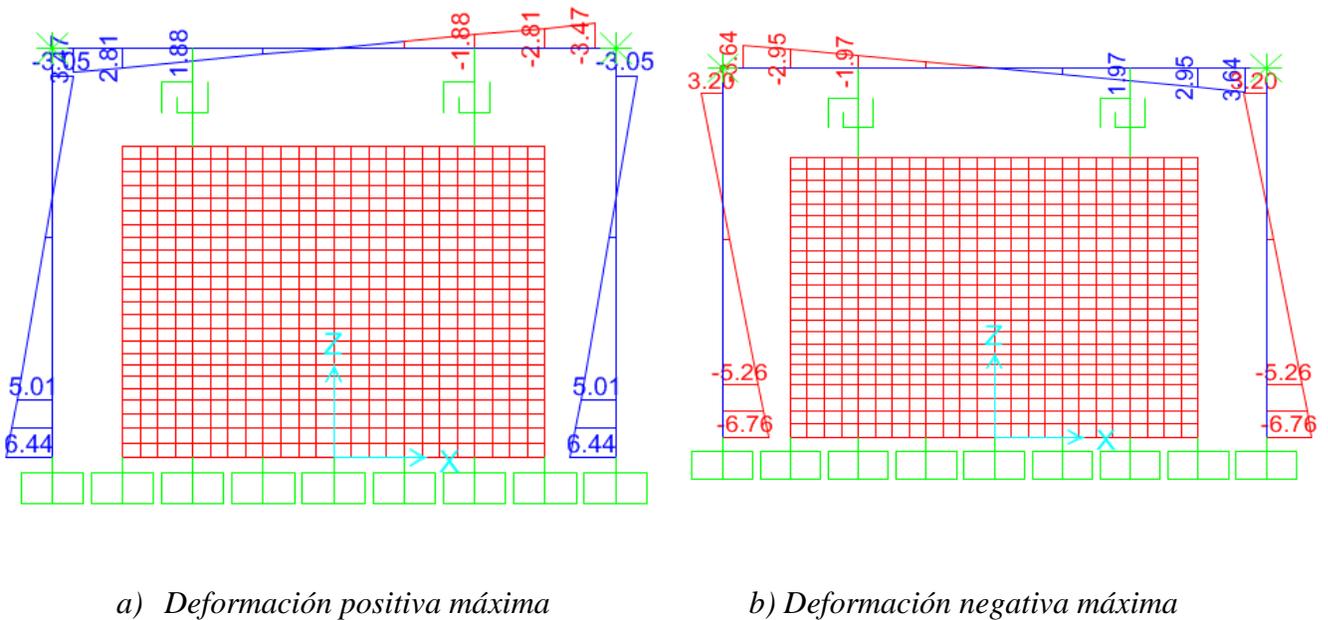
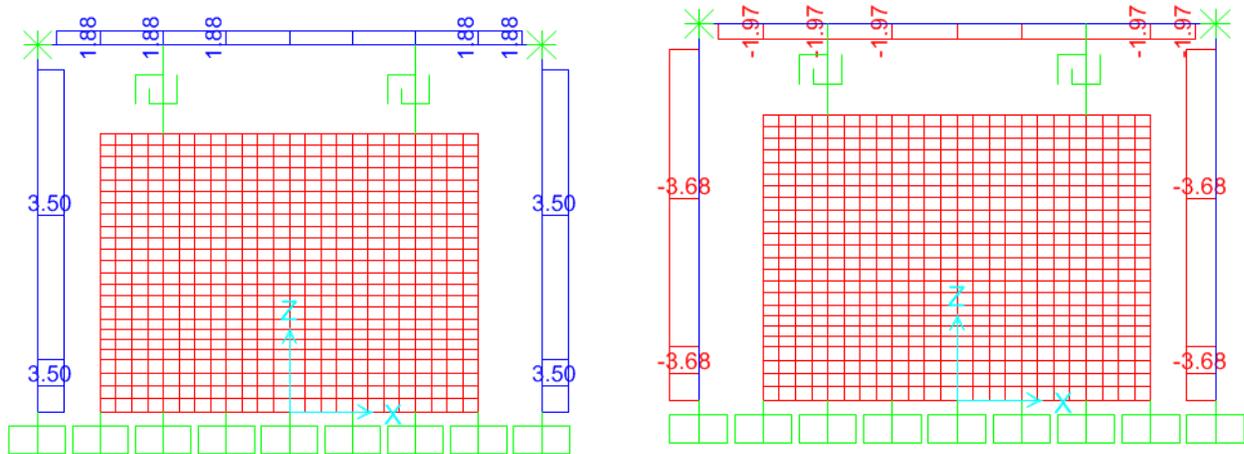


Fig.4.9 Diagramas de momentos flexionantes con disipadores tipo 2

#### Fuerza cortante

La figura 4.10 muestra los diagramas de fuerza cortante para los estados de deformación máxima en ambas direcciones. Se puede apreciar que el cortante máximo en las columnas es de 3.50 t para la deformación máxima positiva mientras que para la deformación máxima negativa es de 3.68 t así, en la traveses es de 1.88 t para la deformación máxima positiva mientras que para la deformación máxima negativa es de 1.97 t.



a) Deformación positiva máxima

b) Deformación negativa máxima

Fig.4.10 Diagramas de fuerza cortante con disipador tipo 2

### 4.3.2 Muro

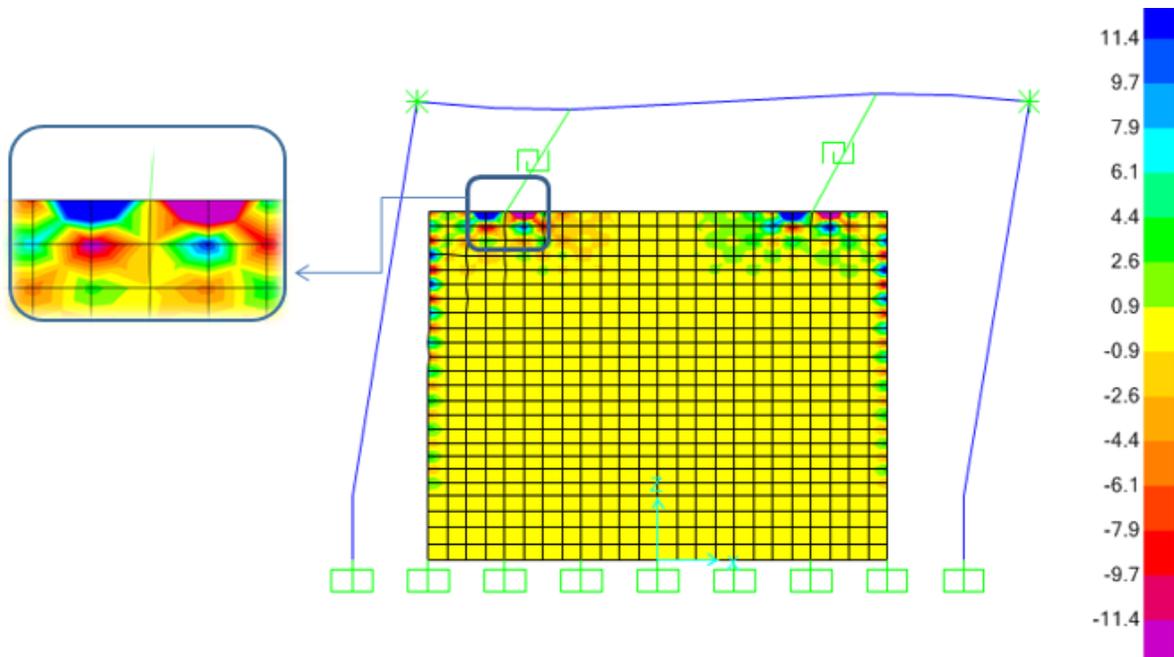
Para este elemento del modelo se obtuvieron los esfuerzos generados en cada tipo de prueba. En esta sección se representan los esfuerzos horizontales, verticales y esfuerzos máximos que se presentaron para el máximo desplazamiento aplicado de 14 mm.

Cabe señalar que para los esfuerzos cortantes horizontales se revisó las normas técnicas complementarias para diseño y construcción de estructuras de concreto (2004) en el subcapítulo 6.5.2.5, pág. 148 expresión (6.12) para revisar si la resistencia de diseño del muro era rebasada. En la sección 5.3 de resultados se muestra a detalle el cálculo de este límite resistente en el muro.

Para efectos de visualización de daños se tomó en cuenta este límite es de  $11.42 \text{ kg/cm}^2$ , el cual fue implementado a la hora de obtener los esfuerzos horizontales para los modelos con disipador tipo 1 y 2.

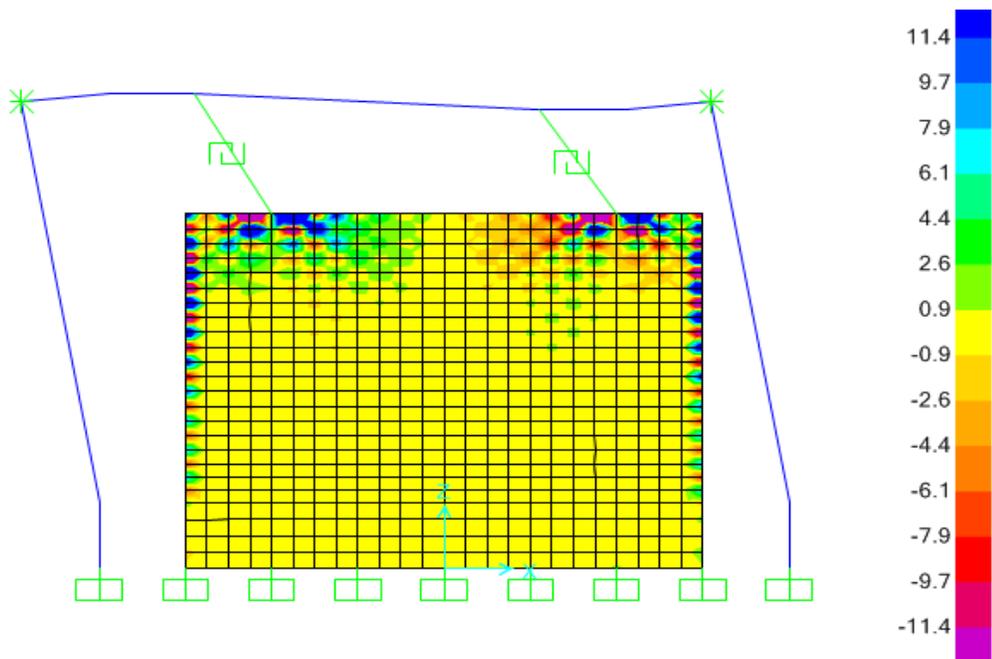
#### 4.3.2.1 Esfuerzos con disipador tipo 1

*Esfuerzos horizontales*



*Fig.4.11 Esfuerzos horizontales durante deformación máxima positiva: dissipador tipo 1*

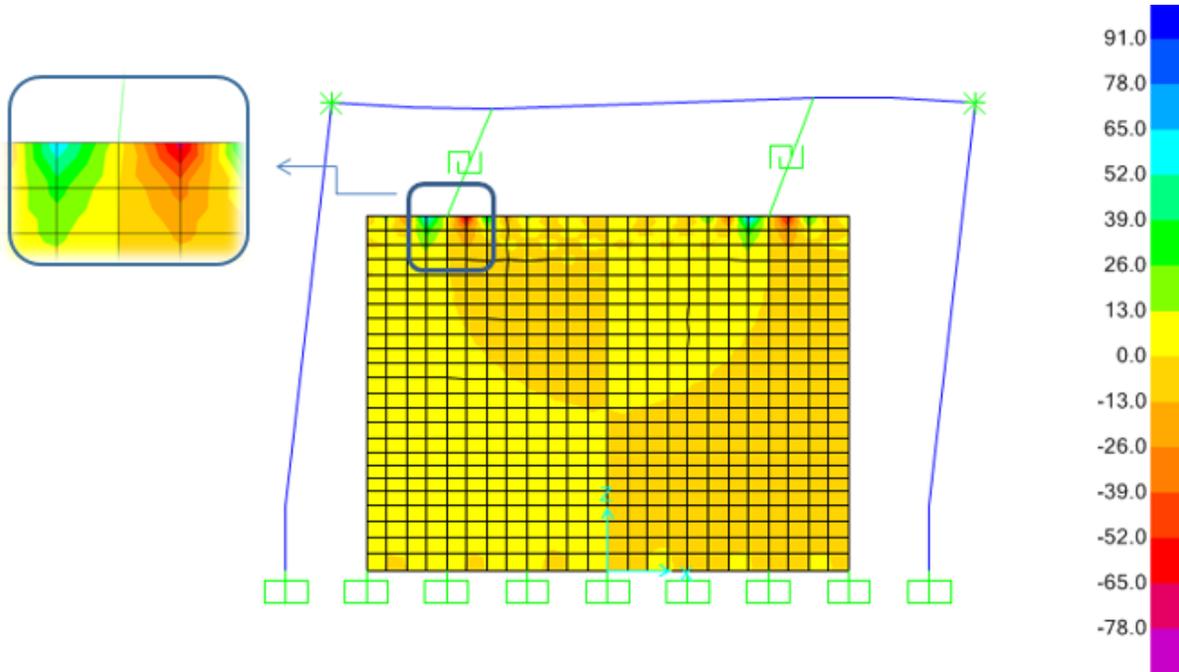
La figuras 4.11 y 4.12 muestran los esfuerzos horizontales para el desplazamiento máximo en dirección positiva y negativa. En estas figuras se pueden ver las zonas en donde se presentan esfuerzos máximos de tensión y de compresión. Los mayores esfuerzos máximos se concentran principalmente en las zonas de conexión muro-dissipador.



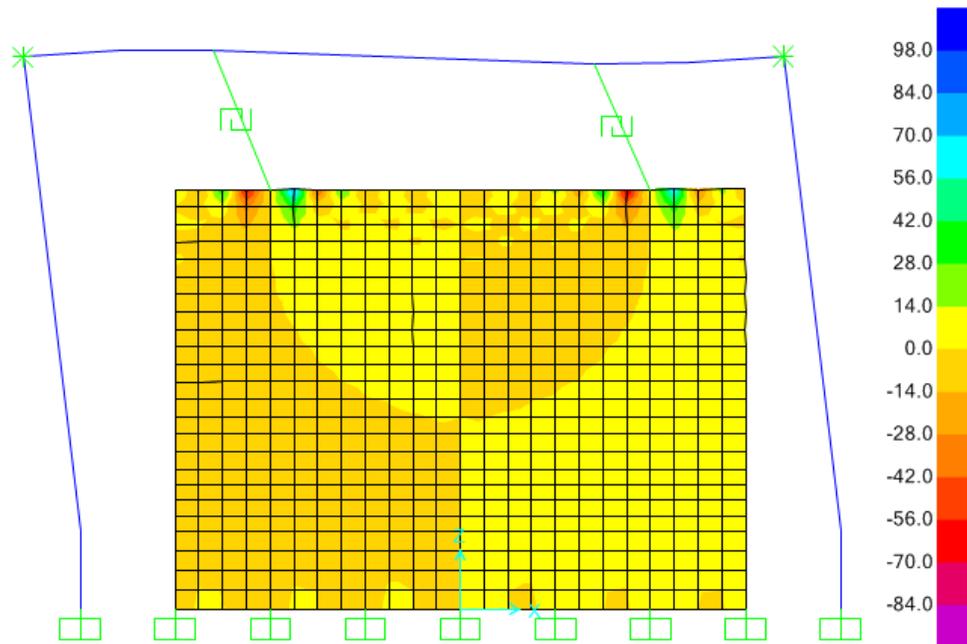
*Fig.4.12 Esfuerzos horizontales durante deformación máxima negativa: dissipador tipo 1*

### *Esfuerzos verticales*

Las figuras 4.13 y 4.14 muestran los esfuerzos en dirección vertical para los estados de deformación máxima en las direcciones positiva y negativa, respectivamente. Una vez más, se aprecia que los estados máximos se concentran en las zonas de conexión.



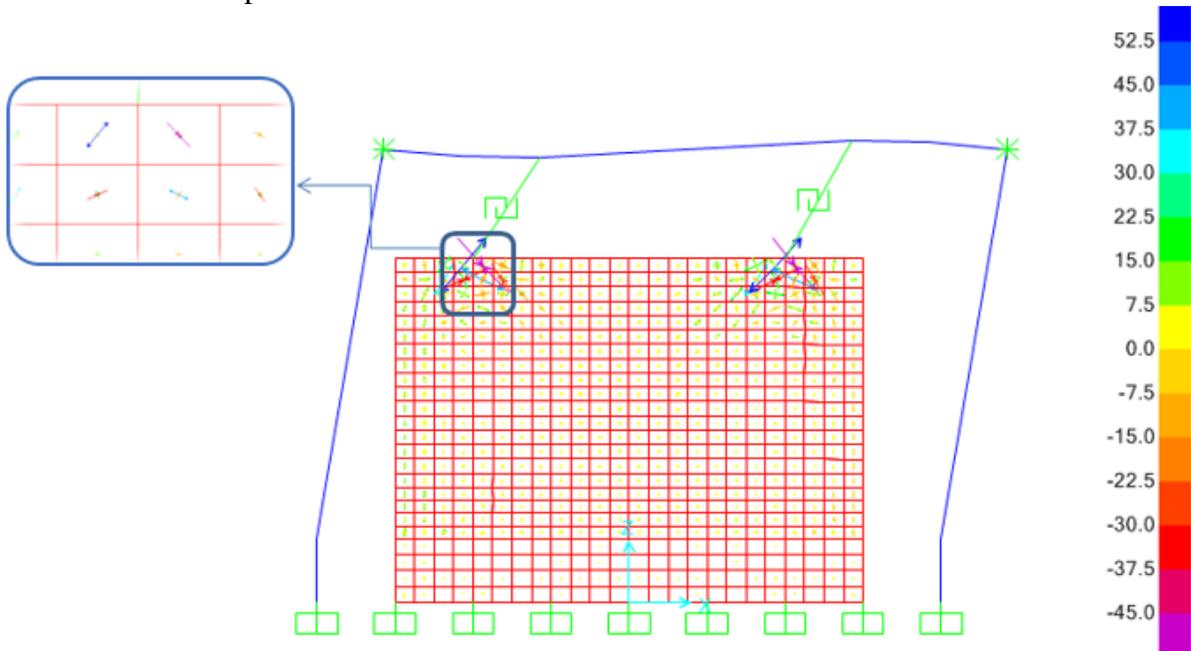
*Fig.4.13 Esfuerzos verticales durante deformación máxima positiva: disipador tipo 1*



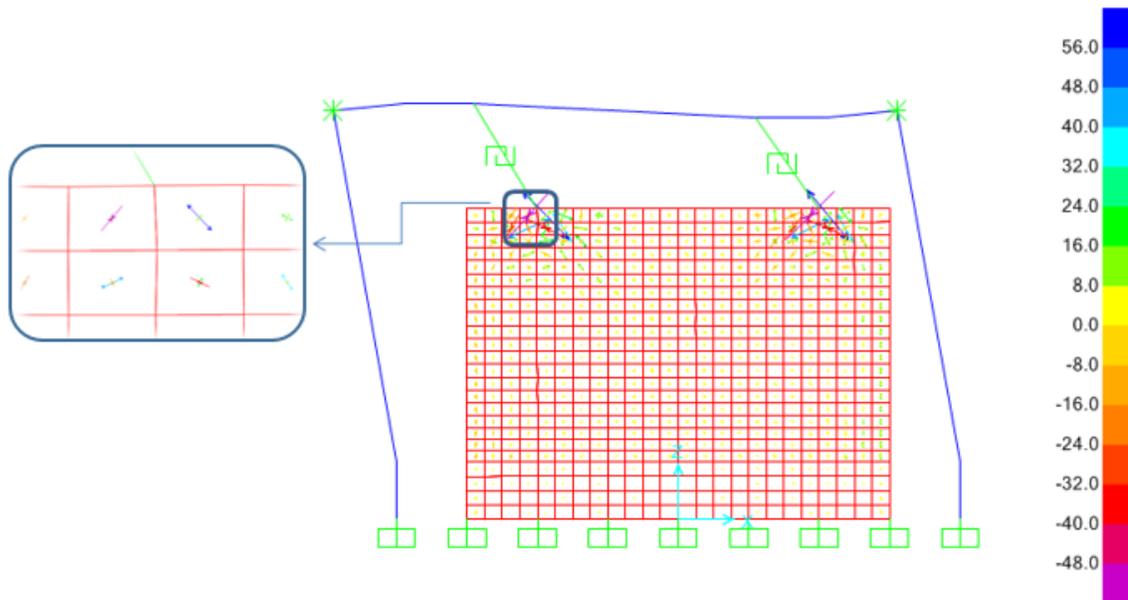
*Fig.4.14 Esfuerzos verticales durante deformación máxima negativa: disipador tipo 1*

### Esfuerzos Máximos

En las figuras 4.15 y 4.16 se pueden ver los máximos esfuerzos que se presentaron en la conexión muro-disipador.



*Fig.4.15 Representación de esfuerzos máximos durante deformación máxima positiva: disipador tipo 1*



*Fig.4.16 Representación de esfuerzos máximos durante deformación máxima negativa: disipador tipo 1*

En estas figuras se pueden ver los esfuerzos máximos que se presentaron durante la prueba, así como sus direcciones principales. Claramente se observa que los esfuerzos máximos se presentan en las conexiones muro-disipador con una inclinación cercana a 45 °. Con esta observación se puede decir que se deben diseñar las conexiones para acomodar tanto esfuerzos cortantes como esfuerzos de tensión y compresión.

4.3.2.2 Esfuerzos con disipador tipo 2

Esfuerzos Horizontales

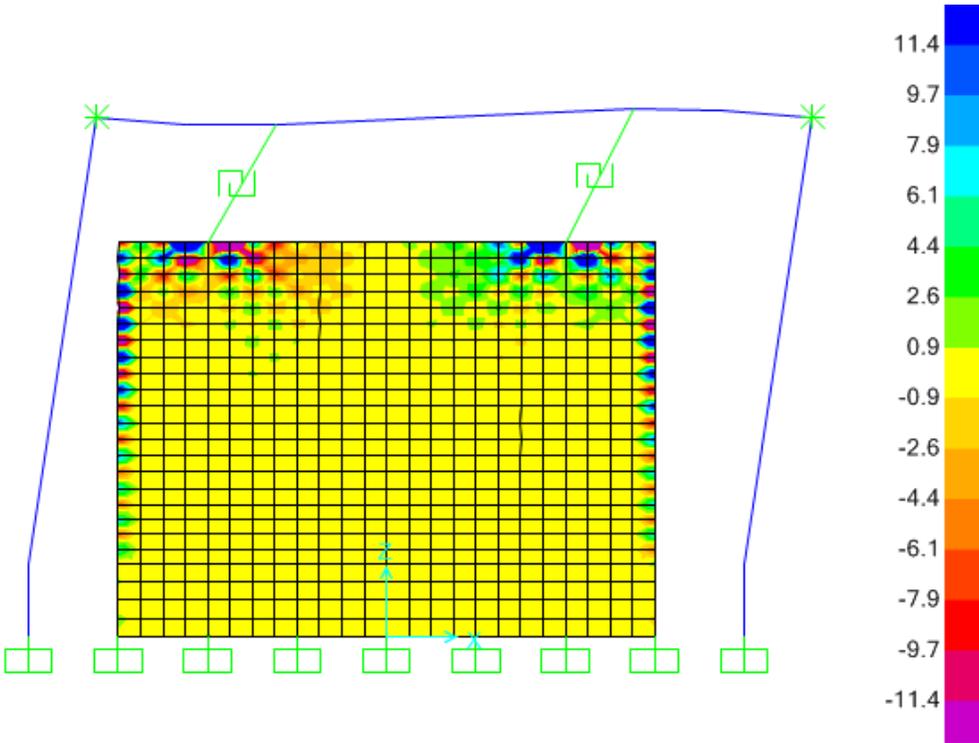


Fig.4.17 Esfuerzos horizontales durante deformación máxima positiva: disipador tipo 2

La figuras 4.17 y 4.18 muestran los esfuerzos horizontales para el desplazamiento máximo en direcciones positivas y negativas.

En estas figuras se pueden ver las zonas en donde se presentan esfuerzos máximos de tensión y de compresión. Los mayores esfuerzos máximos se concentran principalmente en las zonas de conexión muro-disipador.

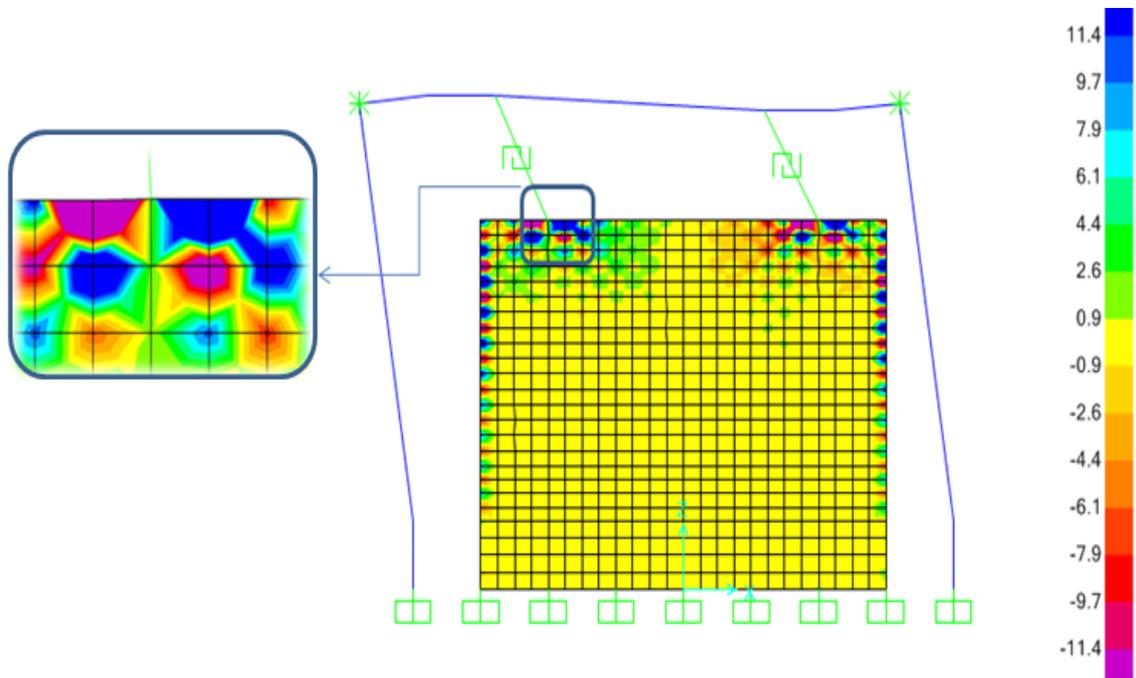


Fig.4.18 Esfuerzos horizontales durante deformación máxima negativa: disipador tipo 2

Esfuerzos verticales

Esfuerzo vertical en compresión

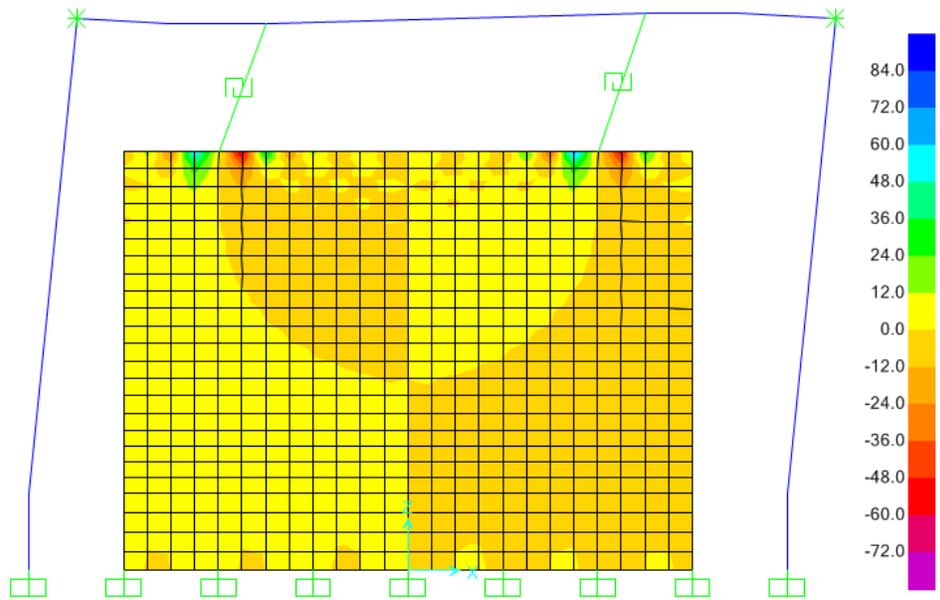
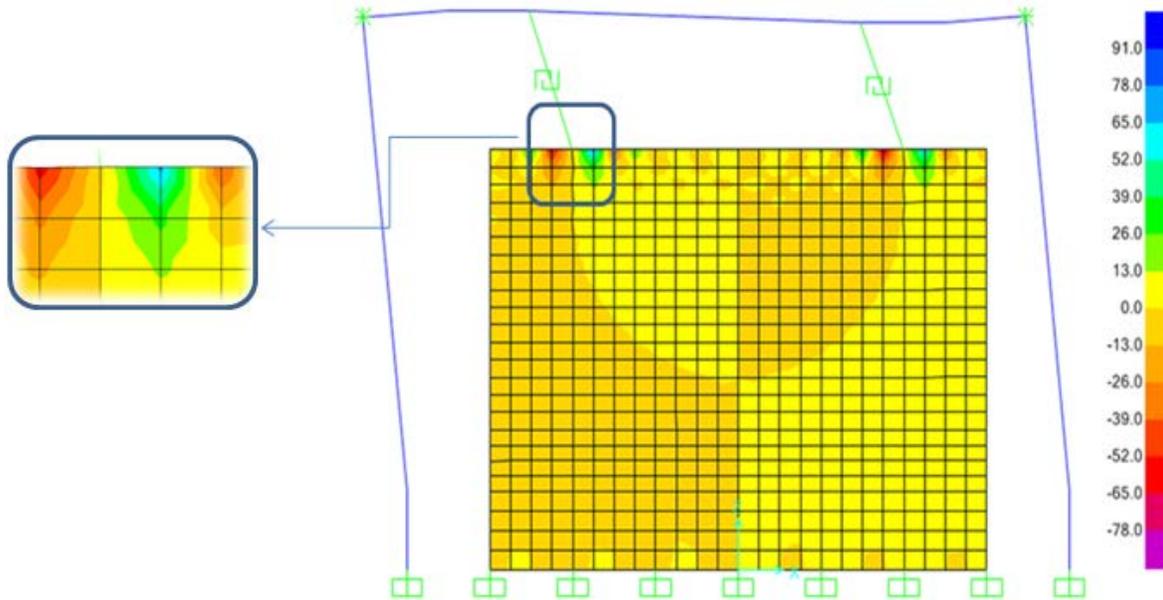


Fig.4.19 Esfuerzos verticales durante deformación máxima positiva: disipador tipo 2

Las figuras 4.19 y 4.20 muestran los esfuerzos en dirección vertical para los estados de deformación máxima en las direcciones positiva y negativa, respectivamente. Una vez más, se aprecia que los estados máximos se concentran en las zonas de conexión.



*Fig.4.20 Esfuerzos verticales durante deformación máxima negativa: disipador tipo 2*

### *Esfuerzos Máximos*

En las figuras 4.21 y 4.22 se pueden ver los esfuerzos máximos que se presentaron durante la prueba, así como sus direcciones principales. Claramente se observa que los esfuerzos máximos se presentan en las conexiones muro-disipador con una inclinación cercana a  $45^\circ$ . Con esta observación se puede decir que se deben diseñar las conexiones para acomodar tanto esfuerzos cortantes como esfuerzos de tensión y compresión.

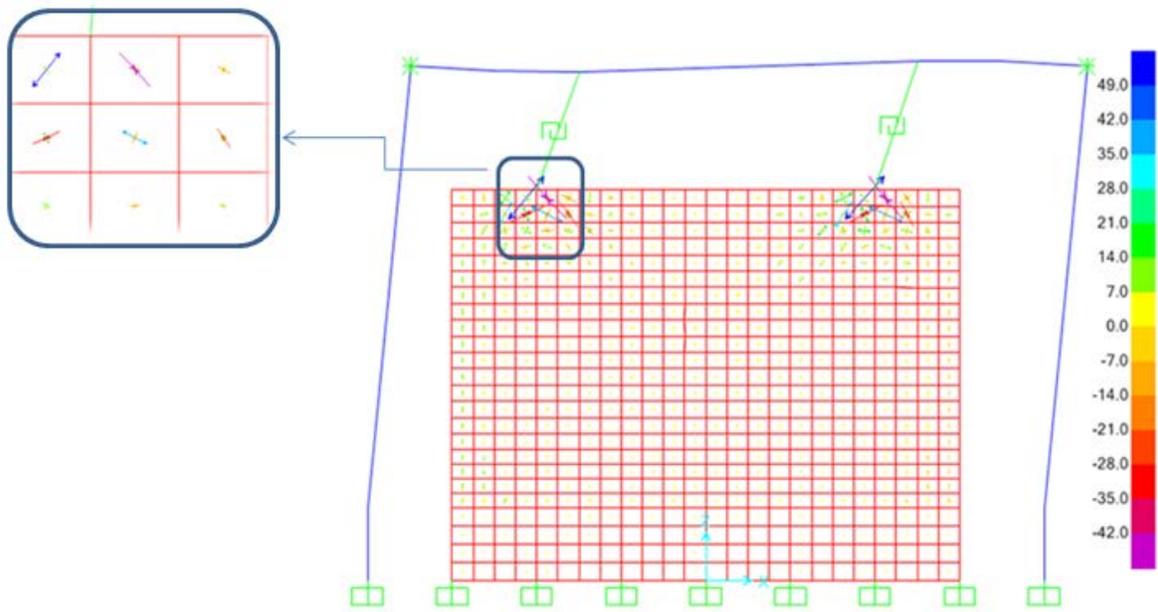


Fig.4.21 Representación de esfuerzos máximos durante deformación máxima positiva:  
dissipador tipo 2

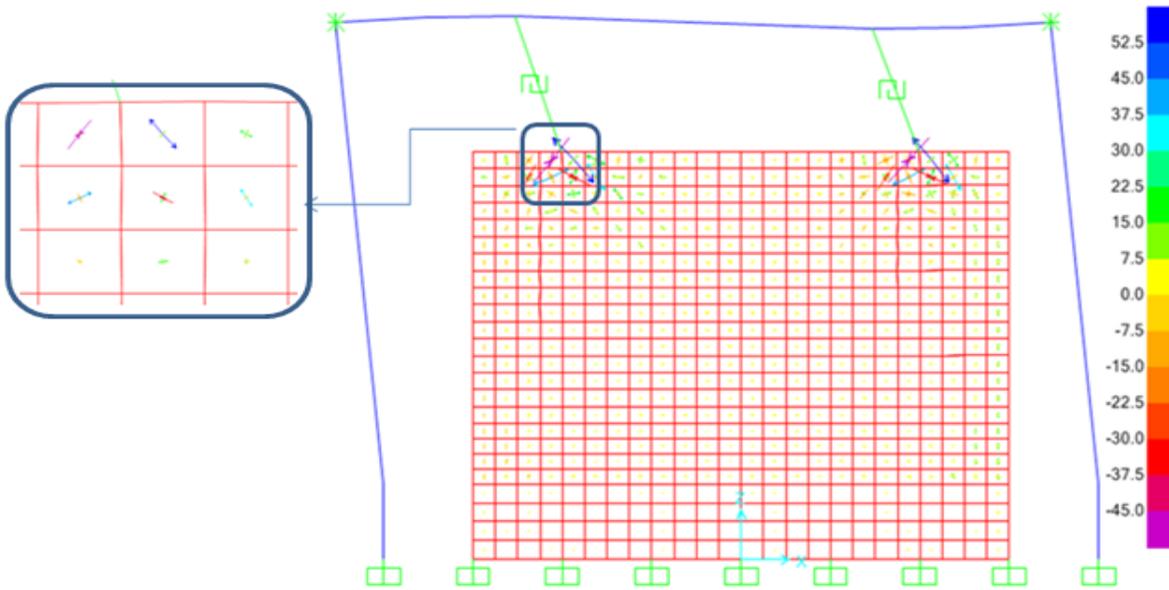


Fig.4.22 Representación de esfuerzos máximos durante deformación máxima negativa:  
dissipador tipo 2

## **5 RESULTADOS Y COMPARACIONES**

## 5.1 RESULTADOS EXPERIMENTALES

A partir de las tres pruebas cuasi-estáticas, se obtuvieron las fuerzas requeridas para cada nivel de desplazamiento aplicado.

Cabe aclarar que los desplazamientos que se tomaron como referencia fueron medidos por el CDP1; ya que fue el transductor colineal con el actuador y que dio una lectura directa.

### 5.1.1 Curvas carga deformación del marco sin disipador (SD)

En la tabla 5.1 se muestra un resumen general de cargas y desplazamientos positivos y negativos máximos a los que fue sometido el modelo sin disipadores.

*Tabla 5.1 Resultados obtenidos para el marco sin disipador (SD)*

<b>Prueba</b>	<b>Carga (t)</b>	<b>Desplazamiento positivo (mm)</b>	<b>Carga(t)</b>	<b>Desplazamiento negativo (mm)</b>
<i>1 mm</i>	0.58	1.38	0.47	1.37
<i>2 mm</i>	0.80	1.94	0.76	2.29
<i>3 mm</i>	1.30	3.18	1.08	3.28
<i>4 mm</i>	1.71	4.04	1.43	4.25
<i>6 mm</i>	2.68	5.99	2.13	6.01
<i>8 mm</i>	3.61	7.68	2.97	7.82
<i>10 mm</i>	4.65	9.51	3.96	9.78
<i>12 mm</i>	5.74	11.30	4.95	11.60
<i>14 mm</i>	6.81	13.11	5.99	13.47
<i>15 mm</i>	7.32	14.01	6.46	14.37

La figura 5.1 muestra las curvas carga-desplazamiento experimentales para el modelo sin disipadores. Como se puede ver el marco prácticamente mantiene un comportamiento elástico lineal a lo largo de todas las pruebas para los diferentes desplazamientos a los que fue sometido. Para el desplazamiento máximo de 14 mm la carga máxima fue de 7.32 t.

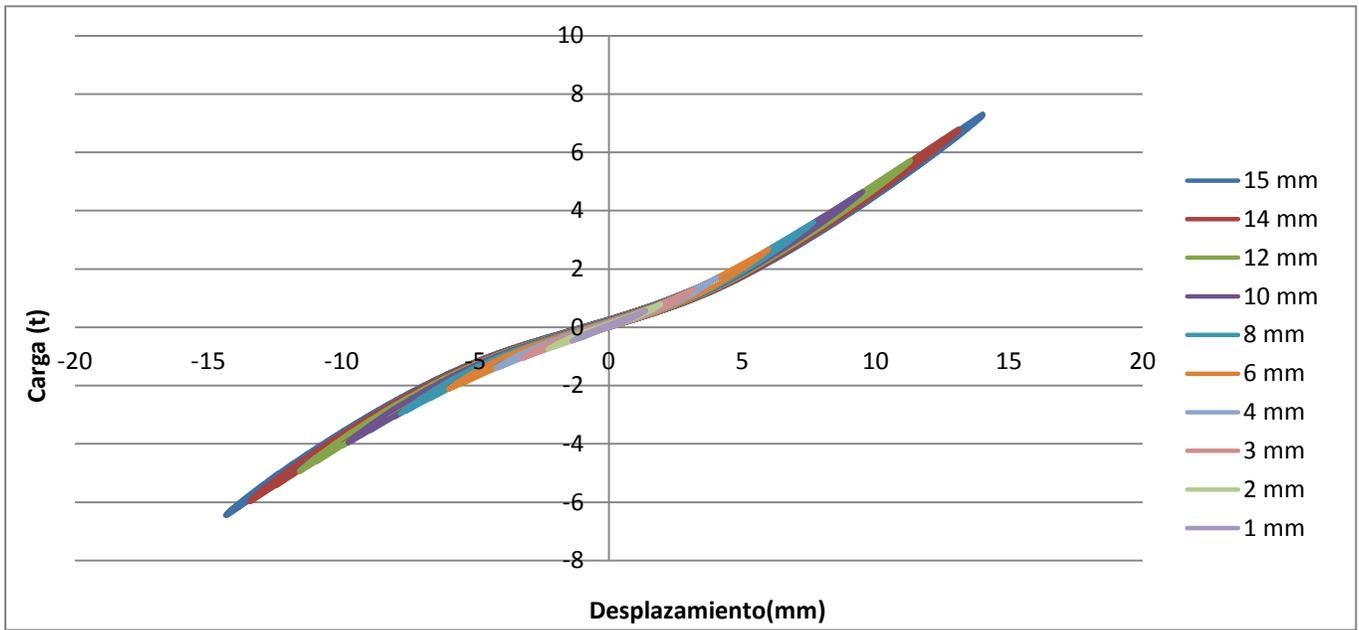


Fig. 5.1 Curvas histeréticas experimentales del modelo sin disipador

En el anexo A se pueden encontrar las curvas histeréticas para todos los desplazamientos aplicados en esta prueba.

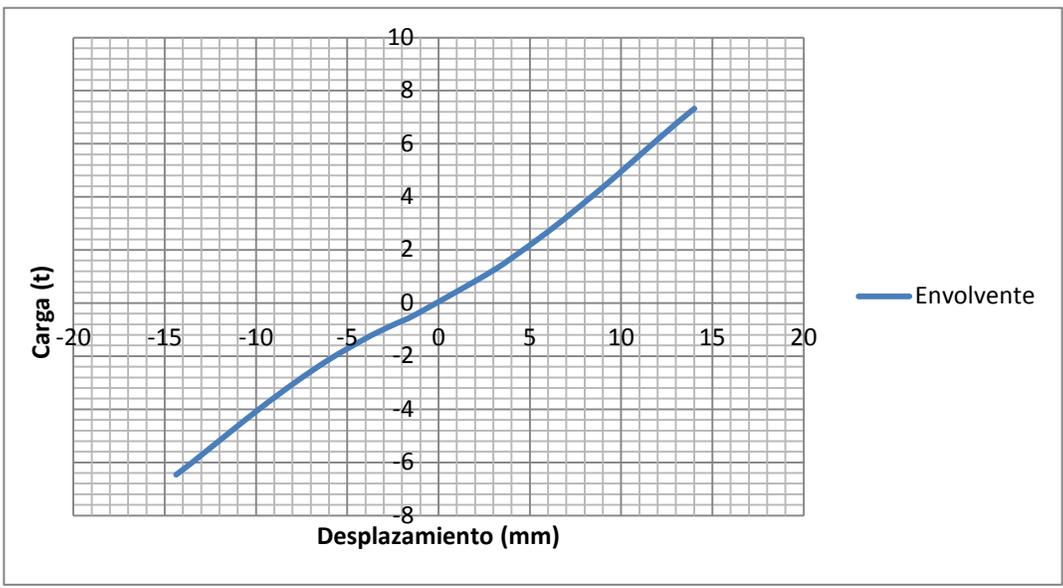


Fig. 5.2 Envoltente del modelo experimental sin disipadores

La figura 5.2 muestra la envoltente de la relación carga-desplazamiento. Se observa un comportamiento elástico. A los 2 mm de desplazamiento la carga es de 0.84 t mientras que para el desplazamiento de 14 mm se obtuvo una carga máxima de 7.32 t en ambos sentidos.

### 5.1.2 Curvas carga-deformación con disipador tipo 1

En la tabla 5.2 se muestra un resumen del modelo experimental con disipadores del tipo 1

Tabla 5.2 Resultados experimentales del modelo con disipadores tipo 1

<i>Prueba</i>	<b>Carga (t)</b>	<b>Desplazamiento positivo (mm)</b>	<b>Carga(t)</b>	<b>Desplazamiento negativo (mm)</b>
<i>1 mm</i>	3.57	0.51	3.87	0.46
<i>2 mm</i>	6.58	1.09	7.43	1.02
<i>3 mm</i>	9.32	1.69	10.16	1.66
<i>4 mm</i>	11.16	2.43	12.05	2.44
<i>6 mm</i>	13.62	4.01	14.60	4.13
<i>8 mm</i>	15.72	5.67	16.73	5.83
<i>10 mm</i>	17.57	7.34	18.29	7.58
<i>12 mm</i>	19.33	9.05	19.77	9.36
<i>14 mm</i>	21.04	10.74	21.29	11.14
<i>18 mm</i>	24.05	14.20	23.81	15.01

La figura 5.3 muestra las curvas de histéresis (carga-deformación) del modelo equipado con los disipadores tipo 1. Al ver las curvas, se puede notar la gran cantidad de energía absorbida por los disipadores. Se observa que el área bajo la curva comienza a ser mayor al incrementar el desplazamiento respectivo en cada prueba.

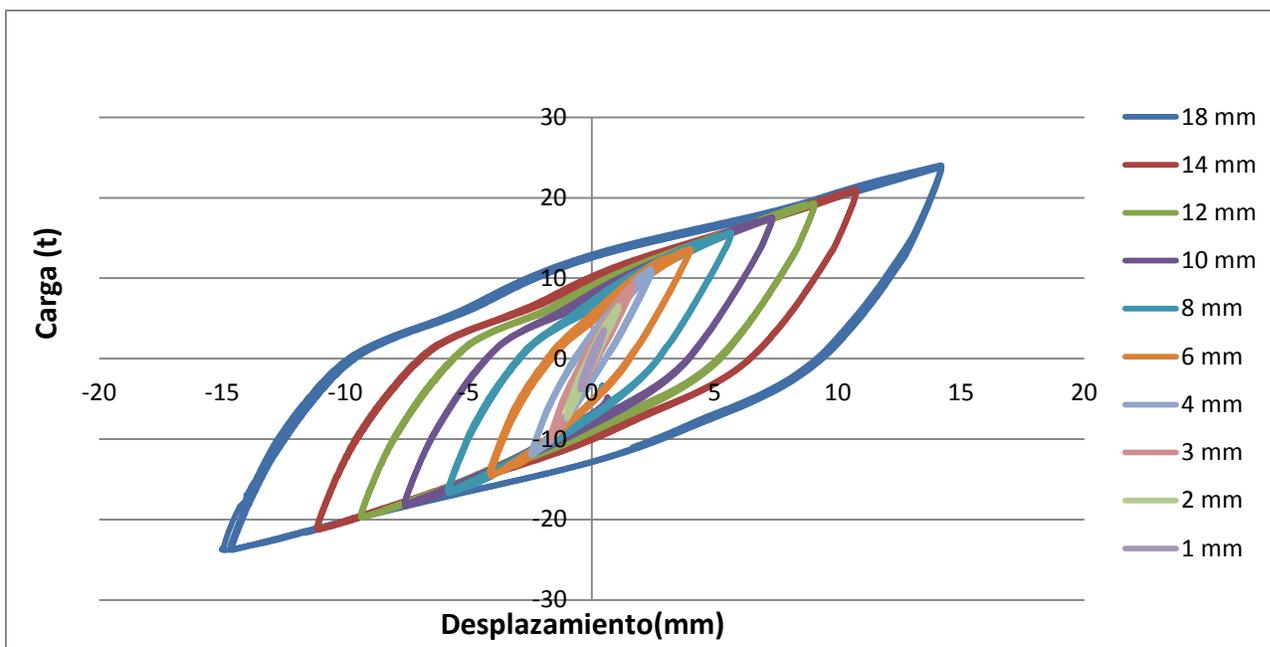


Fig. 5.3 Curvas histeréticas experimentales del modelo con disipadores tipo 1

En el anexo A se pueden encontrar las curvas histeréticas para todos los desplazamientos aplicados en esta prueba.

A partir de las curvas histeréticas del modelo para los desplazamientos a los que fue sometido se obtuvo una envolvente (Figura 5.4)

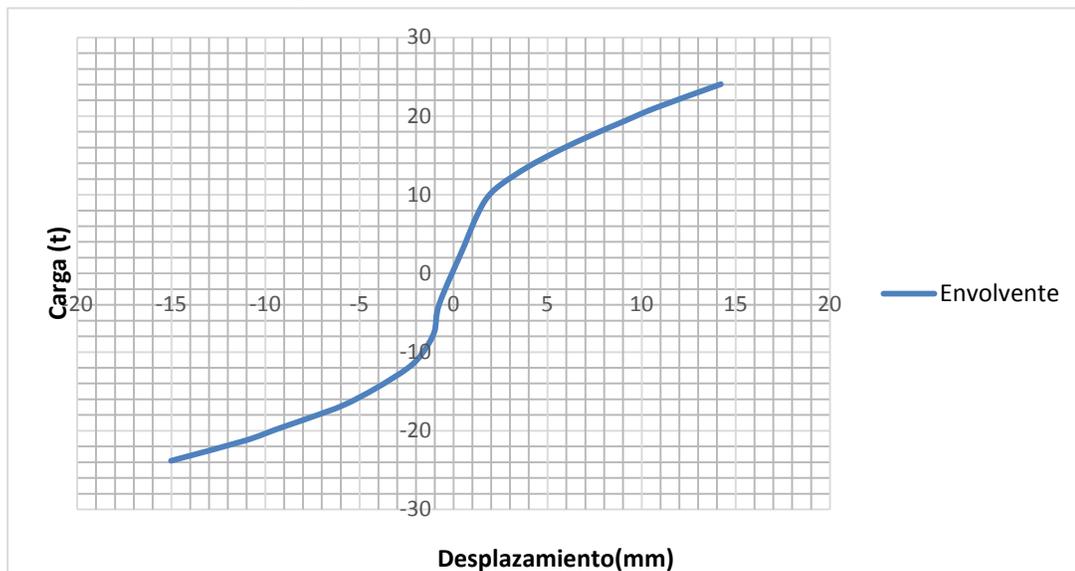


Fig. 5.4 Envolvente del modelo experimental con disipadores tipo 1

Se puede observar que el modelo equipado tuvo un comportamiento prácticamente bilineal con una carga y desplazamiento de fluencia de 10.19 t y 2mm, respectivamente. Después de la fluencia se observa una carga máxima de 24.0556 t a un desplazamiento máximo de 14.20 mm en dirección positiva y en dirección negativa una carga máxima de 23.81 t y un desplazamiento máximo de 15.01 mm.

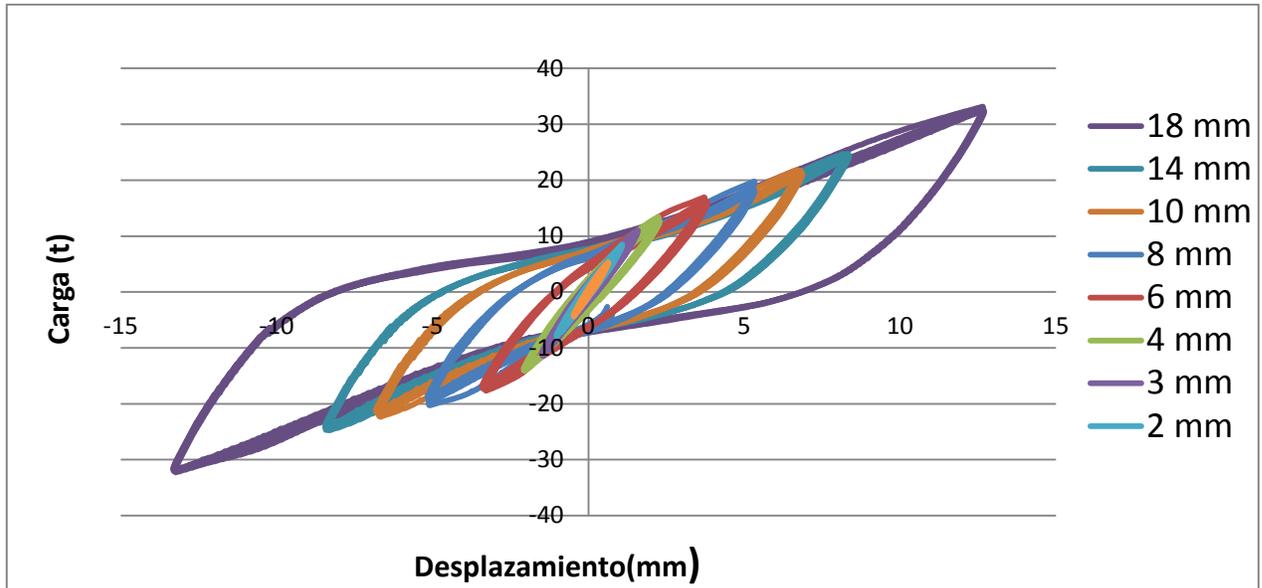
### 5.1.3 Curvas carga-deformación con disipador tipo 2

En la tabla 5.3 se muestra un resumen del modelo experimental con disipadores del tipo 2

Tabla 5.3 Resultados experimentales del modelo con disipadores tipo 2

<b>Prueba</b>	<b>Carga (t)</b>	<b>Desplazamiento positivo (mm)</b>	<b>Carga(t)</b>	<b>Desplazamiento negativo(mm)</b>
1 mm	5.30	0.64	4.43	0.47
2 mm	8.48	1.08	7.98	1.01
3 mm	11.02	1.58	11.42	1.47
4 mm	13.42	2.28	14.09	2.07
6 mm	16.92	3.81	17.66	3.41
8 mm	19.77	5.33	20.27	5.15
10 mm	21.86	6.87	22.32	6.81
14 mm	24.72	8.36	24.73	8.44
18 mm	33.14	12.69	32.25	13.32

La figura 5.5 muestra las curvas histeréticas (carga-deformación) del modelo equipado con los disipadores tipo 2. Se puede observar que, para los desplazamientos máximos se obtuvo una carga máxima de 33.14 t y un desplazamiento de 12.69 mm en el sentido positivo; mientras que, para el sentido negativo la carga máxima fue de 32.25 t y un desplazamiento de 13.32 mm.



*Fig. 5.5 Curvas histeréticas experimentales del modelo con disipadores tipo 2*

En el anexo A se pueden encontrar las curvas histeréticas para todos los desplazamientos aplicados en esta prueba.

La figura 5.6 muestra la envolvente de las curvas carga-deformación. Igualmente, se puede ver que la envolvente tiene un comportamiento casi bilineal con fluencia en 2 mm de desplazamiento y carga de 13.25 t. La carga máxima y su correspondiente desplazamiento fueron 34.8 t y 14 mm, respectivamente.

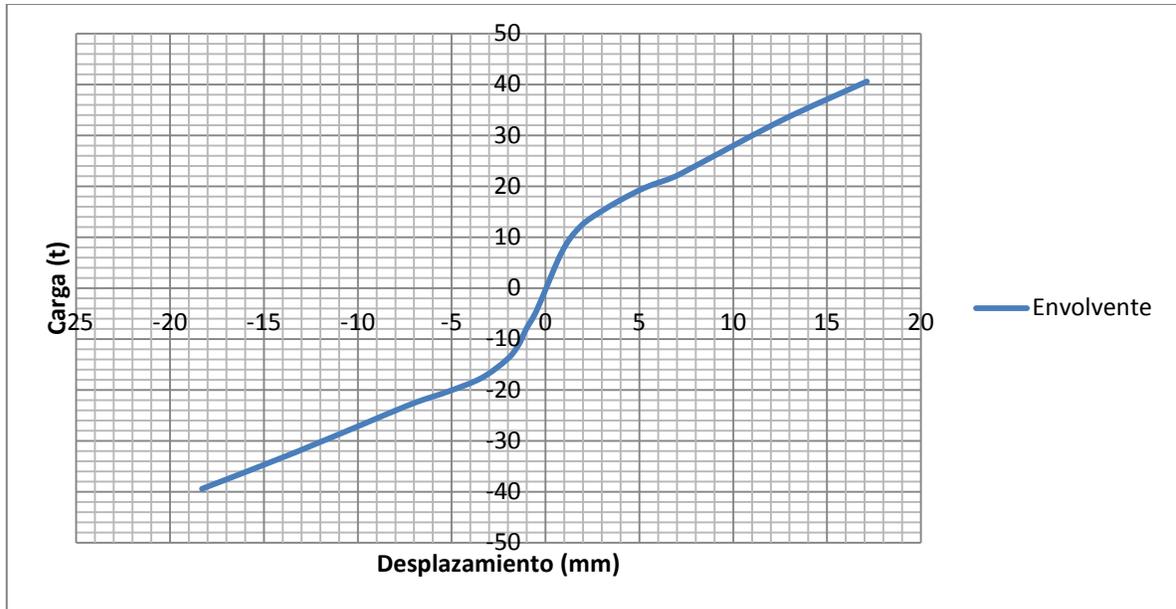


Fig. 5.6 Envolvente del modelo experimental con dissipador tipo 2

Al terminar la última prueba, el modelo fue sometido a pruebas adicionales de desplazamientos mayores. Esto se hizo para fines de entender la resistencia máxima que pueden soportar los dissipadores. Los desplazamientos aplicados fueron sometidos fueron de 24, 30 y 35 mm.

En la figura 5.7 se puede ver las curvas carga-deformación para las pruebas adicionales.

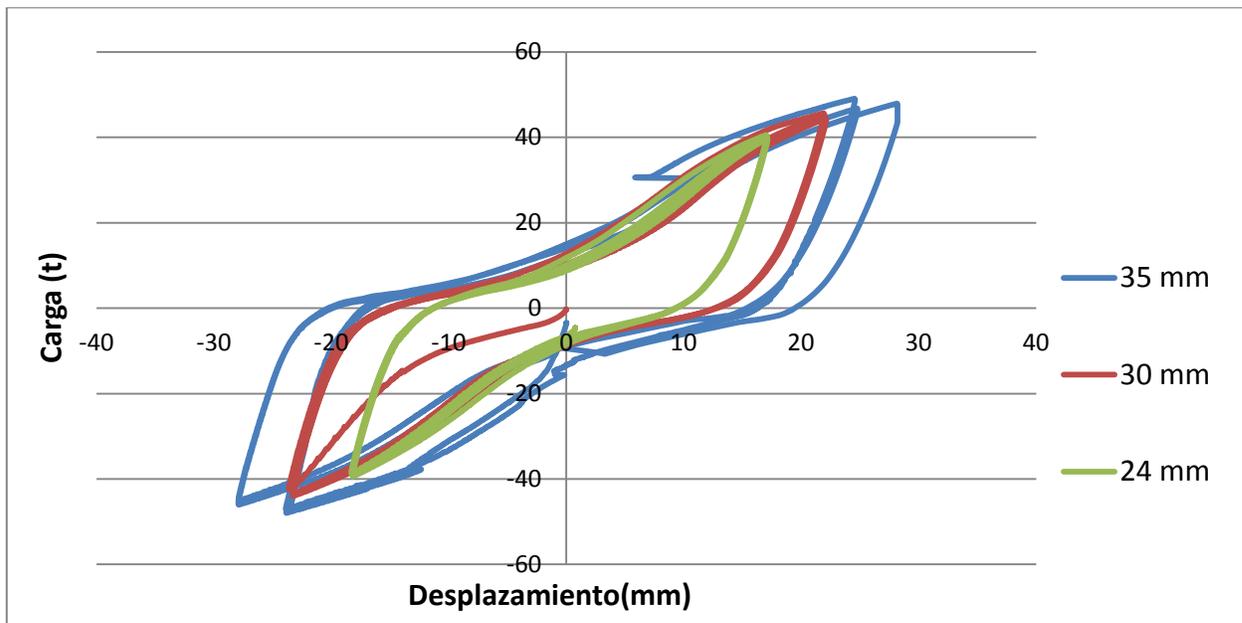


Fig. 5.7 Curvas histeréticas experimentales de pruebas adicionales con el dissipador tipo 2

Para la prueba adicional de 35 mm la conexión muro-disipador comenzó a ser inestable ya que las placas del disipador estaban desprendiendo concreto de la parte superior del muro. Por tal motivo, la prueba tuvo que ser detenida ya que el disipador dejó de cumplir su función.

## 5.2 RESULTADOS NUMÉRICOS

Los resultados obtenidos en el modelo numérico se obtuvieron con un análisis dinámico lento, usando el protocolo de la figura 2.15.

### 5.2.1 Modelo

#### 5.2.1.1 Curvas carga-deformación numéricas del marco sin disipador (SD)

La figura 5.8 muestra un estado de deformaciones aplicado al modelo sin disipadores mediante cargas laterales de 3.67 t establecidas anteriormente en la figura 4.1, las cuales generaron una deformación de 13.29 mm.

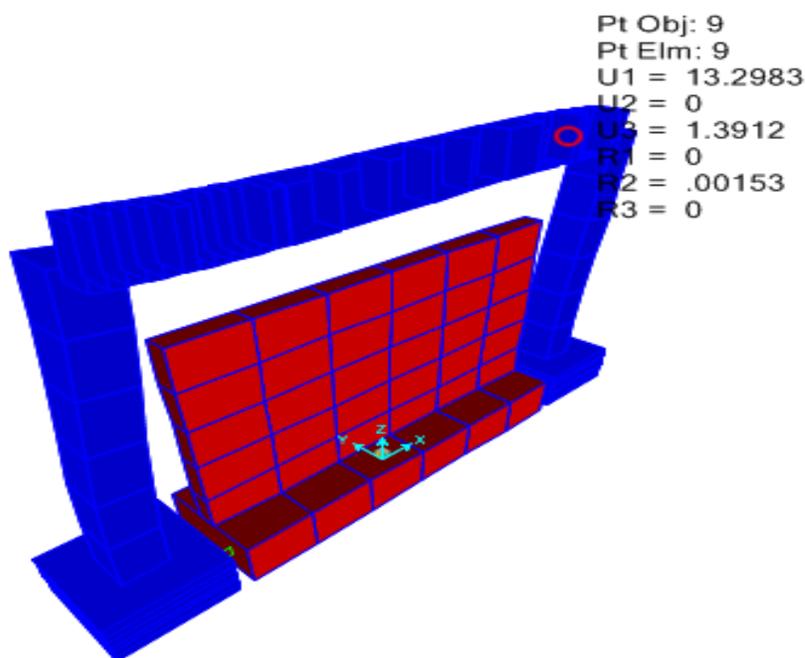


Fig. 5.8 Desplazamiento del modelo sin disipador

La curva carga-deformación se muestra en la figura 5.9, en donde se observa un comportamiento elástico lineal del marco.

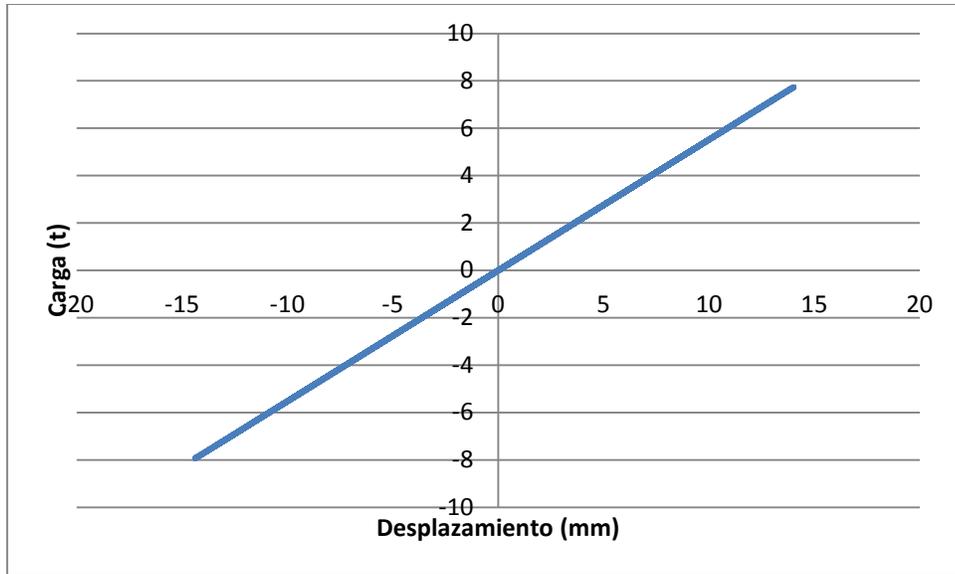


Fig. 5.9 Curvas histeréticas del modelo numérico sin disipadores en SAP2000

#### 5.2.1.2 Curvas carga-deformación numéricas con disipador tipo 1

Al ejecutar el análisis se obtuvo el comportamiento histerético mostrado en la figura 5.10. En donde se puede ver el comportamiento del modelo numérico ante los desplazamientos aplicados.

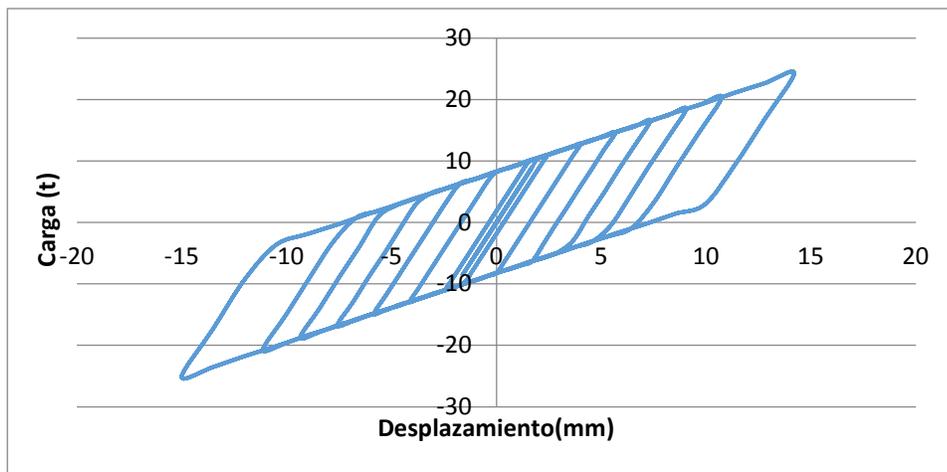


Fig. 5.10 Curvas histeréticas del modelo numérico con disipador tipo 1 en SAP2000

Se puede ver en la figura 5.10 que tiene un comportamiento cíclico prácticamente bilineal. El desplazamiento máximo positivo fue de 14.2 mm y una carga máxima de 24.30 t, mientras que en el sentido negativo se presentó un desplazamiento máximo de 15.01 mm y una carga máxima de 25.13 t.

### 5.2.1.3 Curvas carga-deformación numéricas con disipador tipo 2

En la figura 5.11 se puede observar los resultados obtenidos por el programa al ejecutar el mismo análisis que se utilizó para el modelo con disipadores del tipo 1.

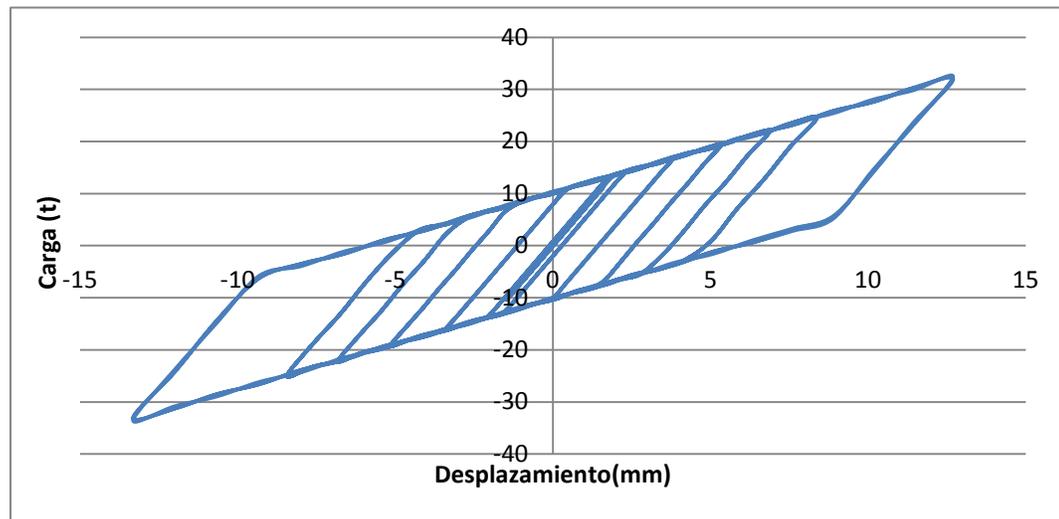


Fig. 5.11 Curvas histeréticas del modelo con disipadores tipo 2 en SAP2000

En estos resultados se puede ver el comportamiento histerético con un comportamiento prácticamente bilineal.

En la figura 5.11 se puede observar que el máximo desplazamiento obtenido para las pruebas fue de 12.09 mm y una carga de 31.44 t en el sentido positivo, mientras que en el sentido negativo se presentó un desplazamiento de 13.18 mm y una carga de 33.54 t.

## 5.2.2 Marco

Los resultados obtenidos para los diagramas de elementos mecánicos se muestran a continuación para cada tipo de prueba.

### 5.2.2.1 Diagramas de elementos mecánicos sin disipador (SD)

Los resultados numéricos de los diagramas se pueden ver en la tabla 5.4 haciendo referencia a las figuras 4.5 y 4.6

*Tabla 5.4 Resultados numéricos de elementos mecánicos sin disipador*

<b>Sentido</b>	<b>Elemento</b>	<b>Momento flexionante (t·m )</b>	<b>Fuerza cortante (t)</b>
<i>Positivo</i>	Columna	6.75	3.67
	Trabe	3.64	1.97
<i>Negativo</i>	Columna	6.75	3.67
	Trabe	3.64	1.97

### 5.2.2.2 Diagramas de elementos mecánicos con disipador tipo 1

Para el modelo con disipadores tipo 1 se obtuvieron los resultados numéricos de los diagramas, en la tabla 5.5 se pueden ver dichos resultados, haciendo referencia a las figuras 4.7 y 4.8.

*Tabla 5.5 Resultados numéricos de elementos mecánicos con disipador tipo 1*

<b>Sentido</b>	<b>Elemento</b>	<b>Momento flexionante (t·m )</b>	<b>Fuerza cortante (t)</b>
<i>Positivo</i>	Columna	7.21	3.92
	Trabe	3.88	2.1
<i>Negativo</i>	Columna	7.62	4.14
	Trabe	4.1	2.22

### 5.2.2.3 Diagramas de elementos mecánicos con disipador tipo 2

Para el modelo con disipadores tipo 2 se obtuvieron los resultados numéricos de los diagramas, en la tabla 5.6 se pueden ver los resultados haciendo referencia las figuras 4.9 y 4.10.

Tabla 5.6 Resultados numéricos de elementos mecánicos con disipador tipo 2

Sentido	Elemento	Momento flexionante (t·m)	Fuerza cortante (t)
<i>Positivo</i>	Columna	6.44	3.5
	Trabe	3.47	1.88
<i>Negativo</i>	Columna	6.76	3.68
	Trabe	2.95	1.97

### 5.2.3 Muro

#### 5.2.3.1 Esfuerzos con disipador tipo 1

De la modelación de elementos finitos en el programa SAP2000 se obtuvieron los correspondientes resultados para el modelo con los disipadores del tipo 1, en la tabla 5.7 se muestran los resultados de los diferentes esfuerzos producidos en el muro.

Tabla 5.7 Resultados numéricos de esfuerzos en el muro equipado con disipadores tipo 1

Comportamiento en el muro		
	Compresión (kg/cm <sup>2</sup> )	Tensión(kg/cm <sup>2</sup> )
<b><i>Esfuerzos horizontales</i></b>		
<i>Positivo</i>	80.27	76.41
<i>Negativo</i>	72.28	84.85
<b><i>Esfuerzos verticales</i></b>		
<i>Positivo</i>	71.98	66.59
<i>Negativo</i>	62.99	76.09
<b><i>Esfuerzos máximos</i></b>		
	342.10	361.62

### 5.2.3.2 Esfuerzos con disipador tipo 2

De igual manera, para los resultados numéricos del modelo equipado con los disipadores del tipo 2, en la tabla 5.8 se muestran los resultados de los diferentes esfuerzos producidos en el muro.

Tabla 5.8 Resultados numéricos de esfuerzos en el muro equipado con disipadores tipo 2

<b>Comportamiento en el muro</b>		
	<b>Compresión (<math>kg/cm^2</math>)</b>	<b>Tensión (<math>kg/cm^2</math>)</b>
<b><i>Esfuerzos horizontales</i></b>		
<i>Positivo</i>	72.76	68.78
<i>Negativo</i>	65.78	76.37
<b><i>Esfuerzos verticales</i></b>		
<i>Positivo</i>	65.25	59.94
<i>Negativo</i>	57.10	68.49
<b><i>Esfuerzos máximos</i></b>		
	310.12	325.51

## 5.3 COMPARACIÓN DE RESULTADOS EXPERIMENTALES Y NUMÉRICOS

En este apartado se compararon los siguientes puntos:

- *Curvas carga-deformación*

Se comparan los resultados obtenidos en la modelación numérica contra los resultados del modelo experimental.

- *Diagramas de elementos mecánicos*

Para estos elementos se comparan los resultados del modelo numérico contra los resultados obtenidos de las Normas Técnicas Complementarias (2004). Comparando así, los elementos mecánicos actuantes y resistentes.

*Momento flexionante:*

Los momentos resistentes se calculan revisando la sección (2.2.4 Fórmulas para calcular resistencia, pág.107 expresión 2.8) la cual establece:

$$M_R = F_R \left[ (A_S - A_S') f_y \left( d - \frac{a}{2} \right) + A_S' f_y (d - d') \right] \quad (5-1)$$

Tal que:

$$a = \frac{(A_S - A_S') f_y}{f_c' b} \quad (5-2)$$

De donde:

$M_R$  : Momento resistente

$F_R$  : Factor de resistencia

$A_S$  : Área del acero a tensión

$A_S'$  : Área de acero a compresión

$d$  : Peralte efectivo

$d'$  : Distancia entre el centroide del acero a compresión y la fibra extrema a compresión.

$f_y$  : Esfuerzo especificado de fluencia del acero de refuerzo

$a$  : Profundidad del bloque de esfuerzos a compresión en el concreto; también, en ménsulas, distancia de la carga al paño donde arranca la ménsula, mm (cm)

Las normas establecen un factor de resistencia de 0.9 para la flexión. En este caso se tomó la expresión sin factor de reducción, esto es para calcular la resistencia esperada.

*Fuerza cortante:*

Las fuerzas cortantes resistentes se calculan revisando la sección (2.5.1 Fuerza cortante que toma el concreto  $V_{cr}$ , pág.109, expresión 2.19) la cual establece:

$$V_{CR} = F_R b d (0.2 + 20p) \sqrt{f_c^*} \quad (5-3)$$

dónde:

$$p = \frac{A_S}{A_g} \quad \text{en columnas} \quad (5-4)$$

$$p = \frac{A_S}{b d} \quad \text{en vigas}$$

Si cumple la condición

$$p \leq 0.015$$

De donde:

$V_{CR}$  : Fuerza cortante que toma el concreto

$b$  : Ancho de la sección transversal

$d$  : Largo de la sección transversal

$f_c^*$  : Resistencia nominal del concreto a compresión

$p$  : Cuantía del acero de refuerzo longitudinal a tensión

$A_s$  : Area total del refuerzo longitudinal

$A_g$  : Area bruta de la sección transversal

Las normas establecen un factor de resistencia ( $F_R$ ) de 0.8 para cortante. En este caso se tomará la expresión sin factor de reducción, esto es para calcular la resistencia de manera más realista.

Para calcular dichos momentos flexionantes y fuerzas cortantes resistentes se dispondrán de las figuras 2.2 y 2.3 las cuales muestran las secciones y armados de los elementos estructurales.

Calculando los momentos y cortantes resistentes para los elementos se obtuvo lo siguiente:

Datos:

$$f'_c = 352.8218 \text{ Kg/cm}^2$$

$$f_y = 4282.81 \text{ Kg/cm}^2$$

Resistencia nominal del concreto:

$$f^*c = f'_c$$

$$f^*c = 352.82 \frac{\text{Kg}}{\text{cm}^2}$$

Esfuerzo uniforme equivalente

$$f''c = 0.85 (f^*c)$$

$$f''c = 0.85(352.82) = 299.89 \frac{\text{Kg}}{\text{cm}^2}$$

## Columnas

### Momento flexionante resistente

Tomando la sección y el armado (figura 2.2) se calculó el correspondiente momento resistente de la sección.

Ya que al comprimir el modelo se comprime solo el acero de refuerzo interno, se tomó como área a compresión sólo 3 varillas y las demás se consideraron a tensión. Así

$$A_s = 6.33 \text{ cm}^2$$
$$A'_s = 3.80 \text{ cm}^2$$

Utilizando las expresiones (5-1 y 5-2) para calcular el momento resistente se tiene lo siguiente:

Si

$$a = \frac{(6.3338 - 3.8003)4282.81}{(299.89)30} = 1.20$$

entonces:

$$M_R = \left[ (6.3338 - 3.8003)4282.81 \left( 27.5 - \frac{1.20}{2} \right) + 3.8003(4282.81)(27.5 - 2.5) \right]$$

$$M_R = 6.98 \text{ tm}$$

### Fuerza cortante resistente

Se utilizaron las expresiones 5-3 y 5-4 para calcular la fuerza cortante resistente en las columnas teniendo lo siguiente.

Con el acero longitudinal tenemos:

$$p = \frac{10.1341}{(30)(30)} = 0.01126$$

Entonces:

$$V_{CR} = (30)(30)(0.2 + 20(0.01126))\sqrt{352.82}$$

$$V_{CR} = 7.18 \text{ t}$$

### Trabe

### Momento flexionante resistente

Tomando la sección y el armado (figura 2.3) se calculó el correspondiente momento resistente de la sección.

Los datos utilizados son los siguientes:

A diferencia de la columna la trabe cuenta con la misma cantidad de acero a compresión que a tensión por lo tanto:

$$A_s = 3.8003 \text{ cm}^2$$
$$A'_s = 3.8003 \text{ cm}^2$$

Si sustituimos estos valores en la expresión 5-1 tendríamos lo siguiente:

$$M_R = [(3.8003)(4282.81)(37.5 - 2.5)]$$

$$M_R = 5.69 \text{ tm}$$

### Fuerza cortante resistente

Se utilizaron las expresiones (5-3 y 5-5) para calcular la fuerza cortante resistente en la trabe se tiene lo siguiente

Teniendo el acero longitudinal

$$p = \frac{7.6006}{(22)(37.5)} = 0.009212$$

Entonces:

$$V_{CR} = (22)(40)(0.2 + 20(0.009212))\sqrt{352.82}$$

$$V_{CR} = 6.35 \text{ t}$$

- *Esfuerzos en el muro*

Se comparan los esfuerzos actuantes obtenidos en el modelo con los esfuerzos resistentes obtenidos en las Normas Técnicas Complementarias (2004) (6.5.2.5 Fuerza cortante que toma el concreto  $V_{cr}$ , pág. 148, expresión 6.12). Teniendo las siguientes expresiones:

Si se cumple

$$\frac{H_m}{L} < 1.5 \quad (5-6)$$

entonces:

$$V_{CR} = 0.85F_R\sqrt{f_c^*}tL \quad (5-7)$$

De donde:

$H_m$  : Altura total del muro

$L$  : Longitud del muro en dirección de la fuerza cortante

Las normas establecen un factor de resistencia ( $F_R$ ) de 0.8 para cortante.

De la geometría del muro que se establece en el capítulo 2 (figura 2.4) podemos establecer lo siguiente:

Tomando la expresión (5-6) tenemos:

$$\frac{200}{312} = 0.6410 < 1.5$$

Como la expresión (5-7) obtiene la fuerza de corte resistente bastará con despejar  $tL$  de la igualdad para obtener el esfuerzo resistente, quedando la expresión de la siguiente manera:

$$\frac{V_{CR}}{tL} = 0.85F_R\sqrt{f_c^*}$$

Teniendo así

$$0.85(0.8)\sqrt{282.2574} = 11.42 \frac{Kg}{cm^2}$$

### 5.3.1 Comparación de resultados sin disipador (SD)

#### 5.3.1.1 Curvas carga-deformación

Se compara el modelo sin disipadores para analizar el comportamiento de este ante el máximo desplazamiento aplicado, mismo que fue de 14.01 mm con una carga máxima de 7.3255 t.

En la figura 5.12 se comparan las curvas de histerésis de los modelos numéricos y experimentales. Se puede apreciar que ambos tienen un comportamiento muy similar, por lo que se puede decir que el modelo numérico representa adecuadamente al modelo experimental.

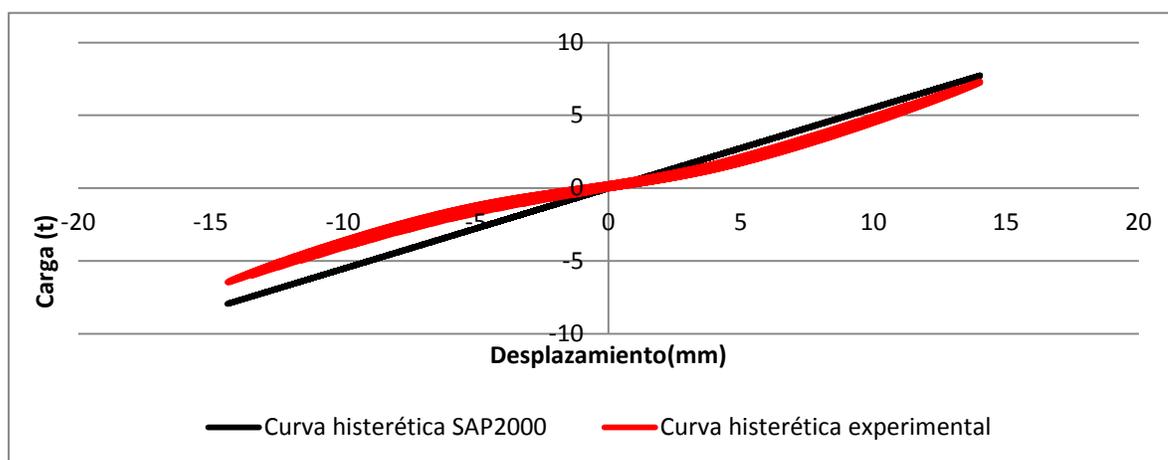


Fig. 5.12 Comparación de curvas histeréticas experimentales y numéricas: sin disipadores

Analizando más a detalle se puede ver que en el sentido positivo ambas curvas son casi iguales, mientras que en el sentido negativo se presenta una ligera diferencia. Es importante destacar que en ambos casos mantienen un comportamiento elástico-lineal.

#### 5.3.1.2 Diagramas de elementos mecánicos

En la tabla 5.9 se comparan los elementos mecánicos obtenidos numéricamente con los resistentes.

Tabla 5.9 Resultados de elementos mecánicos actuantes y resistentes sin disipador

Elemento	MR(t·m)	MA(t·m)	VR(t)	VA(t)
Columna	6.98	6.75	7.18	3.67
Trabe	5.69	3.64	6.35	1.97

Se puede ver que las fuerzas cortantes y momentos resistentes son mayores que las actuantes por lo tanto el modelo se comporta elástico ante estas fuerzas.

### 5.3.2 Comparación de resultados con disipadores tipo 1

#### 5.3.2.1 Curvas carga-deformación

Los resultados numéricos y experimentales del disipador tipo 1 se presentan en la figura 5.13. Se observa que ambos modelos presentan un comportamiento muy similar. Por lo tanto, los datos de la tabla 4.1 son adecuados para representar el comportamiento de los disipadores.

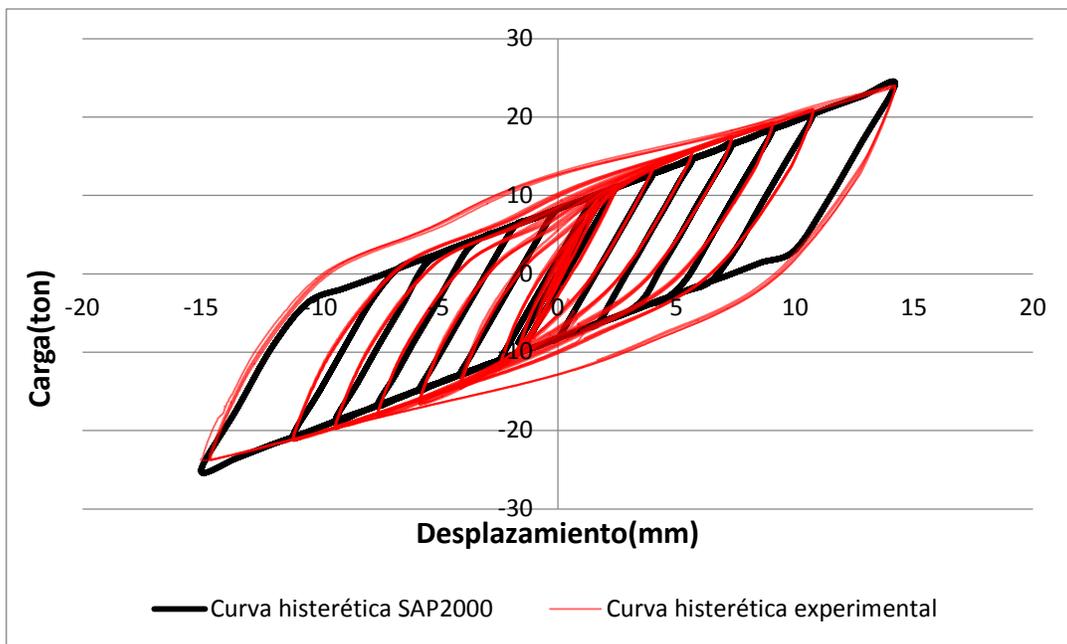


Fig. 5.13 Comparación de curvas experimentales y numéricas con disipadores tipo 1

#### 5.3.2.2 Diagramas de elementos mecánicos

En la tabla 5.10 se comparan los elementos mecánicos obtenidos numéricamente con los resistentes.

Tabla 5.10 Resultados de elementos mecánicos actuantes y resistentes con disipadores tipo 1

Elemento	MR(t·m)	MA(t·m)		VR(t)	VA(t)	
		(+)	(-)		(+)	(-)
Columna	6.98	7.21	7.62	7.18	3.92	4.14
Trabe	5.69	3.88	4.1	6.35	2.1	2.22

Se puede ver que las fuerzas cortantes resistentes son mayores que las actuantes por lo tanto el modelo se comporta adecuadamente ante estas fuerzas. Para los momentos resistentes se observa que los momentos actuantes son menores en la trabe, no así para la columna, donde los momentos actuantes superan a los resistentes ligeramente.

### 5.3.2.3 Esfuerzos en el muro

Los esfuerzos actuantes obtenidos en el modelo resultaron menores que los esfuerzos resistentes establecidos por las Normas Técnicas Complementarias (2004) ecuación (5-7) ya que no sobrepasan el límite resistente de  $11.42 \text{ kg/cm}^2$ .

## 5.3.3 Comparación de resultados con disipadores tipo 2

### 5.3.3.1 Curvas carga-deformación

Los resultados numéricos y experimentales del disipador tipo 2 se graficaron en la figura 5.14. Se observa que ambos modelos presentan un comportamiento muy similar. Por lo tanto, los datos de la tabla 4.2 son adecuados para representar el comportamiento de los disipadores.

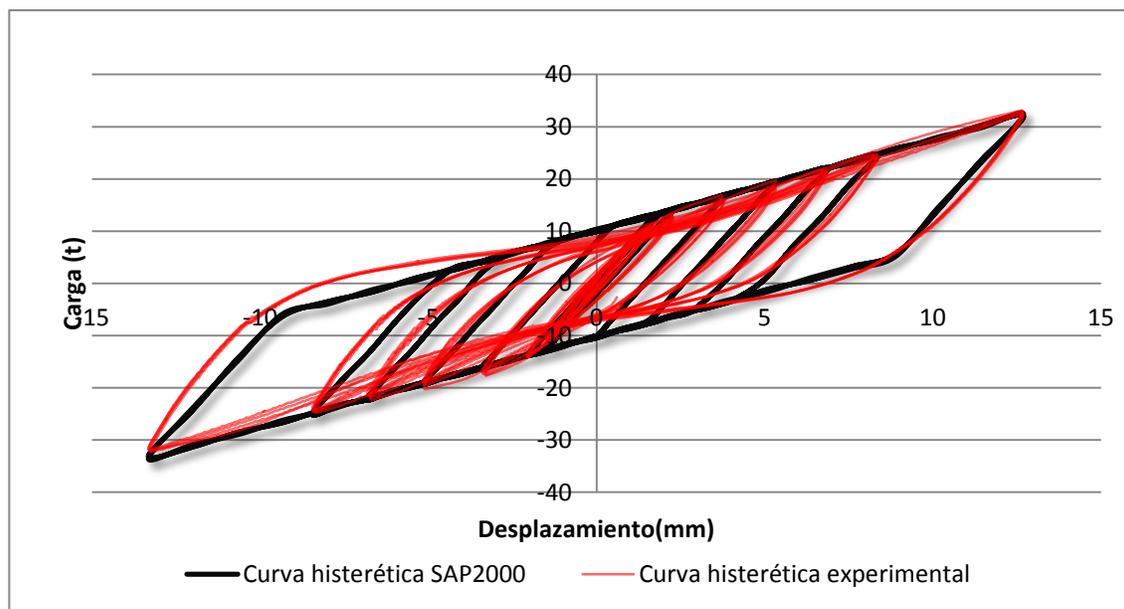


Fig. 5.14 Comparación de curvas experimentales y numéricas con disipador tipo 2

### 5.3.3.2 Diagramas de elementos mecánicos

En la tabla 5.11 se comparan los elementos mecánicos obtenidos numéricamente con los resistentes.

Tabla 5.11 Resultados de elementos mecánicos actuantes y resistentes con disipadores tipo 2

Elemento	MR(t·m)	MA(t·m)		VR(t)	VA(t)	
		(+)	(-)		(+)	(-)
Columna	6.98	6.44	6.76	7.18	3.5	3.68
Trabe	5.69	3.47	3.64	6.35	1.88	1.97

Se puede ver que las fuerzas cortantes y momentos resistentes son mayores que las actuantes por lo tanto el modelo se comporta de manera elástica.

### 5.3.3.3 Esfuerzos en el muro

Los esfuerzos actuantes obtenidos en el modelo resultaron menores que los esfuerzos resistentes establecidos por las Normas Técnicas Complementarias (2004) ecuación (5-7) ya que no sobrepasan el límite resistente de  $11.42 \text{ kg/cm}^2$ .

## **6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

## **6.1 CONCLUSIONES**

Con base en los resultados y comparaciones obtenidos tanto en el modelo experimental como numérico se puede concluir lo siguiente, tomando en cuenta los objetivos de esta tesis.

- Al hacer la comparación de resultados para cada tipo de disipador podemos concluir que las resistencias, rigideces y rigideces post-fluencia calculados son adecuados ya que se tuvo un comportamiento muy similar entre el modelo experimental y el numérico.
- Mientras que la resistencia de los disipadores se puede calcular con la ecuación (3-1), la rigidez se puede calcular con la ecuación (3-12).
- La rigidez post-fluencia se puede considerar en promedio de 7 %
- El modelo numérico desarrollado fue exitoso ya que representó muy bien los resultados obtenidos en la realidad.
- Podemos concluir que los disipadores empleados en este experimento cumplieron correctamente su función principal, la cual es disipar energía y proteger a la estructura.
- Se cumplieron exitosamente los objetivos de esta tesis por los puntos ya mencionados.

## **6.2 RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS**

Se ofrecen las siguientes recomendaciones para la implementación de los disipadores “SLB”.

- En las conexiones muro-disipador-trabe se debe de contar con un correcto ensamblaje uno de otro, cuidando mucho la conexión de estos debido que, como se observó en el experimento, las conexiones comenzaron a ser inestables provocando que el muro sufriera afectaciones no previstas. Se recomienda cuidar mucho la implementación correcta de los tornillos de conexión en el muro.
- Se debe cuidar la restricción de los patines del disipador, sobre todo del patín superior (tipo peine), ya que al no estar restringido puede presentar efectos de pandeo y torsión en el alma; provocando deformación fuera del plano y que el disipador deje de cumplir su función principal, que es proteger a la estructura.
- Para el caso de realizar pruebas de investigación posteriores se recomienda implementar varios transductores directamente en la zona del muro para cuidar su respectivo desplazamiento.
- Así mismo para realizar pruebas de investigación posteriores se recomienda cuidar las condiciones de frontera del modelo en general, restringiendo adecuadamente las conexiones trabe-columna y la conexión de las zapatas a la losa de reacción.

## REFERENCIAS

## REFERENCIAS

Régules, S. (2017). Sismos. *¿Cómo vés? Revista de divulgación de la ciencia de la Universidad Nacional Autónoma de México*,(228),

Servicio Sismológico Nacional, Instituto de Geofísica, UNAM. *Magnitud de un sismo* Recuperado de <http://www.ssn.unam.mx/jsp/reportesEspeciales/Magnitud-de-un-sismo.pdf>. Acceso 25 de enero de 2018.

Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Epicentro. *Vocabulario Científico y Técnico*. Recuperado de <http://www.rae.es/vocabulario-cientifico-y-tecnico>. Acceso 2 de febrero de 2018.

Meza, O.N "Los 8 sismos más catastróficos en la historia de México" *Forbes* [México].18 Septiembre 2015.Recuperado de <http://www.forbes.com.mx/los-8-sismos-mas-catastroficos-en-la-historia-de-mexico>. Acceso 10 de octubre de 2017.

Cruz, A. y Ordaz, M.¿Qué ocurrió el 19 de Septiembre de 2017 en México?. Recuperado de <http://ciencia.unam.mx/leer/652/-que-ocurrio-el-19-de-septiembre-de-2017-en-mexico>. Acceso 28 de septiembre de 2017.

Romero, M. Enrique., (1993) Experiences on the use of supplementary energy dissipators on building structures. International Post-SMiRT Conference Isolation, Energy Dissipation and Control of Vibrations of Structures, Capri (Naples), Italia, Agosto de 1993.

Oviedo, A. Juan Andrés y Duque U., María del Pilar. (2006). Sistemas de control de respuesta sísmica en edificaciones. *Revista EIA*, vol. 6, pp. 105-120.

Oviedo, A. Juan Andrés; Mitsumasa, Midorikawa and Tetsuhiro, Asari. (2008). Optimum strength ratio of buckling-restrained braces as hysteretic energy dissipation devices installed in R/C frames. Proceedings of the 14th World Conference on Earthquake Engineering, Beijing, China.

Oviedo, A. Juan Andrés; Midorikawa Mitsumasa and Asari Tetsuhiro. (2008). Optimum strength ratio of hysteretic energy dissipating devices in R/C frames. *Journal of Structural Engineering*, vol. 54B, pp. 571-580.

Oviedo, A. Juan Andrés y Duque U, María del Pilar. (2009) Disipadores histeréticos metálicos como técnica de control de respuesta sísmica en edificaciones colombianas. *Revista EIA*. (11): 51-63.

Ruíz, J. y Molina, E., (2006), *Inelastic displacement ratios for evaluation of structures built on soft soil sites*, México: Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología.

Jorge Ruiz-García, Héctor Guerrero, Estimation of residual displacement ratios for simple structures built on soft-soil sites, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2017, 100, 555.

NTC-Concreto (2004), “*Normas Técnicas Complementarias para el Diseño y Construcción de Estructuras de Concreto del Reglamento de Construcción del Distrito Federal*”, Departamento del Distrito Federal.

González, C.O., y Robles, F.F. (2005). *Aspectos fundamentales del concreto reforzado (4ª edición)*. México. Ed. Limusa.

Popov E. Engineering mechanics of solids. Prentice Hall. Englewood Cliffs, New Jersey. 1990.

Instituto de Ingeniería, UNAM. (2017). *Ensaye experimental de un marco de concreto reforzado equipado con disipadores de energía sísmica “SLB”*.

Bozzo, L. (2017). *Disipadores SLB para diseño sismorresistente*. [diapositivas de PowerPoint]

M, A, Clemente. (2011). *Caracterización y estudio de sistemas con histéresis de tipo Bouc-Wen*. Recuperado de [https://earchivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/18835/TFM\\_MRA\\_Alejandro\\_Martin\\_Clemente](https://earchivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/18835/TFM_MRA_Alejandro_Martin_Clemente). Acceso 15 de enero de 2018.

ACI 318-05. Requisito de Reglamento para Concreto Estructural, Farmington Hills, Michigan, USA, enero de 2005.

Recuperado de:

<http://ciencias-de-la-tierra1.blogspot.mx/2015/05/gabriela-ruiz-leninsandoval-terremotos.html>

<http://www.eluniversal.com.mx/articulo/cultura/letras/2015/08/27/palabras-e-imagenes-para-recordar-el-terremoto-del-85>.

<https://www.horacero.com.mx/nacional/las-grandes-dudas-del-terremoto-de-1985/>

[http://sirve.cl/archivos/6199/dispositivos-antisismicos-sirve\\_disipador-adas-de-cobre-](http://sirve.cl/archivos/6199/dispositivos-antisismicos-sirve_disipador-adas-de-cobre-)

<http://byron-hoffmann.blogspot.mx/2013/05/>

<https://www.quaketek.com/es/disenio-sismico-con-disipadores-a-friccion/>

<http://cdvperu.com/disipadores-taylor/>

<http://ingenieriasismicaylaconstruccioncivil.blogspot.mx/2013/06/dispositivos-de-disipacion-de-energia.html>

[https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S071850732015000300006](https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S071850732015000300006).

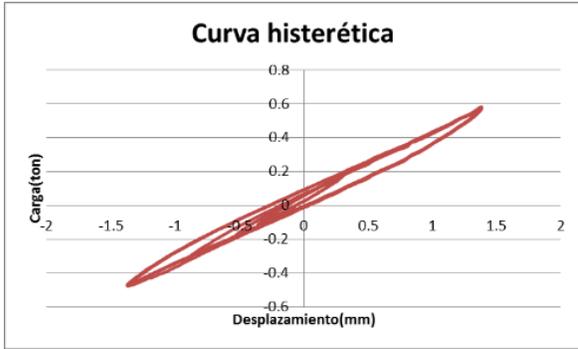
## ANEXOS

## ANEXO A

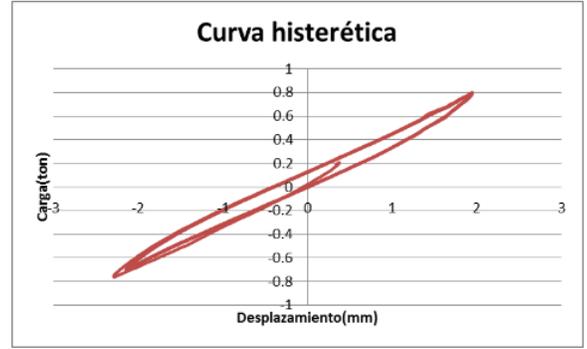
### Resultados experimentales:

Gráficas de curvas histeréticas para cada prueba.

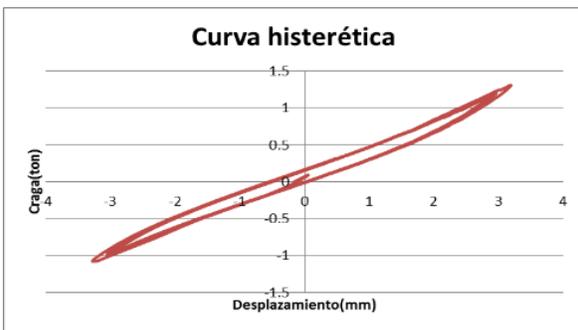
#### *Resultados sin disipador (SD)*



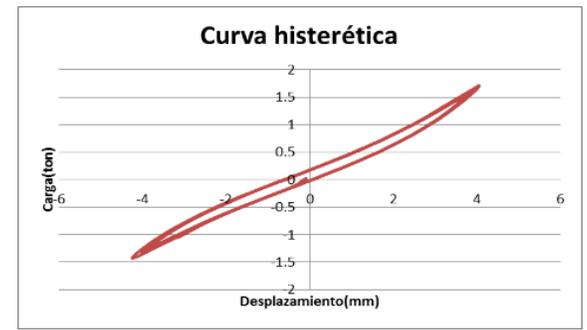
1 mm



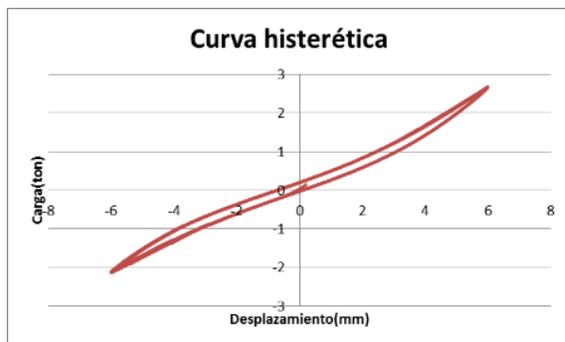
2 mm



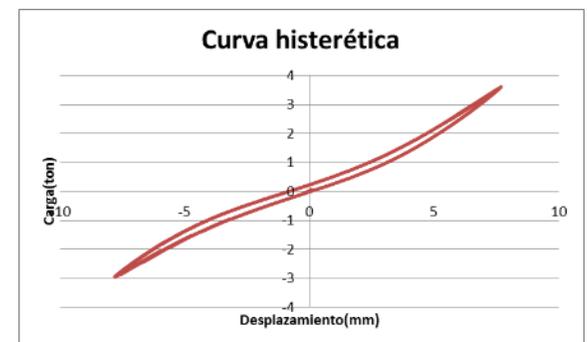
3 mm



4 mm



6 mm



8 mm



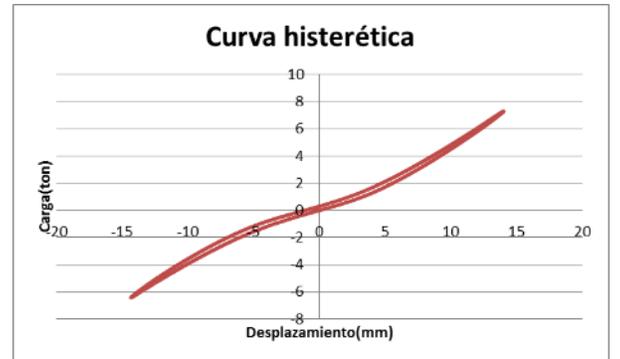
10 mm



12 mm

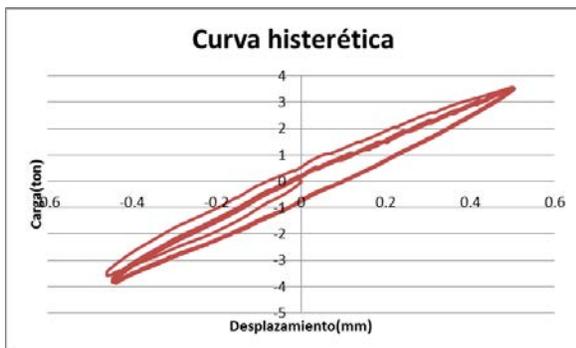


14 mm

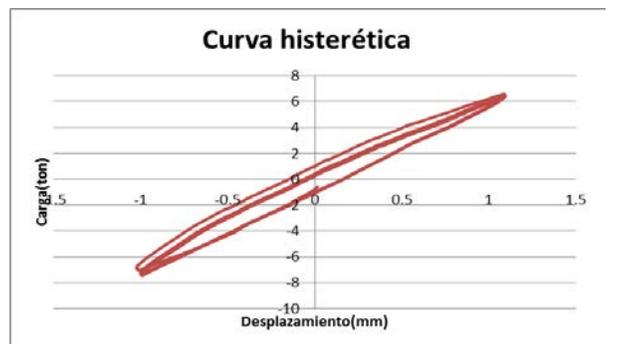


15 mm

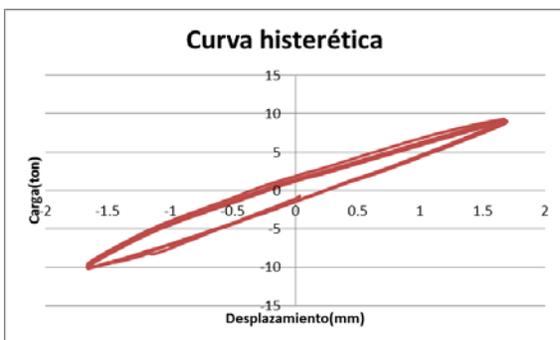
Resultados con disipador tipo 1



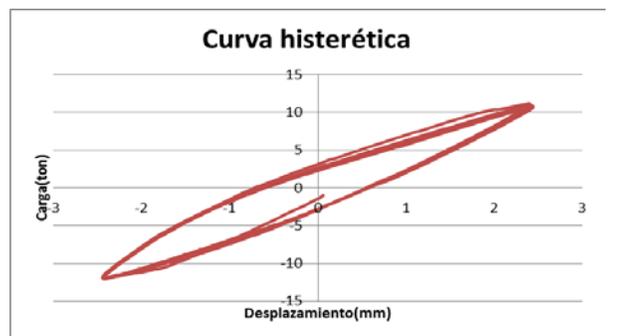
1 mm



2 mm



3 mm



4 mm



6 mm



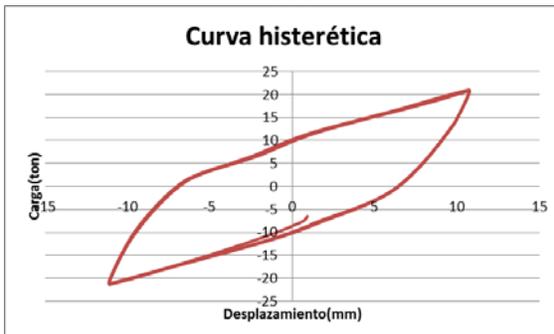
8 mm



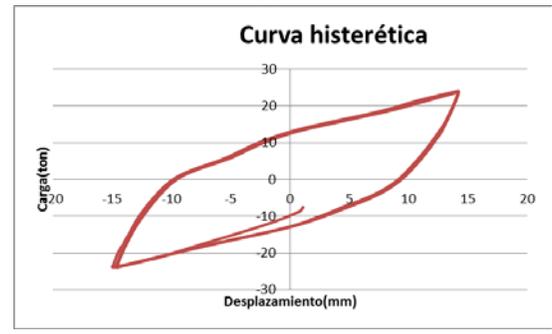
10 mm



12 mm

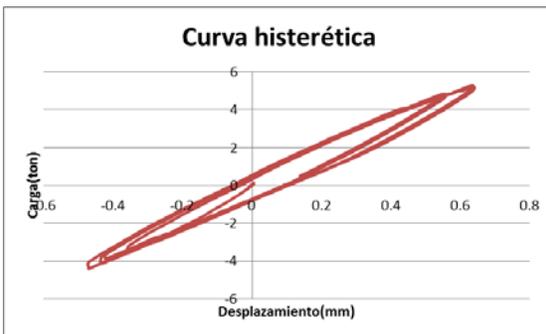


14 mm

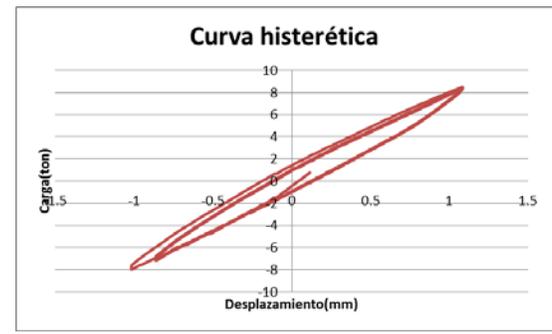


18 mm

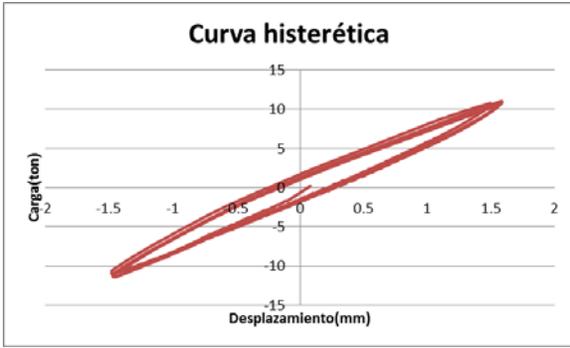
Resultados Disipador tipo 2



1 mm



2 mm



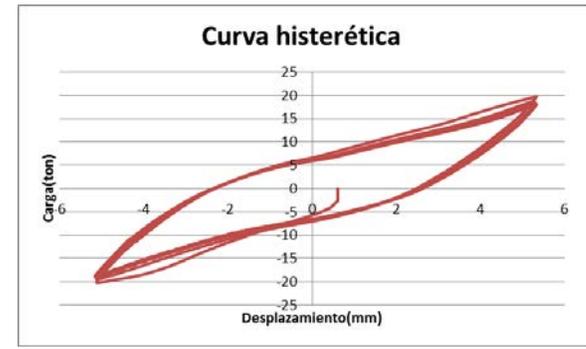
3 mm



4 mm



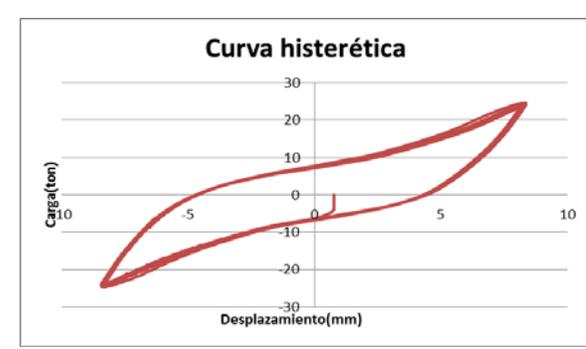
6 mm



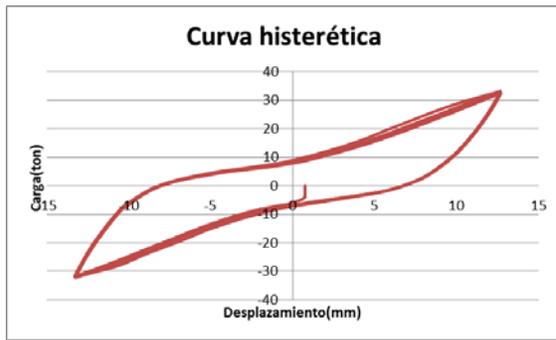
8 mm



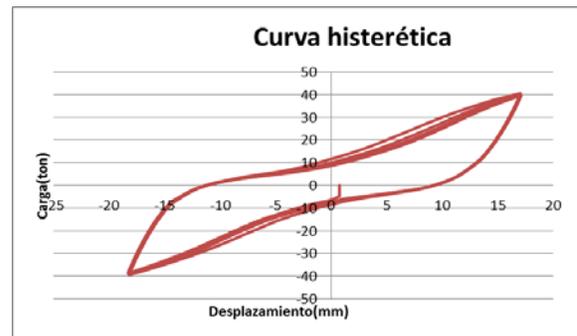
10 mm



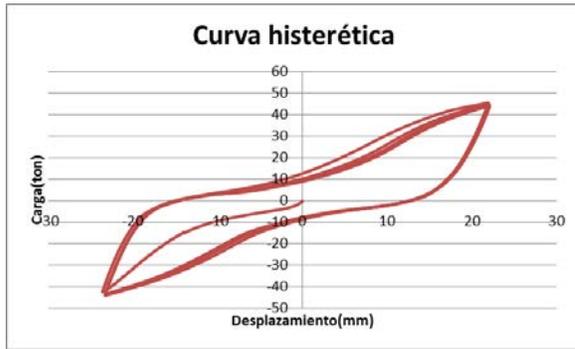
14 mm



18 mm



24 mm



30 mm



35 mm