



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Respuesta sísmica de una estructura escolar
equipada con disipadores de energía sísmica**

TESIS

Que para obtener el título de:

Ingeniera Civil

PRESENTA

Valeria Estefanía García Pantoja

DIRECTOR DE TESIS

Dr. Héctor Guerrero Bobadilla



Ciudad Universitaria, CDMX, 2022

Índice

6

1.	Introducción	7
2.	Disipadores de energía sísmica	9
2.1	Funcionalidad de los disipadores de energía sísmica.....	9
2.2	Clasificación de los disipadores de energía sísmica	10
2.3	Disipador hysterético del tipo Dampo 1505	13
3.	Pruebas experimentales del disipador	14
3.1	Configuración del experimento.....	14
3.2	Descripción del disipador Dampo 1505.....	15
3.3	Protocolo de carga.....	16
3.4	Instrumentación.....	16
3.5	Resultados	17
3.5.1	Prueba 1	17
3.5.2	Prueba 2	17
3.5.3	Prueba 3	18
3.6	Discusión de resultados.....	18
4.	Modelo numérico de una escuela equipada	20
4.1	Descripción de la estructura.....	20
4.2	Materiales de construcción	21
4.3	Geometría global.....	22
4.4	Cargas de diseño	23
4.4.1	Carga muerta.....	24
4.4.2	Carga viva	24
4.4.3	Fuerzas sísmicas.....	25
4.5	Comportamiento no lineal.....	30
5.	Curvas de Capacidad.....	31
6.	Respuesta sísmica	33
6.1	Respuesta ante la intensidad sísmica de diseño actual.....	33
6.1.1	Desplazamientos laterales máximos	36
6.1.2	Distorsiones de entrepiso	37
6.1.3	Cortante basal.....	38
6.1.4	Elementos mecánicos.....	39
6.1.4.1	Carga axial	39

6.1.4.2	Cortante.....	41
6.1.4.3	Momento.....	41
6.1.5	Estado de daño.....	42
6.1.6	Curvas de histéresis de los disipadores.....	43
6.2	Respuesta sísmica al 50% de la intensidad de diseño actual.....	45
6.2.1	Desplazamientos laterales máximos.....	48
6.2.2	Distorsiones de entrepiso.....	49
6.2.3	Cortante basal.....	49
6.2.4	Elementos mecánicos.....	50
6.2.4.1	Carga axial.....	50
6.2.4.2	Cortante.....	51
6.2.4.3	Momento.....	52
6.2.5	Estado de daño.....	52
6.2.6	Curvas de histéresis de los disipadores.....	54
7.	Discusión de resultados.....	56
8.	Conclusiones y recomendaciones.....	59
9.	Referencias.....	60

“Aceptar sin crítica toda noción, idea e hipótesis equivale a no saber nada. Las ideas se contradicen una a otra; sólo mediante el escrutinio escéptico podemos decidir entre ellas. Realmente, hay ideas mejores que otras.

[...]

Tanto el escepticismo como el asombro son habilidades que requieren atención y práctica. Su armonioso matrimonio dentro de la mente de todo escolar debería ser un objetivo principal de la educación pública.”

- Carl Sagan, *The Demon-haunted World*, 1995.

DEDICATORIA.

Mamá, siempre me diste la oportunidad de ser libre, de elegir mis batallas y confiar en que lo haría bien. Nutriste en mí las ganas de emprender un viaje que me llevara a la autorrealización y ser mi propia fuente de inspiración y orgullo. Eres parte esencial de la persona que soy hoy, gracias.

Papi y Mami, sé que están orgullosos de mí y me bendicen desde el cielo, gracias por ser mis segundos padres, su ejemplo siempre me ha servido de motivación, el cual me enseñó que siempre podremos acceder a una mejor realidad, pero hay que trabajar en ella con convicción, humildad y paciencia. Los mayores imperios no se construyeron en un día.

Hermanos, son mis compañeros de vida, mis confidentes y unos grandes maestros de vida.

Amigas y amigos cercanos, son ustedes la familia que yo he elegido.

Vida, por permitirme llegar aquí, gracias por todo lo ganado y lo perdido, por lo aprendido y lo olvidado, por todo lo que me brindas día con día.

AGRADECIMIENTOS.

La Universidad Nacional Autónoma de México, ha sido para mí un puente que me ha llevado al conocimiento, al aprendizaje y a la materialización de mis metas. Agradezco a la UNAM por ser mi alma máter desde la preparatoria y brindarme la oportunidad de acceder a educación laica, gratuita y autónoma.

Agradezco a la Facultad de Ingeniería, por permitirse permear los cambios de la sociedad en el tiempo para abrir el paso a la ingeniería a más mujeres, lo que a mí me condescendió la oportunidad de forjar un camino en esta profesión.

Gracias al Instituto de Ingeniería, por ser cuna de nuevos estudiantes de ingeniería al brindar su apoyo en cuestiones económicas, didácticas, y tecnológicas, apoyo del cual pude ser acreedora y me siento sumamente agradecida.

Y en especial, y un cálido agradecimiento al Ing. Héctor Guerrero Bobadilla, por su incondicional paciencia y soporte a lo largo de toda mi carrera, por la confianza depositada en mí y ser mi guía a lo largo de este trabajo.

RESUMEN

Se presentan los resultados de un estudio enfocado en evaluar la respuesta sísmica de una estructura escolar equipada con disipadores de energía sísmica tipo Dampo 1505. Para fines de la evaluación se realizó análisis dinámico no lineal, tipo paso a paso de un prototipo de escuela denominado “U1-C” del año 2011, creado por el Instituto Nacional de Infraestructura Física Educativa (INIFED). Para ello, se hizo uso del programa ETABS (2016). Para fines de comparación, la escuela fue analizada con un sistema estructural convencional y equipada con el sistema de protección sísmica, esto es: los disipadores tipo Dampo 1505. Se consideró su ubicación en Acapulco de Juárez, en el estado de Guerrero, que es una de las regiones con mayor amenaza sísmica de toda la república mexicana. Se presentan y discuten los resultados más relevantes de la evaluación de la respuesta sísmica de la escuela y se ofrecen algunas conclusiones y recomendaciones de interés.

1. Introducción

Sólo es necesario un avistamiento rápido hacia al pasado para observar lo que los terremotos han causado en México y en el mundo. Como es de conocimiento público, nuestro país ha sufrido grandes eventos sísmicos que han generado grandes afectaciones a las estructuras y a la sociedad. Ello ha puesto en tela de juicio la capacidad para reaccionar ante una catástrofe, por lo que el desarrollo de la Ingeniería Civil se ha encaminado hacia una mejora continua en el modo de diseñar y construir estructuras. Ello ha ocasionado la propuesta de nuevas metodologías de diseño estructural y el desarrollo de nuevas tecnologías, como los disipadores Dampo 1505 (Dampo, 2019).

Ante la gran demanda poblacional de recursos en términos de infraestructura se han creado organismos públicos gubernamentales con el fin de administrar los recursos destinados a esta necesidad y darles una buena distribución a lo largo de todo el país. En el ámbito de la infraestructura educativa, se ha creado el Instituto Nacional de Infraestructura Física Educativa (INIFED). Este instituto se ha encargado de diseñar y construir, a lo largo y ancho del territorio mexicano, escuelas para albergar estudiantes de las más nuevas generaciones, para darles la oportunidad de tener un espacio de esparcimiento y aprendizaje del nivel básico de educación.

Sin embargo, dichas escuelas se han visto afectadas por los eventos sísmicos, ya que se han observado daños estructurales en el pasado, que han llevado a las autoridades a cancelar las clases en dichos inmuebles. Con la intención de mitigar el problema, se busca tener una alternativa que logre adaptar estas escuelas para ser capaces de soportar las sollicitaciones sísmicas, sin tener que cerrarlas y/o evitar su reconstrucción total o parcial. En ese sentido, se necesitan alternativas económicas, de fácil acceso para que lleguen hasta las comunidades más remotas, y que sean adaptables para cualquier tipo de estructura con el fin de incrementar su resistencia.

Integrar un sistema de protección a las estructuras siempre será algo benéfico, por lo que en cuanto más pronto suceda, será más eficiente y de gran ayuda. Si eso se logra, las escuelas tendrán una mayor capacidad de recuperación y podrán ofrecer servicios educativos a los estudiantes de manera regular.

Por otro lado, para fines de reforzamiento de una estructura existente, primero se debe realizar una evaluación que permita comprender cómo y por qué fue diseñada de tal manera, conceptualizarla en el tiempo que fue concebida, bajo el marco normativo que aplicaba, y entender la función que se le dio al inmueble y su importancia en la sociedad. Por último, se debe estimar cuál sería el costo de perder la estructura en un evento sísmico.

Con esa valoración, se puede llegar a tener otra referencia para entender los beneficios de usar un sistema de protección sísmica como lo son los disipadores de energía. Es de aquí que surge la importancia de emplear la tecnología y los nuevos avances de la ingeniería.

Actualmente, no hay tecnología capaz de predecir cuándo sucederá un sismo, ni con qué magnitud o ubicación. Sin embargo, ante la incertidumbre, contamos con herramientas para poder mitigar el riesgo al que nos expone la naturaleza. Poder hacer frente a las fuerzas sísmicas es una de las metas principales de la ingeniería sísmica y estructural, por lo que los disipadores de energía nos permiten crear sistemas estructurales capaces de adaptarse al entorno y a las necesidades en constante cambio para así poderle dar un uso pleno a las estructuras.

La infraestructura educativa actualmente no cuenta con los estándares mínimos para asegurar el aprendizaje, reconoce la misma Secretaría de Educación Pública (SEP) en su Programa Sectorial de Educación (PSE) y, de acuerdo con los diagnósticos del INIFED, “casi un tercio de las escuelas de educación básica presentan problemas estructurales” (Poy, 2020). Además, reconoce que las comunidades rurales tienen pocos recursos económicos para el mantenimiento y optimización de las escuelas, por eso pensar en reconstruir estos inmuebles es algo inviable. Entonces, en este trabajo se estudió una alternativa de reforzamiento, dando como resultado, una propuesta segura, económica y de fácil acceso.

Para conocer las ventajas que representa tener un sistema de protección sísmica, se estudió la respuesta sísmica de una estructura equipada con disipadores de energía tipo Dampo 1505 (Dampo, 2019).

Para fines de la evaluación del uso de los disipadores de energía, se optó por realizar un análisis dinámico no lineal, usando el programa ETABS (2016), a un prototipo de escuela denominado “U1-C” del año 2011 creado por el INIFED. Para fines de comparación, la escuela fue analizada con un sistema sismorresistente convencional y equipada con el sistema de protección sísmica Dampo 1505 (Dampo, 2019). Se consideró que la escuela estaba ubicada en Acapulco de Juárez, en el estado de Guerrero, que es una de las regiones con mayor amenaza sísmica de toda la república mexicana.

En esta tesis se presentan y discuten los resultados más relevantes de la evaluación de la respuesta sísmica de la escuela y se ofrecen algunas conclusiones y recomendaciones de interés.

2. Disipadores de energía sísmica

La filosofía tradicional de diseño estructural sismorresistente fija una referencia de vida útil, que en promedio se trata de 50 años. Durante esta vida útil se supone que las estructuras estarán sometidas a episodios de baja intensidad frecuentes, de intensidad media con y de ocurrencia probable, y de gran intensidad y con bajas probabilidades de ocurrencia.

Así, para cada uno de los escenarios de ocurrencia sísmica, se acepta un nivel de daño. Para sismos frecuentes y de baja intensidad las estructuras no deben sufrir daños en ninguno de los elementos que la conforman. Para sismos intermedios, poco frecuentes, la estructura puede sufrir daños, pero deben ser reparables. Y, para sismos severos, se permite que la estructura sufra daños estructurales sin llegar al colapso estructural, a fin de preservar las vidas humanas.

Esta filosofía de diseño, que implica la aceptación de diferentes niveles de daño, puede traer negativas consecuencias económicas y operacionales. La exigencia de garantizar la funcionalidad de las edificaciones después de terremotos severos ha motivado el desarrollo de tecnologías de disipación de energía, las cuales han mostrado ser efectivas, tanto en el diseño de estructuras nuevas, como para la rehabilitación y reparación de estructuras existentes.

Los dispositivos de control de respuesta sísmica han demostrado ser una alternativa confiable para considerar en el diseño sismorresistente y poderle dar un enfoque diferente a la filosofía de diseño, y así, ser capaces de concebir estructuras que sean resilientes, capaces de garantizar la seguridad de las vidas humanas, incrementar la funcionalidad, limitar los daños y disminuir las pérdidas económicas.

Los disipadores de energía son dispositivos que muestran un comportamiento inelástico estable y predecible cuando son sometidos a cargas sísmicas, van dirigidos a mejorar la respuesta sísmica de la estructura, siempre y cuando se incluyan las adecuadas consideraciones sobre las características mecánicas de la estructura, de los dispositivos de disipación y del suelo al momento del diseño estructural.

2.1 Funcionalidad de los disipadores de energía sísmica

El diseño estructural tradicional, como anteriormente se menciona, acepta el daño bajo la condición de que no genere el colapso de la estructura ni ponga en riesgo vidas humanas. Producto de esta filosofía, se considera que las deformaciones inducidas por las fuerzas sísmicas generarán que los materiales de la estructura entren a un rango de comportamiento inelástico, y sólo después de un sismo severo, este comportamiento se vería traducido en un daño estructural.

En un diseño sísmico funcional, gracias al comportamiento inelástico de la estructura, se espera que esta sea capaz de disipar la energía que le inyecta el sismo, lo que hace posible que no colapse. En términos prácticos, esto se traduce en que las fuerzas de diseño puedan ser reducidas por debajo del límite elástico.

Con la finalidad de prevenir el daño, en un adecuado diseño sísmico, es posible ubicar las zonas de la estructura donde se presentarán las principales fuentes de disipación de energía por acción inelástica de los materiales. Normalmente se prevé que se formarán articulaciones en las conexiones viga-columna, con el fin de controlar los mecanismos de fallas frágiles y repentinas de la estructura y evitar el colapso prematuro (Genatios & Lafuente, 2016).

Aun asegurando un buen detallado de las conexiones susceptibles a la formación de articulaciones, y tomando en cuenta las incursiones de los materiales en su rango no lineal al momento de la excitación sísmica y la repetición de los ciclos de histéresis, y el control de las derivas de piso para evitar las deformaciones excesivas, los elementos estructurales no están exentos de la pérdida de resistencia y rigidez.

Producto de los esfuerzos por limitar los daños en los elementos estructurales y no estructurales, se han creado dispositivos adicionales de control de la respuesta sísmica, como los disipadores de energía sísmica.

Estos dispositivos de control, o de protección sísmica, funcionan al incrementar la capacidad de disipación de energía de la estructura para que, para una determinada cantidad de energía de entrada la energía de deformación del sistema estructural sea menor. Al instalarse los disipadores de energía, la estructura sufrirá menos deformaciones para un nivel dado de energía, minimizando el daño.

Los dispositivos externos de absorción de energía buscan concentrar el comportamiento no lineal en ciertas regiones de la estructura que se prevén al momento del diseño estructural, para poder diseñarlas y detallarlas para tal efecto, así se reducirá de manera importante el comportamiento inelástico y los daños en el sistema, mejorando el desempeño esperado en los sismos severos.

2.2 Clasificación de los disipadores de energía sísmica

Los disipadores de energía son diseñados para disipar la energía introducida al sistema estructural debido a las fuerzas dinámicas externas, como las que ejerce un sismo. Su funcionalidad se basa en incrementar el nivel de amortiguamiento de la estructura.

Los sistemas de control de la respuesta sísmica con disipación de energía se clasifican en los siguientes tipos: Histeréticos metálicos, viscoelásticos, de fluidos, de fricción, de masas sintonizadas. (Genatios & Lafuente, 2016)

a) Disipadores histeréticos metálicos

Principalmente estos disipadores se diseñan en acero, por la alta homogeneidad del material permite una fácil caracterización del dispositivo. Su comportamiento es modelado con curvas fuerza-desplazamiento y la energía que logran disipar se cuantifica a partir de los ciclos de histéresis del dispositivo, para posteriormente conocer su energía o ductilidad acumulada que desarrolló en cada uno de esos ciclos. De esta forma, se logra caracterizar el desempeño de cada uno de los disipadores que se instalen en la estructura.

Estos dispositivos pueden ser del tipo ADAS, por sus siglas en inglés Added Damping and Stiffness, ya que le añaden rigidez y amortiguamiento a la estructura, y con eso lograr una mejor respuesta estructural ante sismos de magnitud alta.

Para conocer las propiedades mecánicas de este tipo de dispositivos se requiere conocer su rigidez, su límite de fluencia y el desplazamiento máximo relacionado a ese límite.

Los disipadores de energía histeréticos metálicos disipan la energía a través de la fluencia de sus materiales metálicos sometidos a esfuerzos de flexión, corte, torsión o la combinación de ellos. Su comportamiento es estable y es adecuado ante factores ambientales y cambios de temperatura.

b) Disipadores viscoelásticos

El objetivo principal de estos disipadores es garantizar que la estructura principal se mantenga en su rango elástico de comportamiento, para minimizar los daños en caso de un sismo de magnitud alta.

Los materiales viscoelásticos son polímeros que pueden disipar energía al ser deformados por medio de una fuerza cortante.

Un ejemplo de estos disipadores viscoelásticos, son los llamados DSSD, por sus siglas en inglés Direct Shear Seismic Damper. Estos consisten en dos placas de acero a las que se les añade un material viscoelástico entre ellas, que se deforma bajo esfuerzos cortantes. La disipación de energía en estos elementos tiene lugar cuando se presenta un desplazamiento entre las placas de acero externas y el material viscoelástico de en medio.

El diseño de los DSSD debe considerar el efecto de la temperatura, las deformaciones excesivas y la frecuencia de vibración, ya que estos factores pueden llegar a alterar el comportamiento del dispositivo.

c) Disipadores de fluidos viscosos

Consisten en un cilindro que contiene un émbolo con pequeños orificios embebido en un fluido altamente viscoso. Cuando el pistón se desplaza dentro del cilindro, el fluido pasa entre los pequeños orificios de manera controlada, y es ahí donde se produce la disipación de energía.

d) Disipadores de fricción

La disipación de energía en este tipo de artefacto se da cuando se produce fricción a partir del desplazamiento relativo entre dos o más superficies de contacto una vez alcanzada la capacidad de carga del dispositivo.

Su diseño se basa en conocer las fuerzas en los elementos sometidos a fricción, ya que sólo se activarán una vez que dichas fuerzas actuantes igualen o superen, en valor, a las fuerzas resistentes y los elementos que conforman al dispositivo comiencen a moverse, por lo que hay que poner atención a que el sismo esperado someta al disipador a dichas fuerzas, si no, este no se activará. Aunado a esto, existe la posibilidad que, después de la ocurrencia de un sismo, quede una deformación remanente en la estructura.

e) Disipadores basados en materiales con memoria de forma

Gracias al desarrollo de nuevos materiales, surgieron aleaciones capaces de mantener una forma prediseñada, como si se tratara de un elemento que responde a una forma previamente memorizada, que por su nombre en inglés se les conoce como “Shape Memory Alloys” (SMA), las cuales se han utilizado para crear una nueva serie de disipadores de energía.

Se pueden encontrar aplicaciones de los SMA en diferentes tipos de disipadores de energía, como sistemas de contraventeos, conectores especiales viga-columna que evitan la formación de articulaciones en estos puntos, entre otros.

Una gran ventaja es que, al respetar su forma original, evita que existan deformaciones residuales después de un sismo intenso, por lo que es una opción bastante segura. Sin embargo, al ser una tecnología emergente, sigue siendo muy cara y su utilización muy poco viable.

f) Amortiguadores de masas sintonizadas

El amortiguador de masa sintonizada (ASM), consiste en un sistema que funciona como un resorte que hace que la masa vibre, se coloca en la estructura principal, generalmente en el techo de los entresijos. Para su funcionamiento, la frecuencia del dispositivo debe ser cercana a la frecuencia dominante de la estructura principal.

Si en la respuesta sísmica de la estructura son importantes las contribuciones de otros modos de vibrar y es necesario reducir su efecto, se podrá instalar un sistema múltiple que cubra las diferentes frecuencias que contribuyen en la respuesta.

Estos sistemas interfieren únicamente en un nivel de la estructura, con pesos aproximadamente del 1-2% de la masa modal del modo de interés.

2.3 Disipador histerético del tipo Dampo 1505

El dispositivo Dampo 1505 es un disipador de energía sísmica de tipo histerético metálico, desarrollado y patentado en su totalidad en México. El dispositivo aprovecha el buen comportamiento histerético del acero por medio de movimientos en flexión plástica, la disipación de la energía se da a partir de la fluencia en flexión de las placas de acero que lo conforman. Su diseño es parte clave para aportar diferentes combinaciones de resistencia y desplazamiento requeridas.

El disipador cuenta con una cubierta exterior que protege al dispositivo, una placa base y una preparación de conexión con una sección de un perfil OR, que deberá ser designado por el contraviento de conexión que se colocará posteriormente al momento de la instalación en la estructura. La Figura 1 muestra las características geométricas y las partes que conforman al disipador de energía Dampo 1505.

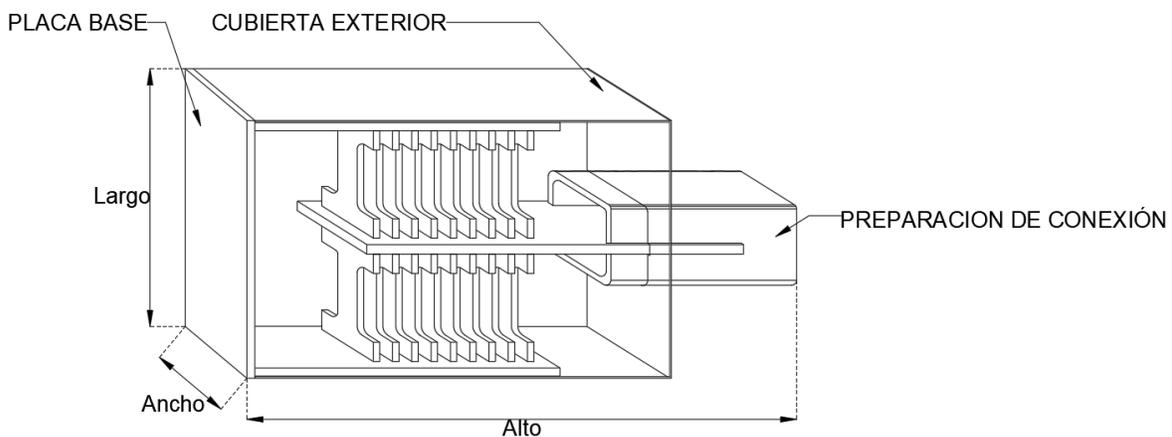


Figura 1. Características Generales del disipador DAMPO 1505

3. Pruebas experimentales del disipador

Se realizaron tres pruebas experimentales de un prototipo del disipador de energía sísmica Dampo 1505. Éstas se realizaron en el Laboratorio de Estructuras del Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México, (Instituto de Ingeniería, 2019).

Las tres pruebas se diferenciaron en los ciclos de carga aplicados; la primera prueba se trató de una carga cíclica en el intervalo elástico lineal. En la segunda prueba, se aplicó una carga cíclica incremental, llevando al disipador a su estado plástico. La última prueba consistió en ciclos de carga de fatiga, llevando al elemento estudiado a la falla.

El objetivo de las pruebas experimentales fue medir la capacidad de disipación de energía sísmica del dispositivo y conocer su comportamiento inelástico.

3.1 Configuración del experimento.

El arreglo experimental consistió en las siguientes partes (Fig. 2):

1. Marco de carga
2. Actuador MTS
3. Losa de reacción
4. Disipador
5. Placa de conexión

El marco de carga se fijó a la losa de reacción directamente, posteriormente se adicionó al marco el actuador MTS para así poder colocar el disipador entre el actuador y la losa de reacción. La conexión disipador-loosa se hizo por medio de una placa metálica.

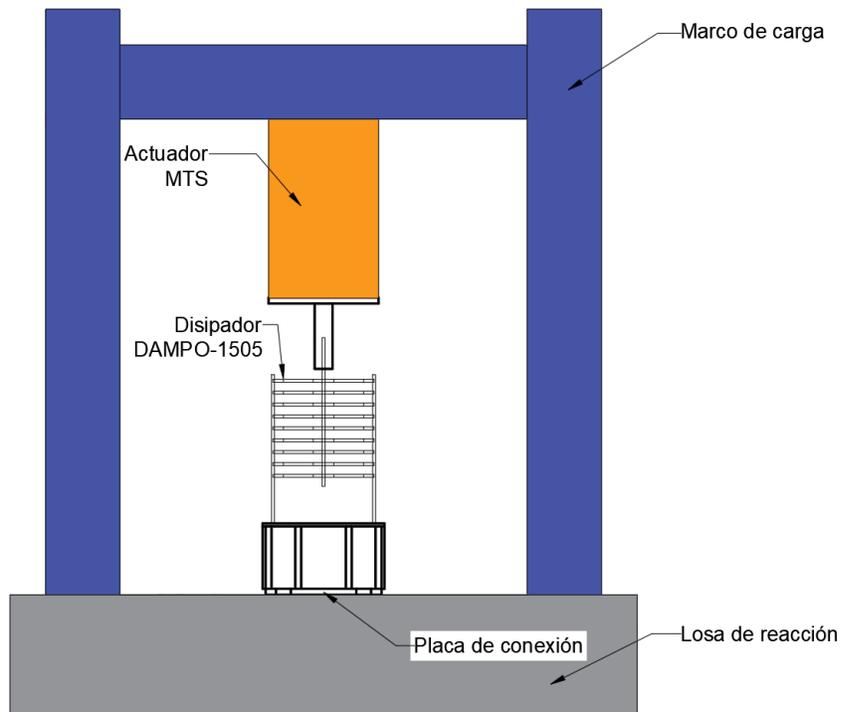


Figura 2. Esquema del arreglo experimental

3.2 Descripción del dissipador Dampo 1505

El dissipador estuvo formado por nueve placas centrales acomodadas horizontalmente con una separación de 5 cm entre sí. Estas placas fueron conectadas a otras tres placas (PL-1), dos laterales y una central, haciendo una especie de caja torácica, en la Figura 3, se muestra el croquis del dissipador ensayado y sus dimensiones principales.

Las dos placas laterales fueron unidas a una conexión inferior y la placa central a la conexión superior, la cual fue sujeta al actuador durante el ensayo, y fue la que recibió directamente las cargas.

No se abunda más en detalles geométricos del dispositivo por las cláusulas de confidencialidad en el convenio entre el IIUNAM y Dampo Systems S.A. de C.V.

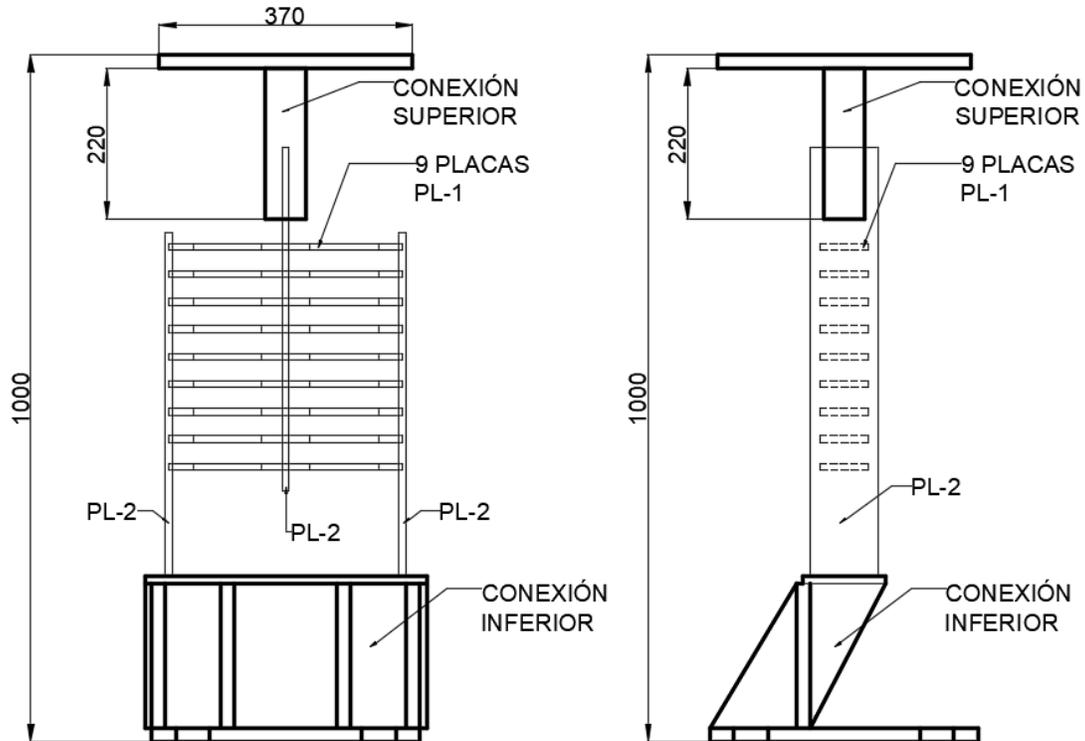


Figura 3. Dimensiones del dissipador ensayado, en mm.

3.3 Protocolo de carga

Se aplicaron tres protocolos de carga controlados de manera cuasi-estática, con un actuador MTS con capacidad de ± 50 t y carrera de ± 100 mm, estos fueron:

1. Dos ciclos de desplazamiento de ± 2.5 mm.
2. Protocolo de desplazamientos incrementales (según recomendaciones de Merrit (Merrit, Uang, & Benzoni, 2003)).
3. Ciclos de desplazamientos a máxima deformación.

Todas las pruebas se controlaron por desplazamientos por medio de la lectura del actuador hidráulico.

3.4 Instrumentación

Para medir los desplazamientos y cargas aplicadas se utilizó un transductor de desplazamientos y la celda de carga del actuador hidráulico.

3.5 Resultados

3.5.1 Prueba 1

La Fig. 4 muestra la curva fuerza-desplazamiento medida en la prueba 1. Se puede ver que el dissipador permaneció en su estado elástico-lineal ante los ciclos de desplazamiento aplicados ($\pm 2.5\text{mm}$), llegando a una carga resistente de $\pm 11\text{ t}$.

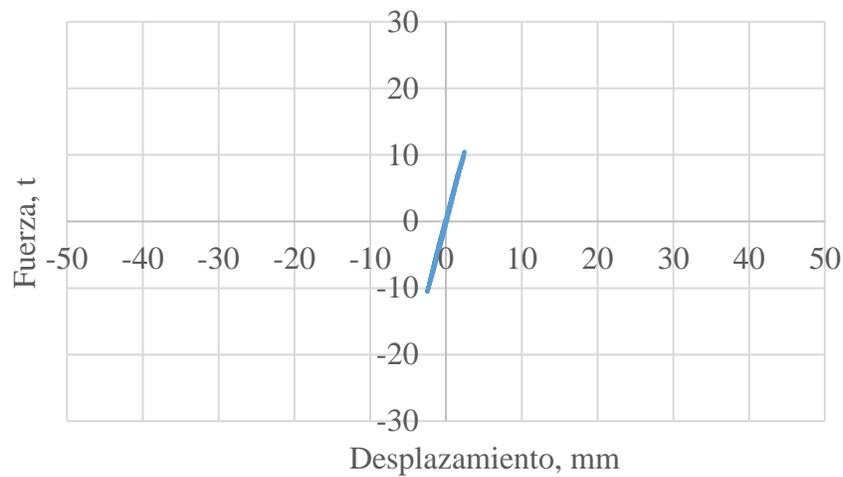


Figura 4. Curvas fuerza-desplazamiento para prueba 1.

3.5.2 Prueba 2

La Fig. 5 muestra la curva fuerza-desplazamiento medida en la prueba 2. Se puede apreciar que el dissipador desarrolló una gran plasticidad de manera estable, logrando alcanzar un desplazamiento máximo de 40mm, lo que representa una ductilidad de desplazamiento de 8.

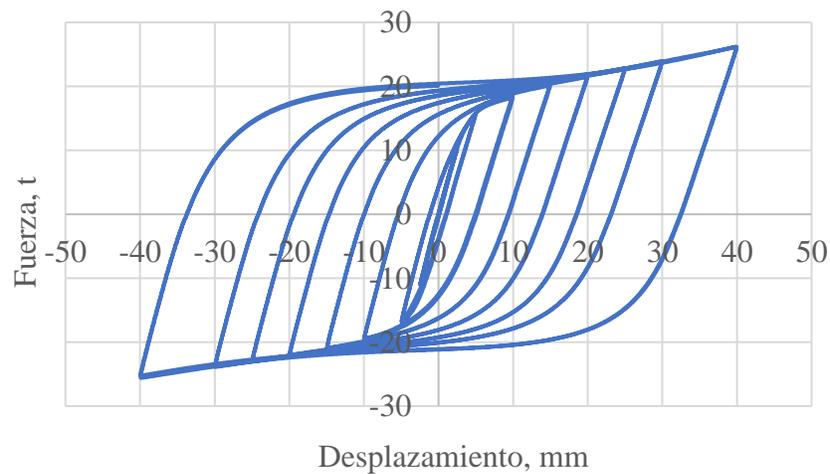


Figura 5. Curvas fuerza-desplazamiento para prueba 2.

3.5.3 Prueba 3

La Fig. 6 muestra el resultado que se obtuvo en la prueba número 3 en términos del desplazamiento contra fuerza. Se ve que el disipador logró desarrollar tres ciclos de carga de $\pm 40\text{mm}$ de desplazamiento, sin embargo, en cada ciclo sufrió una degradación de resistencia hasta llegar a la falla con casi 14 toneladas a compresión.

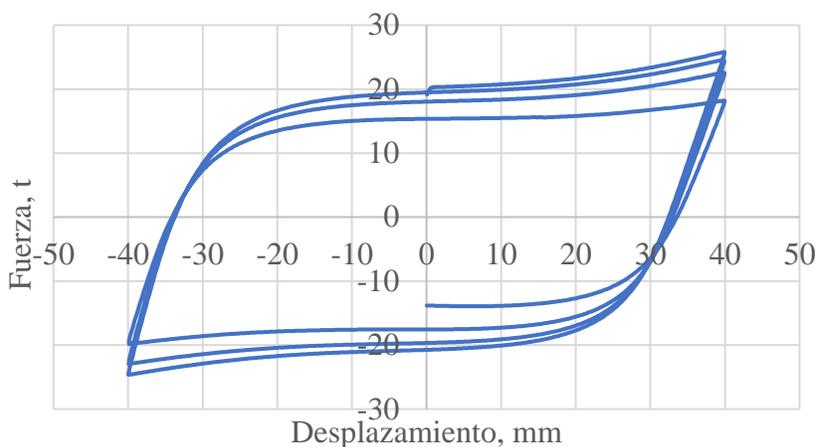


Figura 6. Curvas carga-deformación para prueba de fatiga.

3.6 Discusión de resultados

La capacidad de disipación de energía se puede medir por medio de la ductilidad acumulada del disipador. Siguiendo las recomendaciones de Merrit (Merrit, Uang, & Benzoni, 2003), se midió la ductilidad acumulada para los protocolos de carga 2 y 3, dando un total de 240, como se puede apreciar en la Fig. 7.

Como referencia para evaluar si el disipador cuenta con la capacidad necesaria; se tomó, en términos de la ductilidad acumulada, las demandas esperadas ante un sismo muy intenso, y se observó que la capacidad del disipador es cercana al triple de la demanda esperada.

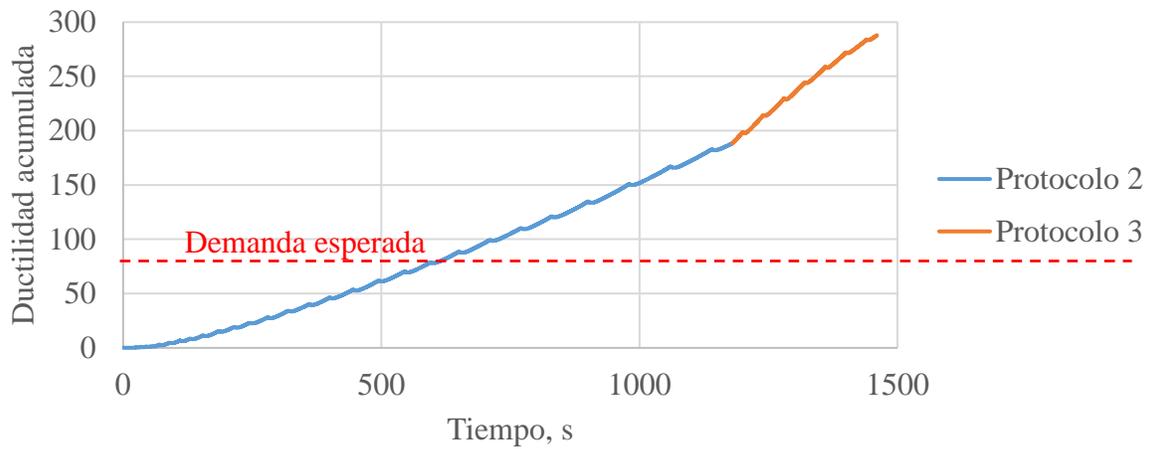


Figura 7. Curvas de ductilidad acumulada

A partir de los resultados experimentales, se concluye que el comportamiento histerético considerando la resistencia y el deterioro en rigidez del dispositivo ensayado, es adecuado para considerarlo como una alternativa viable para la rehabilitación de estructuras e incluso en estructuras nuevas.

4. Modelo numérico de una escuela equipada

4.1 Descripción de la estructura

Es una estructura de uso escolar que corresponde al tipo U-1C del catálogo realizado por el INIFED en el año 2011, por lo que su diseño estructural fue realizado siguiendo las recomendaciones de las Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo del 2004, las del Manual de diseño de Obras Civiles del 2008 de la CFE, entre otros documentos.

Dicha escuela recibe el nombre de U1-C dada la nomenclatura del INIFED, donde la U corresponde a urbana, el 1 al número de niveles y la C al material de construcción de los elementos estructurales, que es concreto armado. Es decir, la estructura U1-C es una escuela urbana de un solo nivel con un sistema estructural de marcos rígidos de concreto armado. Cuenta con una losa a dos aguas con una pendiente del 10%. El inmueble fue concebido para una zona sísmica “D”, con un máximo de 11 entre ejes.

Para fines de este trabajo, se analizaron dos versiones de la U1-C: el primer modelo consistió en la escuela tal cual corresponde a los planos estructurales del INIFED, y la segunda versión se trató de una propuesta con disipadores de energía tipo Dampo 1505, en algunas crujías en ambos ejes. Esto último con el fin de limitar los desplazamientos de la estructura y así lograr un mejor desempeño ante las excitaciones sísmicas.

Una de las ventajas que nos proveen los disipadores de energía Dampo 1505 en cuanto a su capacidad de disipación de energía es que se puede variar el número de placas contenidas o sus características geométricas, como el espesor de las placas, para lograr una mayor rigidez del elemento y así aumentar su capacidad. En este trabajo se utilizó una versión de los disipadores Dampo 1505 con el doble de placas de las originalmente concebidas, dando un total de 18 placas horizontales en cada disipador (ver Fig. 8), por lo que su rigidez y resistencia, se vieron incrementadas al doble con respecto a los valores que se obtuvieron en las pruebas descritas en el capítulo anterior, para conocer las propiedades del disipador como se modeló ver la Tabla 1.

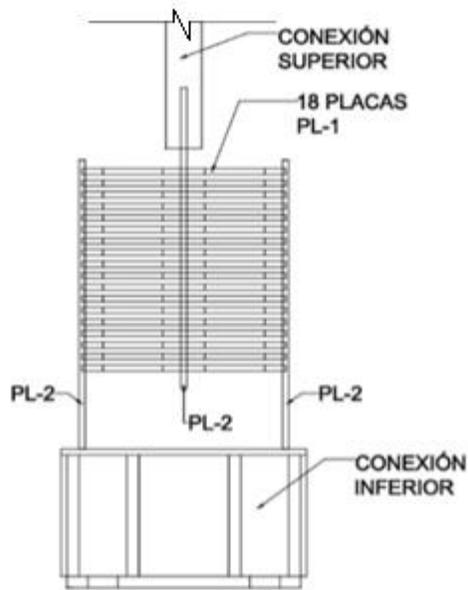


Figura 8. Disipador Dampo 1505 con 18 placas horizontales

Tabla 1. Propiedades mecánicas del disipador.

Propiedad	Valor
Rigidez	$6.875 \frac{tonf}{mm}$
Límite elástico	$41.25 tonf$

4.2 Materiales de construcción

De acuerdo con los planos estructurales otorgados por el INIFED correspondientes a la estructura U1-C, para los elementos estructurales se consideró un concreto clase 1 con las características de la Tabla 2.

Tabla 2. Propiedades del concreto clase 1.

Propiedad	Valor
Resistencia a la compresión	$f'_c = 250 \frac{kg}{cm^2}$
Módulo de Elasticidad	$E = 221359 \frac{kg}{cm^2}$
Peso volumétrico	$\gamma_c = 2200 \frac{kg}{m^3}$

Para el refuerzo, se utilizó un acero con un esfuerzo de fluencia nominal de $f_y = 4200 \frac{kg}{cm^2}$

4.3 Geometría global

En la Tabla 3 se describen los elementos estructurales que marcan los planos de la estructura U1-C, con su clave de identificación, el tipo de elemento, sus características geométricas, el armado y la cuantía de acero.

Tabla 3. Elementos estructurales

Clave	Tipo	b [cm]	h [cm]	Armado	$A_s -$ [cm ²]	$A_s +$ [cm ²]	A_s Total [cm ²]	Cuantía [%]
C-1	Columna	40	45	12#8 E#3@10	-	-	60.80	3.38
T-1	Trabe	20	55	4#4+4#5 E#3@25+#4@15	6.50	6.50	13.00	1.18
T-2	Trabe	20	55	4#4+4#5 E#3@25+#4@15	6.50	6.50	13.00	1.18
T-3	Trabe	25	55	10#6 E#3@20+#10@10+ #6@15+#11@10	17.10	11.40	28.50	2.07
F-1	Faldón	12	50	6#3 E#3@30	1.43	1.43	2.86	0.48
F-2	Faldón	12	40	6#3 E#3@30	1.43	1.43	2.86	0.59

La Figura 9 corresponde a la distribución en planta de los elementos estructurales de la Tabla 3, según corresponde en los planos estructurales de la U1-C.

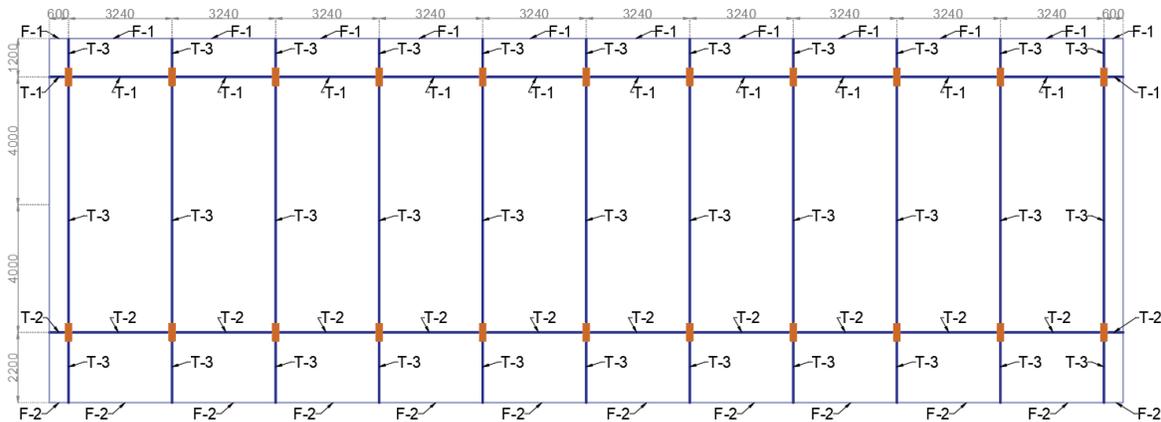


Figura 9. Distribución de elementos estructurales en planta

La vista en isométrico de dicha estructura corresponde a la Figura 10, en dicha imagen se puede apreciar la losa a dos aguas, las columnas y las trabes de la escuela sin disipadores de energía.

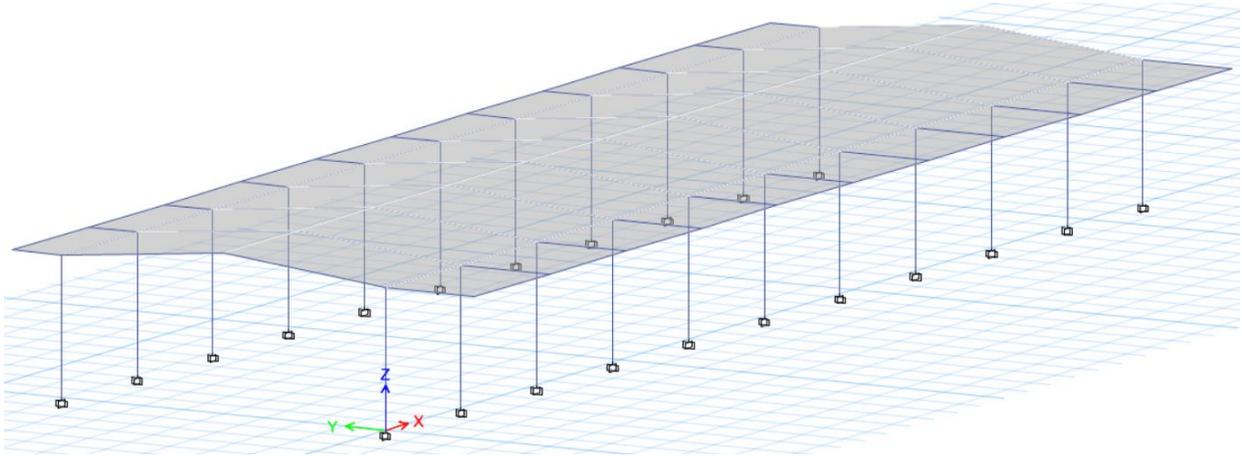


Figura 10. Vista del modelo de la U1-C sin disipadores de energía.

En la Figura 11 se puede apreciar el arreglo de los disipadores de energía para el modelo equipado. Se eligió esa configuración buscando un comportamiento estructural estable.

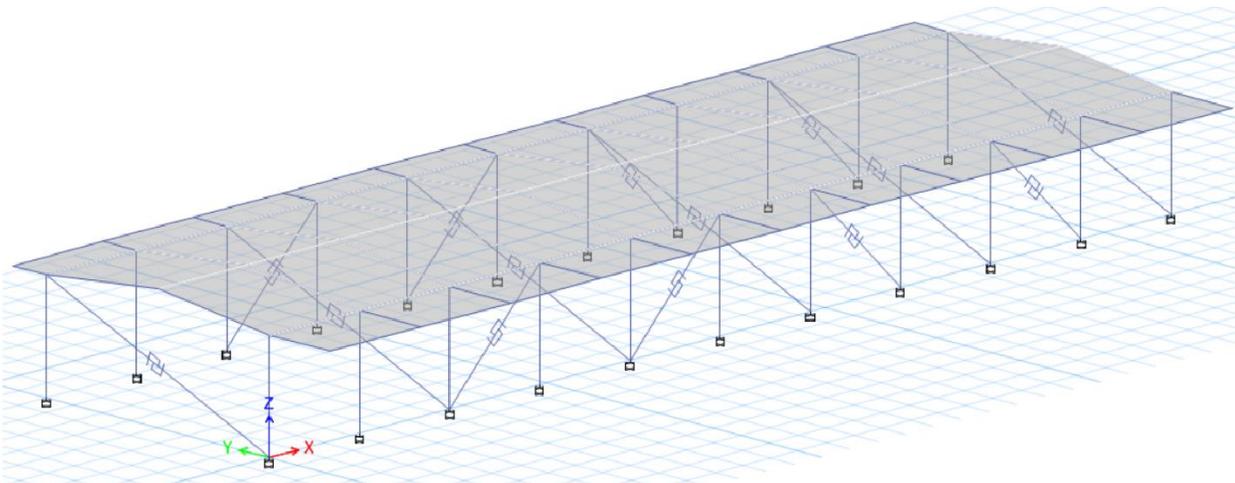


Figura 11. Vista en 3D del modelo U1-C equipado con disipadores de energía.

4.4 Cargas de diseño

En la revisión de la estructura se consideró la acción de cargas permanentes, variables y accidentales, como se describe en las secciones siguientes.

4.4.1 Carga muerta

Esta carga incluye el peso propio de la estructura debido a los elementos estructurales, así como los acabados, fachadas, instalaciones y muros divisorios. También se incluyen equipos vacíos o cualquier otro elemento fijado de manera permanente cuya magnitud no varía significativamente con respecto al tiempo. En el modelo de la escuela U1-C se consideró el peso propio de los elementos estructurales, y las cargas debidas a acabados e instalaciones.

4.4.2 Carga viva

Las cargas no son de carácter permanente, son producidas por el uso y ocupación de las edificaciones. Para la aplicación de cargas vivas se deberán tomar en cuenta las siguientes consideraciones:

- a) Carga viva máxima (CVm). Se emplea para diseño por fuerzas gravitacionales para el cálculo de asentamientos inmediatos en el suelo, y para el diseño de cimientos ante cargas gravitacionales.
- b) Carga viva instantánea (CVa). Se emplea para diseño sísmico y por viento, y cuando se revisen distribuciones de carga más desfavorables que la uniformemente repartida sobre toda el área.
- c) Carga viva diferida o media (CVd). Se emplea para el cálculo de asentamientos diferidos y para el cálculo de flechas diferidas.

Se tomará la carga viva como nula, cuando esta sea favorable para la estabilidad estructural (volteo, succión, etc.)

Las cargas vivas consideradas en el modelo de la escuela U1-C son las que se describen en la Tabla 4. Nótese que estas cargas corresponden a cubiertas con pendiente mayor a 5%, según recomendaciones de las NTC-criterios (2017).

Tabla 4. Cargas vivas y cargas muertas consideradas en la cubierta del modelo de la escuela U1-C.

Tipo de Carga	[kg/m ²]
CV	35
CVm	20
CVa	40

4.4.3 Fuerzas sísmicas

La escuela U1-C se consideró ubicada en el estado de Guerrero, en el municipio Acapulco de Juárez con coordenadas -99.7113 O, 17.0612 N. Las acciones sísmicas se determinaron de acuerdo con el Manual de Obras Civiles para Diseño por Sismo, MDOC-MDS en su versión actual (Comisión Federal de Electricidad, 2015). Se hizo uso del programa PRODISIS (Comisión Federal de Electricidad, 2015) para facilitar la aplicación de algunos criterios contenidos en el manual y generar el espectro de diseño. En la Tabla 5 se muestran los parámetros usados para la construcción del espectro de diseño sísmico transparente.

Tabla 5. Parámetros para construcción del espectro sísmico transparente.

Parámetro	Valor
Longitud	-99.7113
Latitud	17.0612
Zona	D
Tipo de Suelo	III
T_s	0.5 s
a_0	0.115 g
c	0.345 g
T_a	0.1 s
T_b	2.0 s
T_c	2.0 s
β	1
k	0.5
r	1

De acuerdo con el MDOC-MDS (Comisión Federal de Electricidad, 2015) se debe aplicar un factor de corrección por irregularidad si la estructura no cumple con algunos de los criterios de regularidad de la Tabla 6, donde se puede ver que no cumple el criterio número 3.

Tabla 6. Condiciones para considerar una estructura regular

Condición de regularidad	Cumple
1) La distribución en planta de masas, muros y otros elementos resistentes, es sensiblemente simétrica con respecto a dos ejes ortogonales principales del edificio.	✓
2) La relación entre la altura y la dimensión menor de la base no es mayor que 2.5.	✓
3) La relación entre largo y ancho de la base no excede de 2.5.	✗
4) En planta no se tienen entrantes ni salientes cuya dimensión exceda 20% de la dimensión de la planta medida paralelamente a la dirección en que se considera la entrante o saliente.	✓
5) En cada nivel se tiene un sistema de techo o piso rígido y resistente, lo que deberá justificarse con resultados de análisis de modelos simplificados del sistema de piso a utilizar.	✓
6) El sistema de piso no tiene aberturas que en algún nivel excedan 20% de su área en planta en dicho nivel, y las áreas huecas no difieren en posición de un piso a otro. Se exime de este requisito a la azotea de la construcción.	✓
7) El peso de cada nivel, incluyendo la carga viva que debe considerarse para diseño sísmico, no es mayor que 110% ni menor que 70% del correspondiente al piso inmediato inferior.	✓
8) Ningún piso tiene un área delimitada por los paños exteriores de sus elementos resistentes verticales, mayor que 110% ni menor que 70% de la del piso inmediato inferior.	✓
9) Todas las columnas están restringidas en las dos direcciones de análisis por diafragmas horizontales o por vigas.	✓
10) La rigidez lateral de ningún entrepiso difiere en más de 50% a la del entrepiso inmediatamente inferior. El último entrepiso queda excluido.	✓
11) En cada entrepiso, la excentricidad torsional calculada estáticamente no excede en más del 10% su dimensión en planta, medida paralelamente a la excentricidad torsional.	✓

Así mismo, existen tres niveles de importancia estructural. La estructura U1-C pertenece al Grupo A2, por tratarse de una edificación importante para uso educacional. Para la estructura sin disipadores de energía se consideró un factor de comportamiento $Q=2$. Para la estructura equipada con los disipadores de energía en ambas direcciones, se consideró un factor de comportamiento sísmico de $Q=3$.

El manual de diseño de la CFE 2015 (Comisión Federal de Electricidad, 2015), marca límites en términos de la distorsión de entrepiso para poder evaluar si la rigidez lateral de la estructura es

suficiente para poder resistir las solicitaciones. Para esto se consideran dos condiciones: desplazamientos horizontales por limitación de daños a elementos no estructurales (límite de servicio) y los desplazamientos horizontales para seguridad contra colapso.

La Tabla 7 muestra los límites recomendados por el MDOC-MDS (Comisión Federal de Electricidad, 2015), de los cuales, para el límite de servicio se seleccionó el valor de 0.004 que corresponde a una estructura con muros desligados. Para la seguridad contra colapso se eligieron dos valores distintos, uno para la estructura sin disipadores que corresponde al de 0.015 de muros rígidos de concreto con ductilidad baja, y para el modelo equipado se eligió el valor de la distorsión máxima que corresponde a marcos rígidos de concreto y contraventeos metálicos de ductilidad media.

Tabla 7. Distorsiones de entrepiso permisibles.

LÍMITE DE SERVICIO			DIST. MAX
Muros ligados			0.002
Muros desligados			0.004
SEGURIDAD CONTRA COLAPSO			
	DUCTILIDAD	Q	DIST. MAX
Marcos rígidos de concreto	Alta	4	0.030
	Media	3	0.020
	Baja	2	0.015
	DUCTILIDAD	Q	DIST. MAX
Marcos rígidos de concreto y contraventeos metálicos	Alta	4	0.020
	Media	3	0.015
	Baja	2	0.010

En la Fig. 12 se muestra el espectro transparente que se construyó por medio de PRODISIS (2015). Posteriormente se obtuvieron los acelerogramas sintéticos con el fin de realizar un análisis dinámico no lineal para obtener resultados del comportamiento de la estructura en ambas versiones, la que posee disipadores y la que no, en términos de desplazamientos, distorsiones de entrepiso, elementos mecánicos y curvas de histéresis. Estas últimas únicamente para el caso del modelo con disipadores.

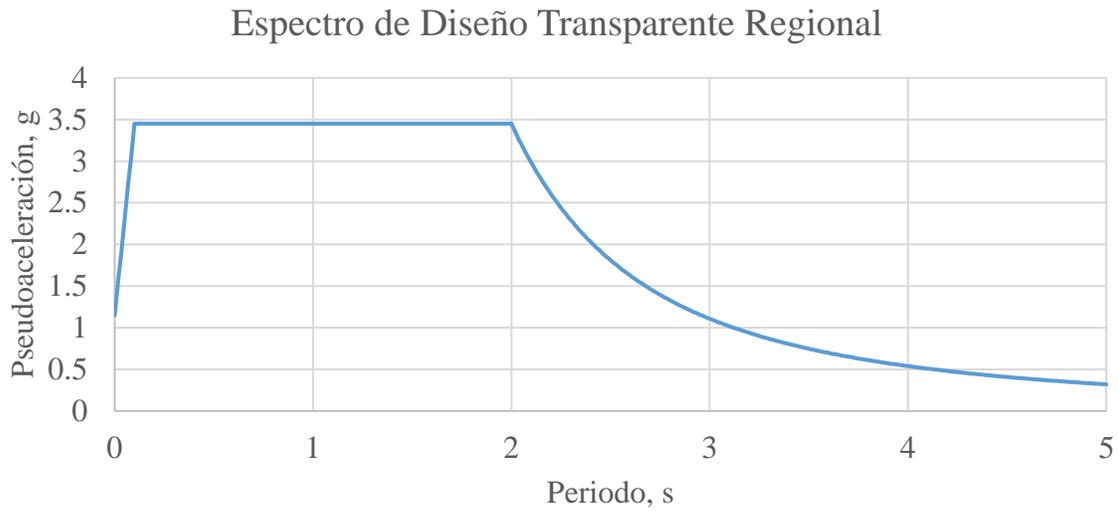


Figura 12. Espectro de diseño sísmico transparente para la escuela analizada

Para el análisis paso a paso, es necesario contar con movimientos sísmicos. En este caso se generaron acelerogramas sintéticos ajustados al espectro sísmico transparente. Se usó PRODISIS (2015) para generar dos acelerogramas (Fig. 13 y 14), uno para cada dirección de análisis. Estos se introdujeron al programa ETABS (2016) para poder llevar a cabo el análisis dinámico no lineal.

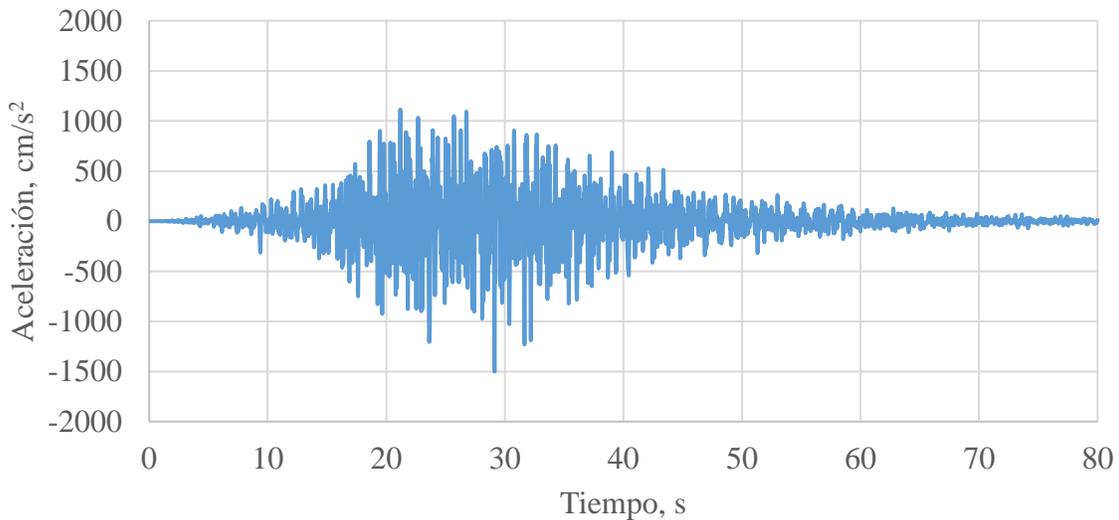


Figura 13. Acelerograma sintético para la dirección X.

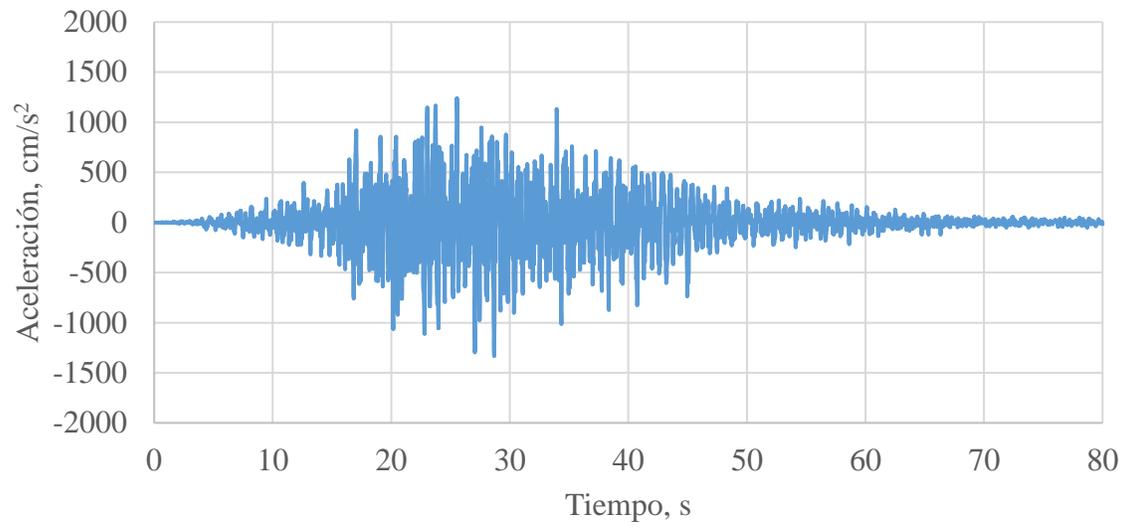


Figura 14. Acelerograma sintético para la dirección Y.

4.5 Comportamiento no lineal

Se modeló el comportamiento no lineal de traveses y columnas siguiendo las recomendaciones del estándar ASCE 41 (American Society of Civil Engineers, 2017), donde el comportamiento de los elementos se modela a partir de curvas multilíneas, como se muestra en la figura 15.

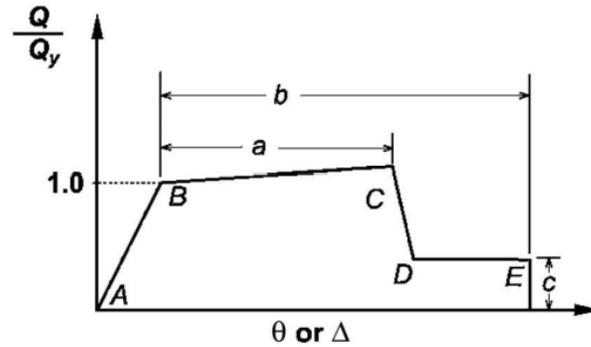


Figura 15. Comportamiento no lineal de elementos estructurales según ASCE 41 (American Society of Civil Engineers, 2017) .

Para el caso de los disipadores se utilizó un modelo de resorte no lineal disponible en ETABS (2016). El comportamiento de dichos resortes se basa en el modelo de Wen (Wen, 1976) dado que se ajusta apropiadamente al comportamiento de los dispositivos.

5. Curvas de Capacidad

Se obtuvieron las curvas de capacidad de la estructura mediante análisis estático no lineal, también conocido como Pushover. Este análisis consiste en aplicar carga estática lateral de manera incremental al modelo para conocer su resistencia lateral. Durante la aplicación de la carga lateral se mantiene constante la carga gravitacional sobre el modelo.

Las figuras 16 y 17, muestra las curvas obtenidas para las direcciones X y Y, con y sin disipadores. Se puede observar que la resistencia lateral incrementó en un 37.68% para la dirección X y en un 54.31% en dirección Y, gracias al uso de los disipadores.

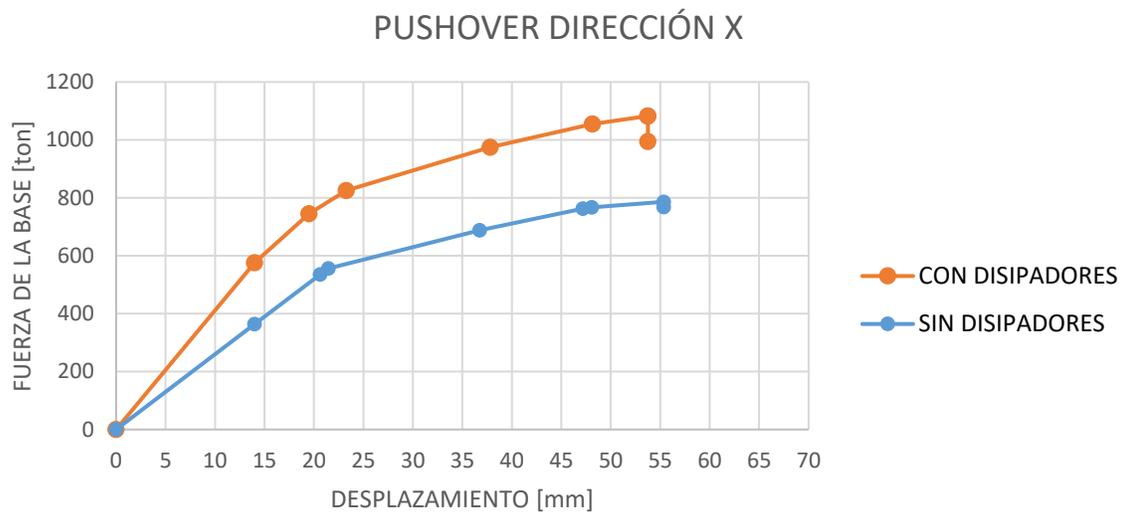


Figura 16. Curvas resultado del Pushover en Dirección X, modelos con y sin disipadores al 100% de la intensidad sísmica.

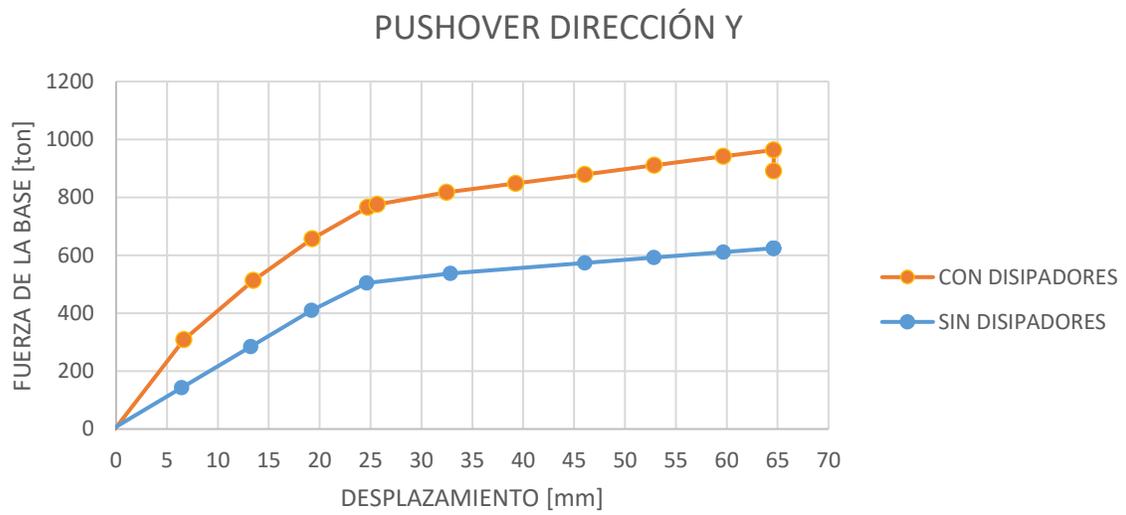


Figura 17. Curvas resultado del Pushover en Dirección Y, modelos con y sin disipadores al 100% de la intensidad sísmica.

6. Respuesta sísmica

El desplazamiento, la distorsión de entrepiso, el cortante basal, los elementos mecánicos y las curvas de histéresis. Se reconocieron como parámetros de medición de la respuesta sísmica de la estructura.

Para poder conocer si los disipadores de energía sísmica que se proponen para la estructura logran aportar una mejora en el comportamiento de la escuela U1-C ante la excitación sísmica y en qué porcentaje lo hacen, se realizó una comparación entre el modelo sin disipadores y con disipadores.

Al analizar el modelo sin disipadores ante la de intensidad sísmica de diseño actual, usando los acelerogramas del capítulo anterior, se encontró que a los pocos segundos de iniciar la excitación se presentó falla estructural. Después se redujo la intensidad hasta obtener una condición en la que no se presentara colapso. Esta resultó del 50% de la intensidad de diseño actual y se obtuvieron los valores máximos de los parámetros de la respuesta sísmica. También, se realizó el mismo análisis con el 100% y el 50% en ambas direcciones para el modelo con disipadores.

Se determinaron dos nodos de control en el modelo, los cuales se ubican en una esquina y un nodo intermedio, con el fin de conocer el comportamiento de la estructura en dos ubicaciones diferentes, en la Figura 18 se muestra una vista en planta de la azotea para facilitar la ubicación de los nodos.

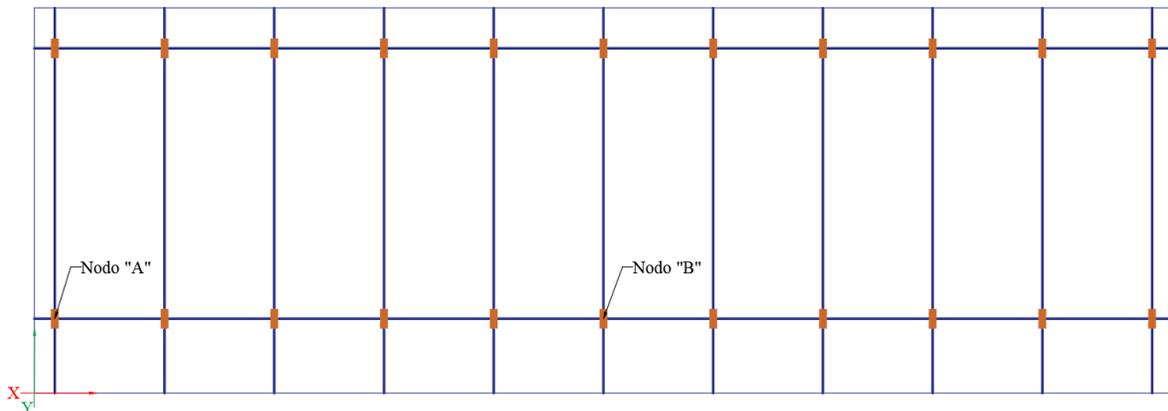


Figura 18. Vista en planta de la azotea con la localización de los nodos de control.

Después, se obtuvieron los resultados de los análisis dinámicos no lineales que se realizaron.

6.1 Respuesta ante la intensidad sísmica de diseño actual

Para este análisis se hizo uso de los acelerogramas sintéticos del capítulo 3 al 100% de su intensidad tanto en dirección X como en dirección Y , para los dos modelos, con y sin disipadores. Se monitoreó la respuesta en el tiempo.

Para el modelo sin disipadores, a los 21.56 segundos del análisis se presentó colapso numérico, por lo que se detuvo el análisis. Se obtuvo un desplazamiento máximo absoluto en el nodo A de 15.65 mm en dirección X y en Y de 26.79 mm (Fig. 19).

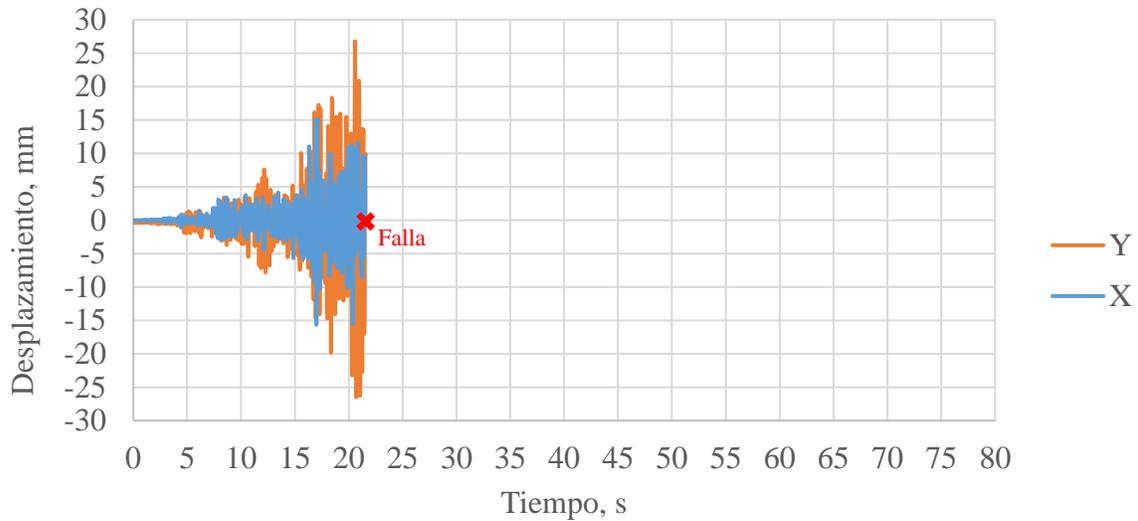


Figura 19. Historia de desplazamiento del análisis dinámico no lineal sin disipadores, nodo A, intensidad del 100%.

En el nodo B se obtuvo un desplazamiento máximo absoluto de 15.65 mm en X y en Y de 24.44 mm, como se aprecia en la Figura 20.

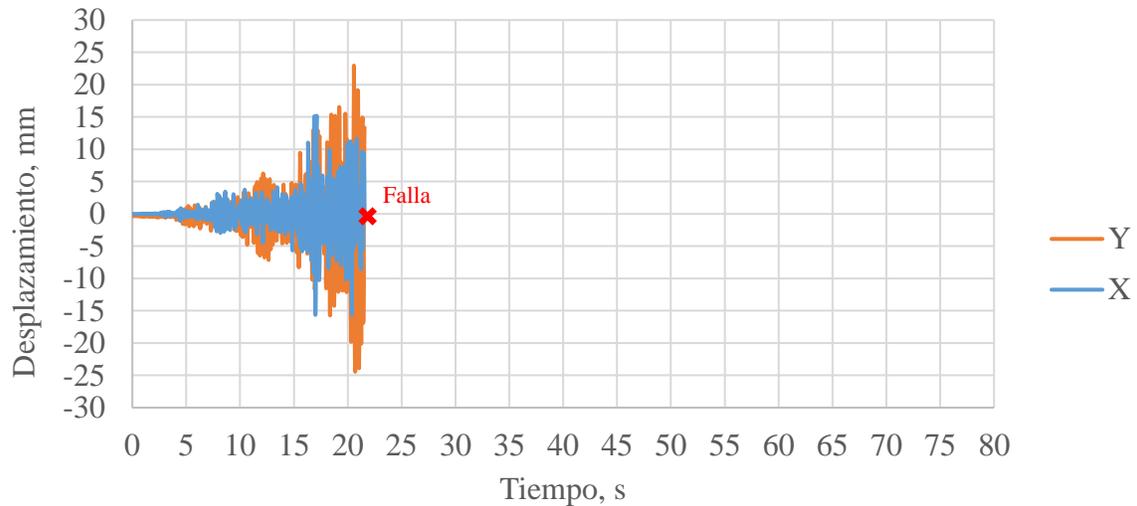


Figura 20. Historia de desplazamiento del análisis dinámico no lineal sin disipadores, nodo B, intensidad del 100%.

En cambio, para el modelo que cuenta con disipadores de energía, el análisis se completó satisfactoriamente como se aprecia en las Figuras 21 y 22, la estructura no sufrió falla estructural. Para el nodo A, Figura 21, se obtuvo un desplazamiento máximo absoluto en *X* de 12.28 mm a los 19.68 segundos, y en *Y* de 10.35 mm a los 29.70 segundos.

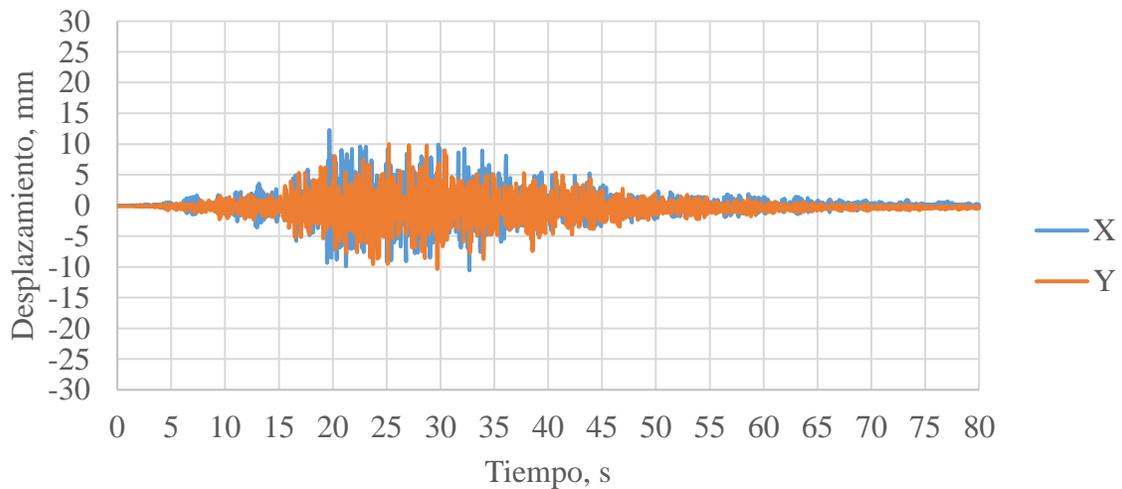


Figura 21. Historia de desplazamiento del análisis dinámico no lineal con disipadores, nodo A, intensidad del 100%.

En el nodo B (Fig. 22), el desplazamiento máximo absoluto en *X* fue 12.28 mm y sucedió en el mismo instante de tiempo (19.68 s), mientras que en la dirección *Y* de análisis el desplazamiento fue de 10.47 mm a los 29.70 s.

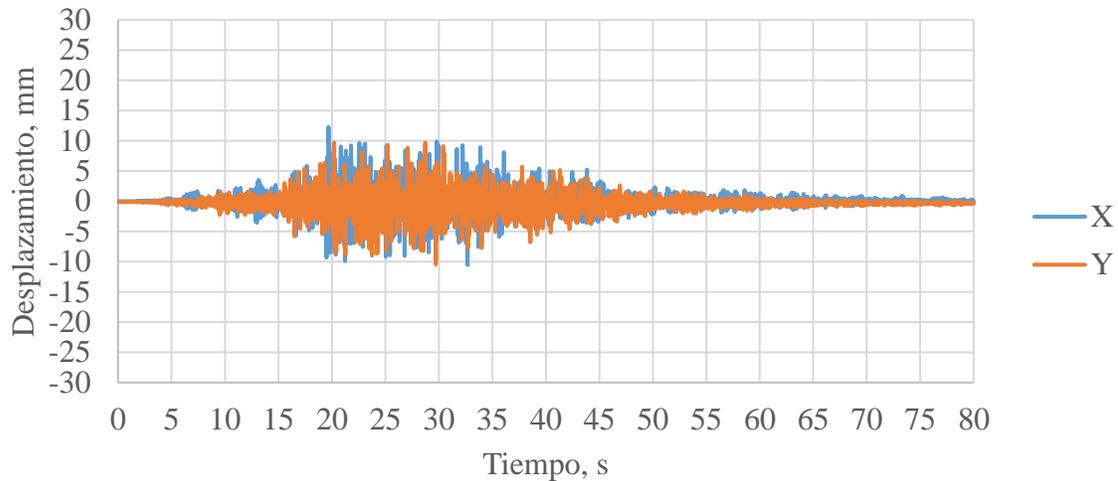


Figura 22. Historia de desplazamiento del análisis dinámico no lineal con disipadores, nodo B, intensidad del 100%.

6.1.1 Desplazamientos laterales máximos

Se presentan los resultados en términos de los desplazamientos laterales máximos absolutos producto del análisis dinámico no lineal para los modelos con y sin disipadores. Es importante mencionar que el modelo sin disipadores presentó falla estructural alrededor de los 26 segundos, por lo que los datos mostrados en las figuras tendrán la leyenda “falla” para hacer referencia a que son los resultados máximos registrados al momento de la falla del modelo no equipado con disipadores.

En las Figuras 23 y 24, se muestran los resultados del desplazamiento lateral máximo del nodo A y nodo B, en las direcciones ortogonales del análisis. Comparando los desplazamientos del modelo sin disipadores contra el modelo con disipadores, en ambas direcciones y ambos nodos, se observa que, a causa de los disipadores de energía existe una disminución en el desplazamiento lateral de la estructura, lo que reduce los daños esperados en la escuela.

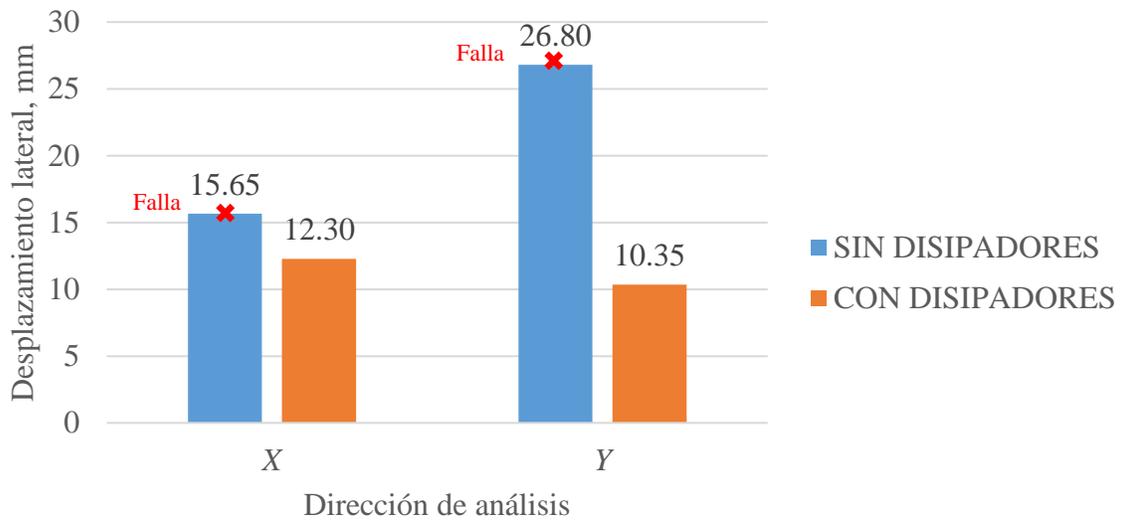


Figura 23. Desplazamiento lateral máximo, nodo A

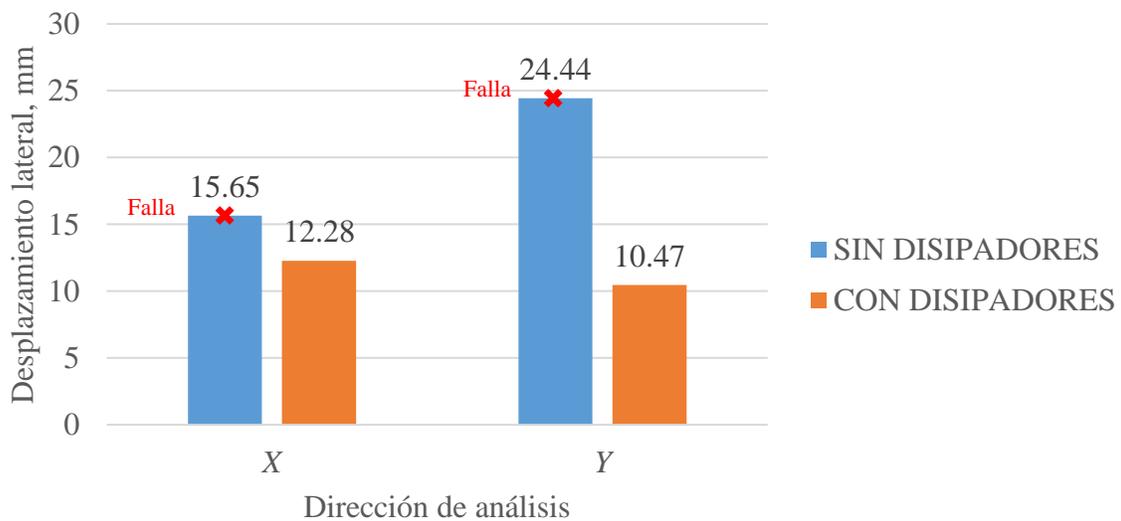


Figura 24. Desplazamiento lateral máximo, nodo B

6.1.2 Distorsiones de entrepiso

En cuanto a las distorsiones de entrepiso, se consideraron los desplazamientos del nodo que mostró los valores máximos.

La Figura 25 muestra las distorsiones de entrepiso que se obtuvieron del análisis de ambos modelos. El modelo sin disipadores presentó una distorsión de 0.005 en el sentido X y de 0.008 para Y, momentos antes de la falla, ambos valores sobrepasan el límite de servicio determinado con la NTC-Concreto (2017), lo que indica que habrá daños graves en los elementos no estructurales, los cuales que afectarían

el uso del inmueble, lo cual se debe evitar por el uso del inmueble, ya que al ser una escuela debe conservar un nivel de seguridad tal que indique no habrá ningún daño.

Para el modelo equipado con disipadores, se vio que la distorsión máxima de entrepiso en la dirección de análisis X fue de 0.004, mientras que en la dirección Y de 0.003, valores que quedan por debajo del valor límite de servicio, por lo que no se esperarían daños en la estructura, por lo que se logra llevar a la estructura al nivel de seguridad deseado.

Ninguna de las distorsiones de entrepiso máximas de los dos modelos supera el Límite de Colapso, por lo que se puede asegurar que, aunque el inmueble se vea afectado en sus elementos no estructurales, la estabilidad estructural está asegurada.

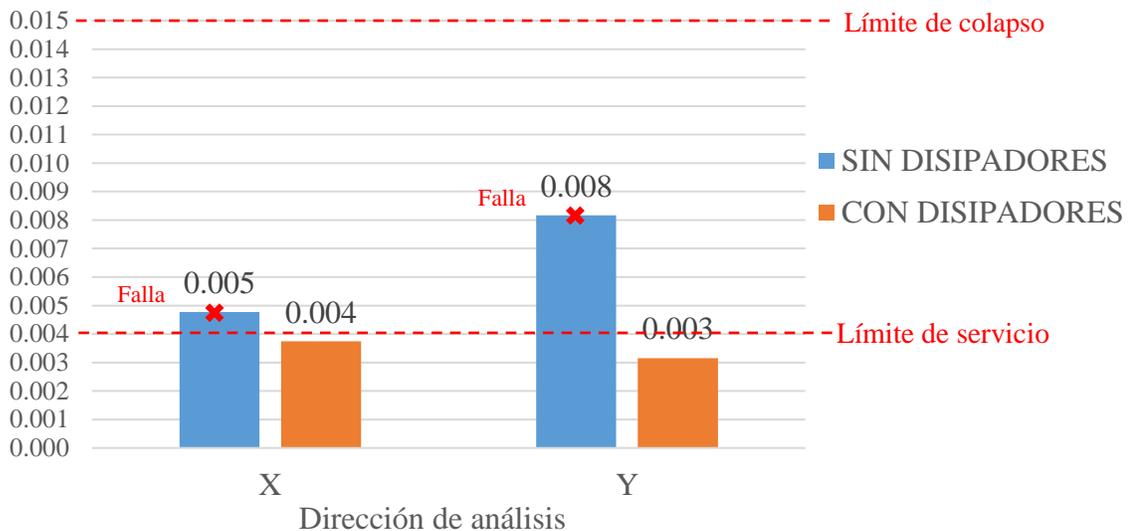


Figura 25. Distorsión de entrepiso máxima

6.1.3 Cortante basal

El cortante basal máximo que sufre la estructura, sin disipadores y con disipadores, se presenta en la Figura 26. Se observa que con disipadores en el sentido X , se tiene un valor de 514 t, mientras que el valor registrado para la estructura sin disipadores fue de 387 t, mientras que en dirección Y los resultados para el cortante basal máximo son de 422.08 t con disipadores y de 471.22 sin disipadores.

Los resultados muestran que, para la dirección de análisis X , los disipares de energía sísmica modifican el comportamiento de la estructura y se incrementa la demanda de cortante basal a la estructura, sin embargo, el cortante basal resistente es de 585 toneladas, por lo que la demanda sigue estando por

debajo de la resistencia. En cambio, para la dirección de análisis Y, los disipadores logran disminuir la demanda de cortante basal en esa dirección.

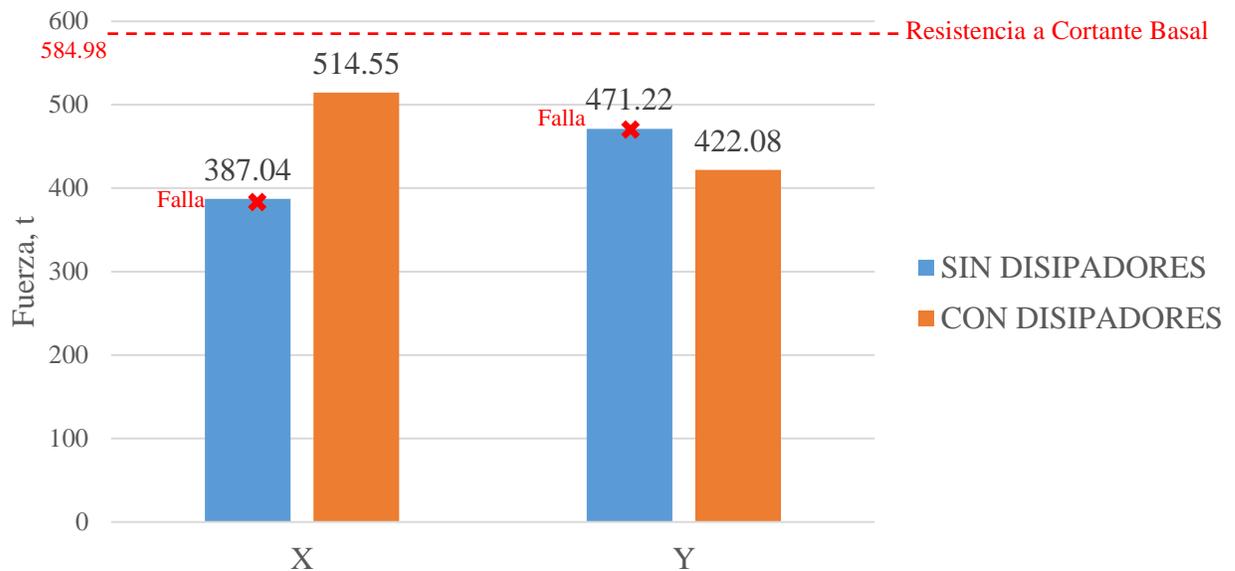


Figura 26. Cortante basal máximo

6.1.4 Elementos mecánicos

6.1.4.1 Carga axial

En las Figuras 27 y 28, se muestran los resultados obtenidos en términos de fuerza axial en columnas, tanto para el modelo sin equipar como el equipado. Se puede observar que existen grandes diferencias en los valores de estas cargas.

En el modelo con disipadores las cargas en compresión (37.16 t) y tensión (22.42 t), son mayores que para el modelo sin disipadores (compresión de 19.13 t y tensión de 8.21 t), lo que es de esperarse ya que los disipadores de energía suelen transferir más carga axial a las columnas y, a su vez, a la cimentación, pero paralelamente a este hecho también incrementan la resistencia a carga axial de las columnas. Sin embargo, cabe mencionar que el modelo sin disipadores presentó falla prematura, por lo que las cargas mostradas no son confiables.

Con respecto al modelo sin disipadores, la resistencia a compresión obtenida para las columnas fue de 328.65 toneladas, comparando este valor con las cargas a compresión obtenidas del modelo de 19.13 toneladas, la demanda está muy por debajo de la resistencia que proveen estos elementos. Para el caso de la fuerza a tensión se tiene una demanda de 8.21 t, mientras la resistencia es de 6.87 t, en este caso,

la resistencia a tensión queda rebasada por 1.34 t, por lo que aquí el modelo experimenta su primera falla en elementos mecánicos.

En cuanto al modelo con disipadores, la demanda de compresión máxima es de 37.16 t y la resistencia es de 501.24 t, por lo que el valor de la demanda queda cubierto. La demanda de tensión máxima es de 22.42 t, y la resistencia obtenida es de 129.64 t, por lo que, igualmente, el valor de la demanda queda cubierto.



Figura 27. Compresión máxima para la intensidad del 100%.



Figura 28. Tensión máxima para la intensidad del 100%

6.1.4.2 Cortante

En la Figura 29, se exponen los valores obtenidos del Cortante Máximo para la intensidad sísmica al 100% tanto del modelo sin disipadores y el modelo con disipadores.

Comparando el modelo con disipadores contra el modelo sin disipadores, se presenta una disminución del 50% del valor del cortante en la dirección Y, y del 33% en dirección X. Se puede apreciar que la resistencia a cortante de las columnas según las NTC-Concreto (2017), es 26.59 toneladas, lo que se compara contra las demandas en las columnas, y resulta que la resistencia es menor que la demanda.

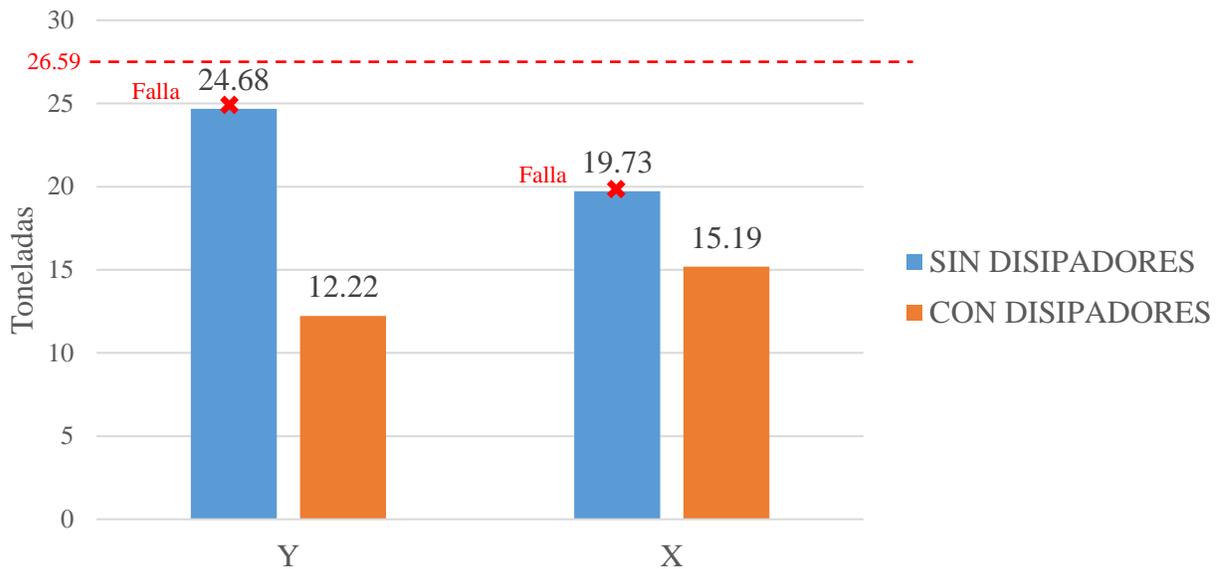


Figura 29. Cortante máximo para la intensidad al 100%.

6.1.4.3 Momento

La Figura 30 muestra las demandas de flexión en las columnas de ambos modelos. El momento máximo demandante en el modelo sin disipadores es de 48.41 t-m en dirección X, y la resistencia es de 48.17 t-m, por lo que resistencia de las columnas no es suficiente para darle cabida a la demanda, se puede decir que los elementos estructurales fallan a flexión.

En cuanto al modelo con disipadores, la demanda máxima (24.91 t-m) es menor que la resistencia (45.57 t-m), por lo que la flexión para dicho modelo no representa ningún riesgo. Los disipadores de energía mitigan el momento en casi un 50% en la dirección X de análisis, mientras que en la dirección Y, disminuyen el momento en casi un 24%.

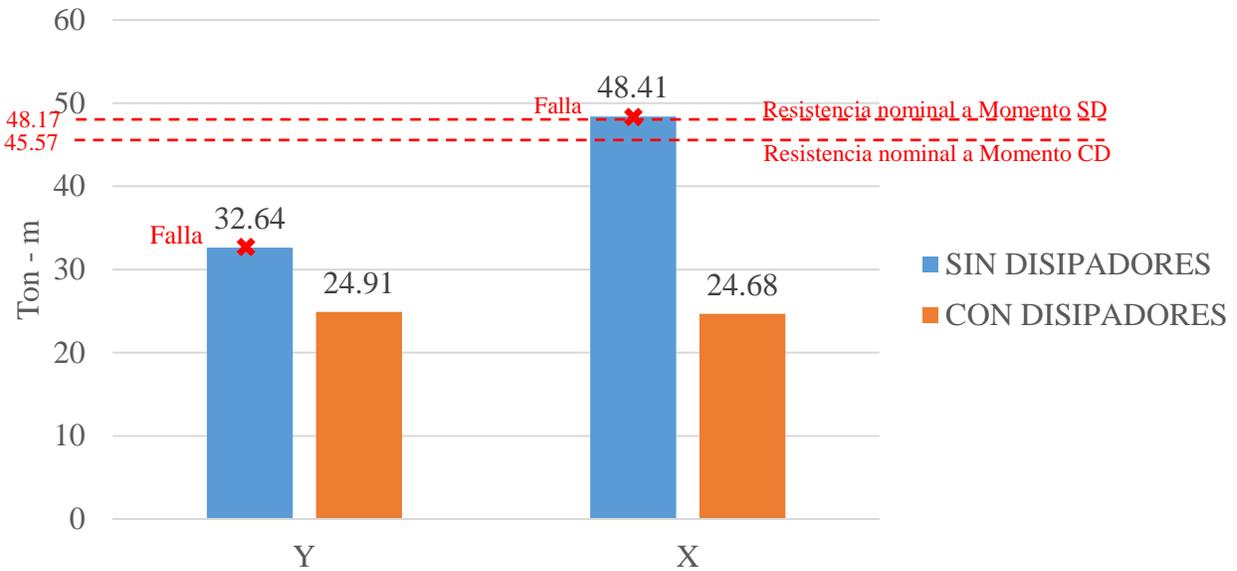


Figura 30. Momento máximo absoluto para la intensidad del 100%.

6.1.5 Estado de daño

En la Figura 31 podemos ver el daño esperado que tendría la estructura no equipada después del análisis dinámico no lineal. Los círculos verdes representan las articulaciones que se crean en los elementos estructurales debido a los efectos de la flexión. De un total de 22 columnas, 20 de ellas presentaron articulaciones, lo que produce inestabilidad en el sistema y se traduce en colapso numérico.

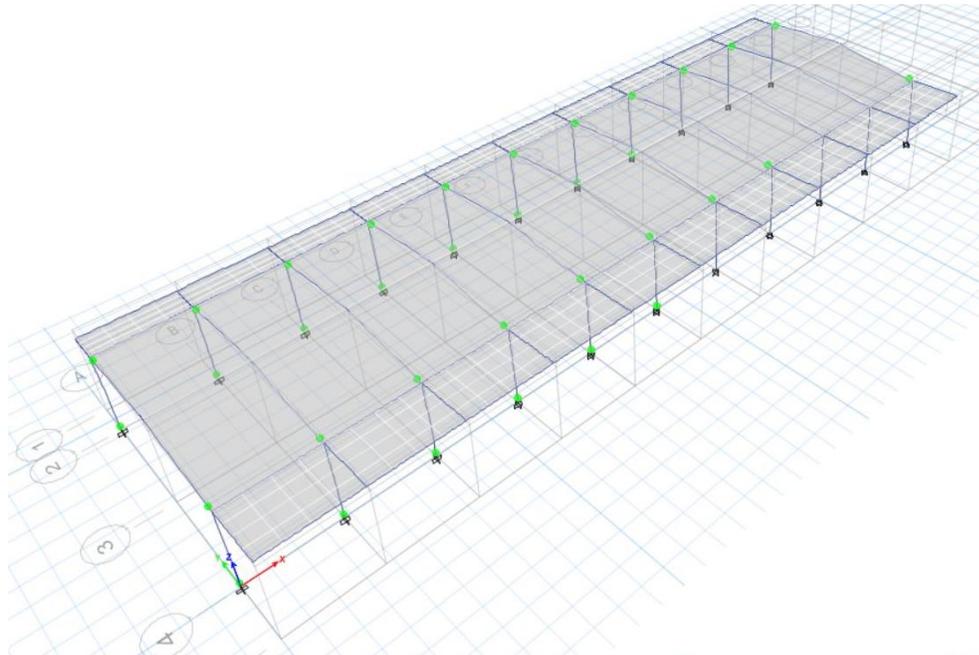


Figura 31. Formación de articulaciones, modelo sin disipadores, intensidad del 100%.

Para el modelo con disipadores de energía sísmica, se puede observar en la Figura 32, que no se presenta ninguna articulación en la estructura. Tan solo una deformación en el volado, lo cual no pone en riesgo la estructura.

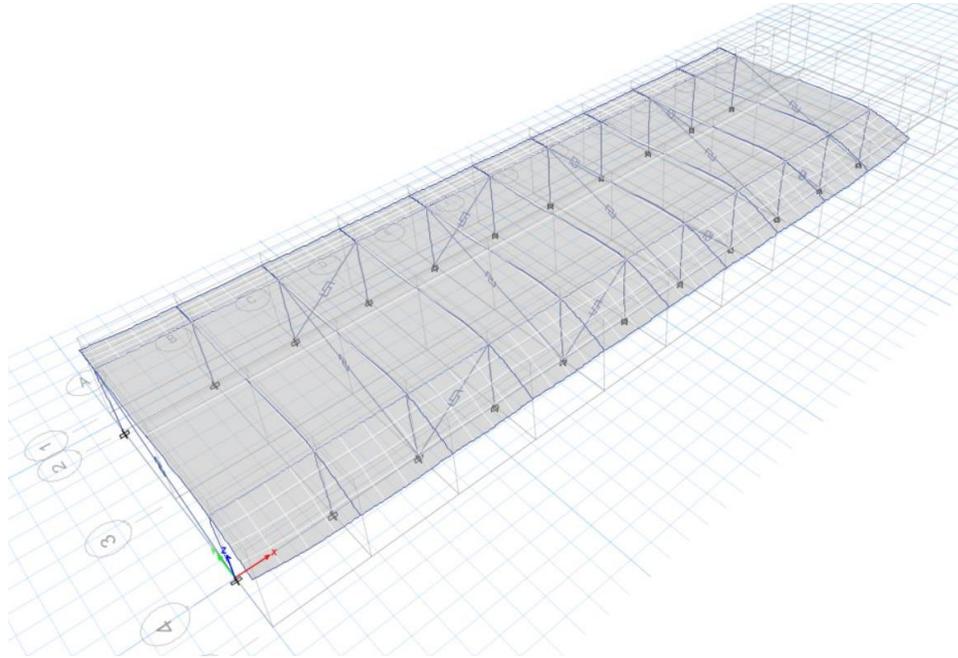


Figura 32. Formación de articulaciones, modelo con disipadores, intensidad del 100%.

6.1.6 Curvas de histéresis de los disipadores

Para obtener las curvas de histéresis se consideraron los disipadores más cercanos a las esquinas como disipadores de control en ambas direcciones de análisis. En X se denominó “Disipador X” y, en Y, “Disipador Y”, como se puede ver en la Figura 33.

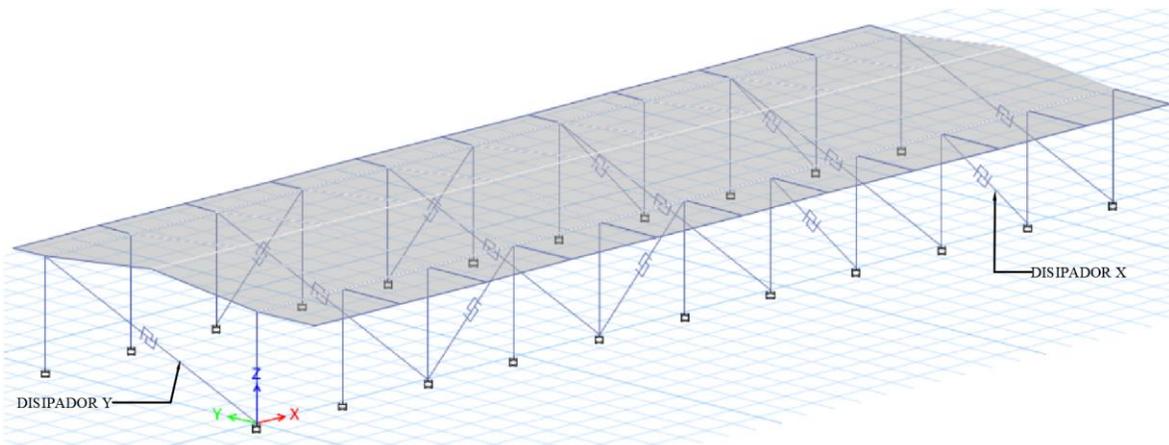


Figura 33. Disipadores de control

En la curva de histéresis para el Disipador X (Figura 34), se obtuvo una deformación máxima absoluta de 8.80 mm producida en un ciclo de carga en su fase a compresión con un valor de 35.75 t. La demanda de ductilidad máxima fue de $8.8 \text{ mm}/6 \text{ mm} = 1.47$. La demanda de ductilidad acumulada, según la Figura 35, fue de 19.51.

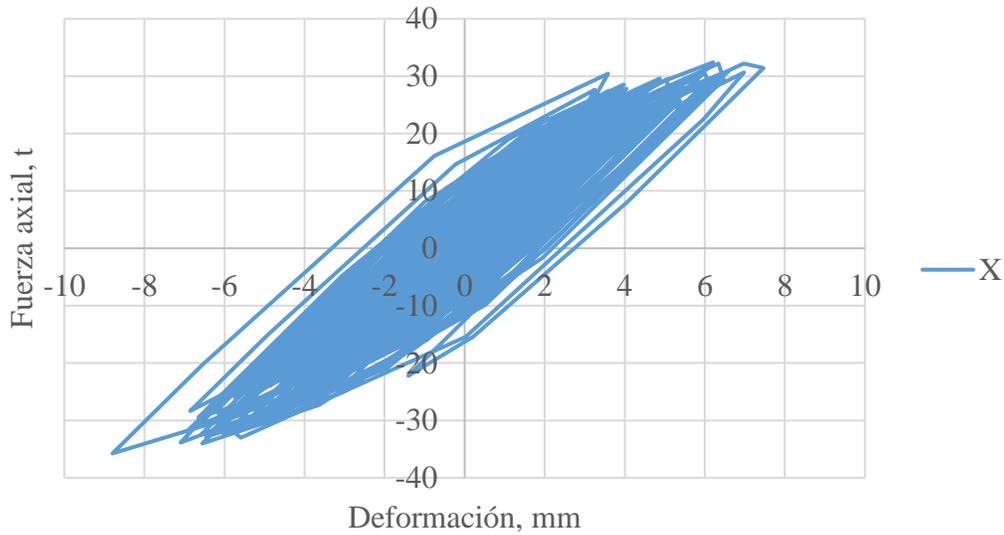


Figura 34. Curva de histéresis disipador X, para la intensidad del 100%.

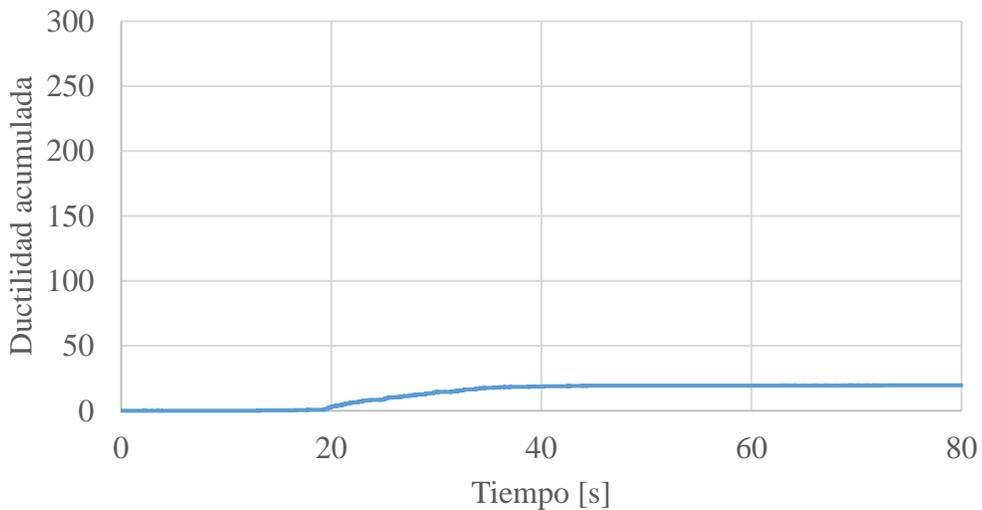


Figura 35. Curva de ductilidad acumulada del disipador X al 100% de la intensidad sísmica

En la curva de histéresis para el Disipador Y (Figura 36), se observó una deformación máxima absoluta de 9.62 mm producida por una carga a compresión con un valor de 37.20 t. Las demandas de ductilidad máxima y acumulada (ver Figura 37) fueron de 1.60 y 25.85, respectivamente.

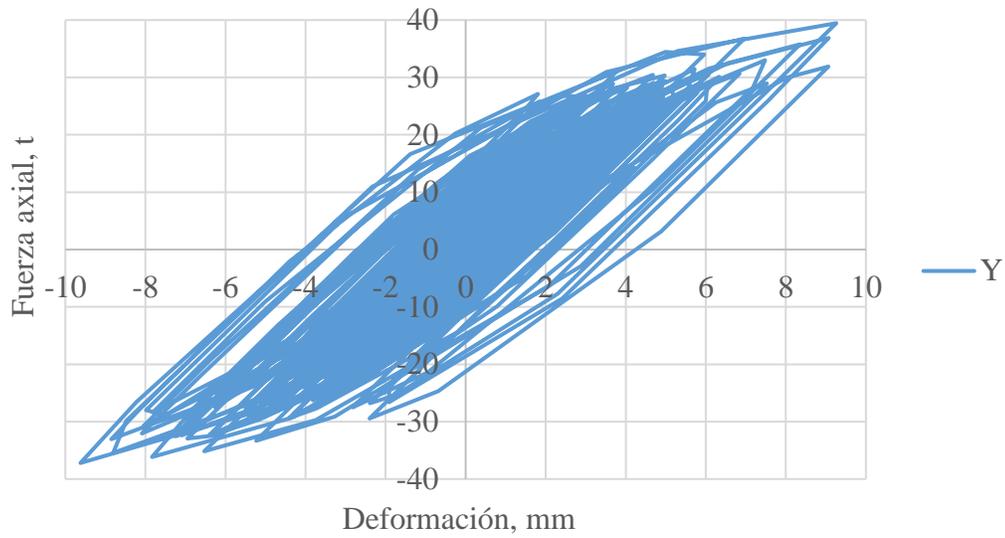


Figura 36. Curva de histéresis disipador Y, para la intensidad del 100%.

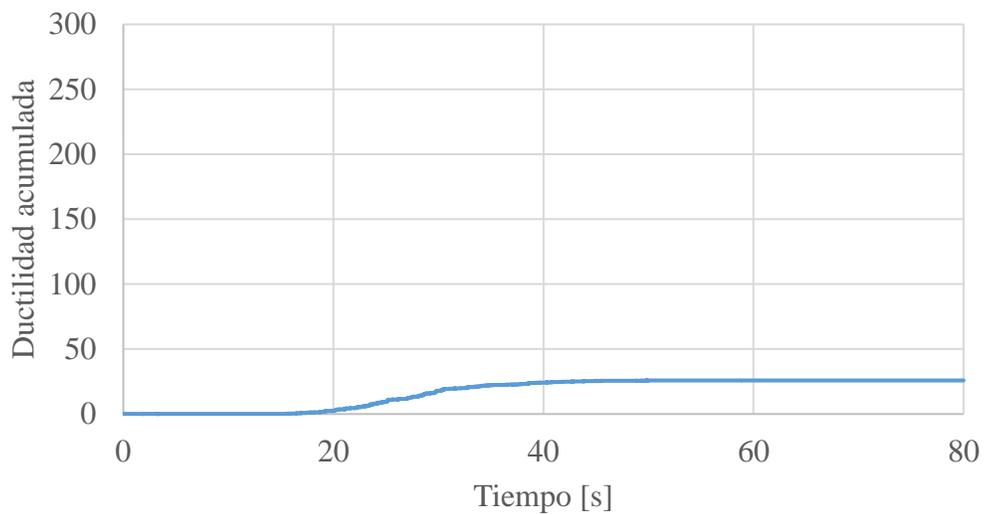


Figura 37. Curva de ductilidad acumulada del disipador Y al 100% de la intensidad sísmica

6.2 Respuesta sísmica al 50% de la intensidad de diseño actual

Como consecuencia de la falla estructural que sufrió el modelo sin disipadores en el análisis no lineal con una intensidad sísmica de diseño actual, se optó por hacer un análisis con la mitad de la intensidad.

Para poder comparar los resultados del modelo sin disipadores al 50% de la intensidad sísmica actual, se hizo el análisis para el modelo con y sin disipadores.

Se mantuvieron los mismos nodos de control para poder presentar con mayor facilidad los resultados.

La respuesta en el tiempo, resultado del análisis dinámico no lineal del modelo sin disipadores, se presenta en las Figuras 38 y 39. Se ve en el nodo A un desplazamiento máximo absoluto en dirección X de 14.99 mm a los 27.26 s y en dirección Y de 24.63 mm a los 28.36 s.

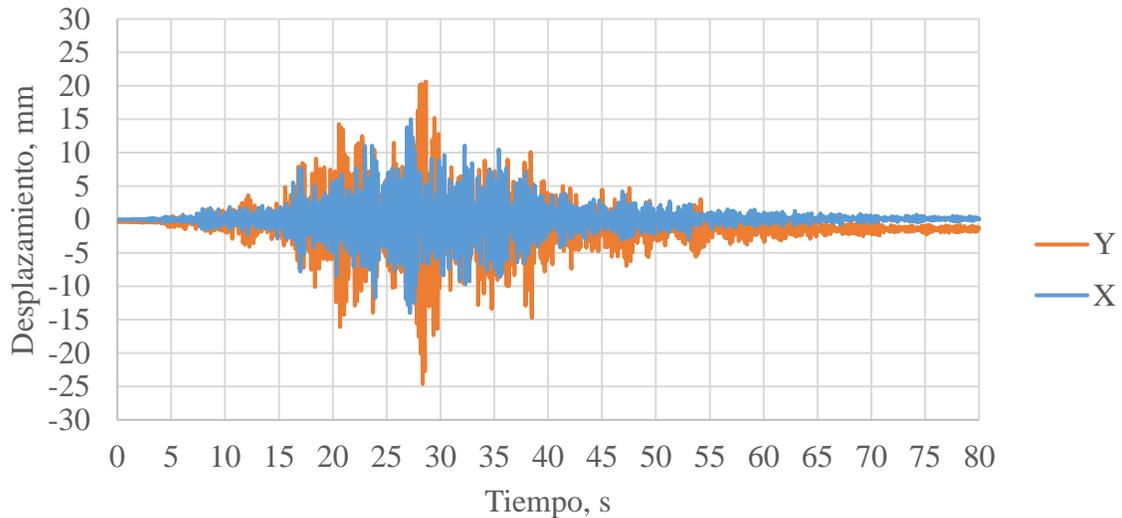


Figura 38. Historia de desplazamiento del análisis dinámico no lineal sin disipadores, nodo A, intensidad del 50%.

En el nodo B, se obtuvo un desplazamiento máximo absoluto en dirección X de 14.99 mm a los 27.26 s y en dirección Y de 19.04 mm a los 28.54 s.

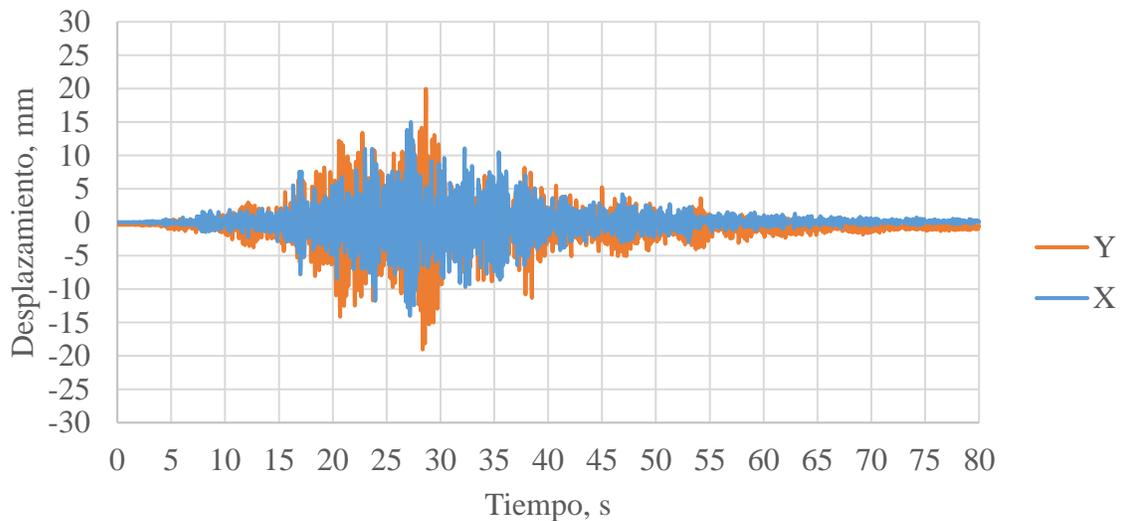


Figura 39. Historia de desplazamiento del análisis dinámico no lineal sin disipadores, nodo B, intensidad del 50%.

Las Figuras 40 y 43 muestran los resultados obtenidos para el modelo equipado. En el nodo A, se obtuvo un desplazamiento máximo absoluto en X de 6.14 mm a los 21.22 s, en dirección Y se obtuvieron 5.41 mm a los 29.70 s.

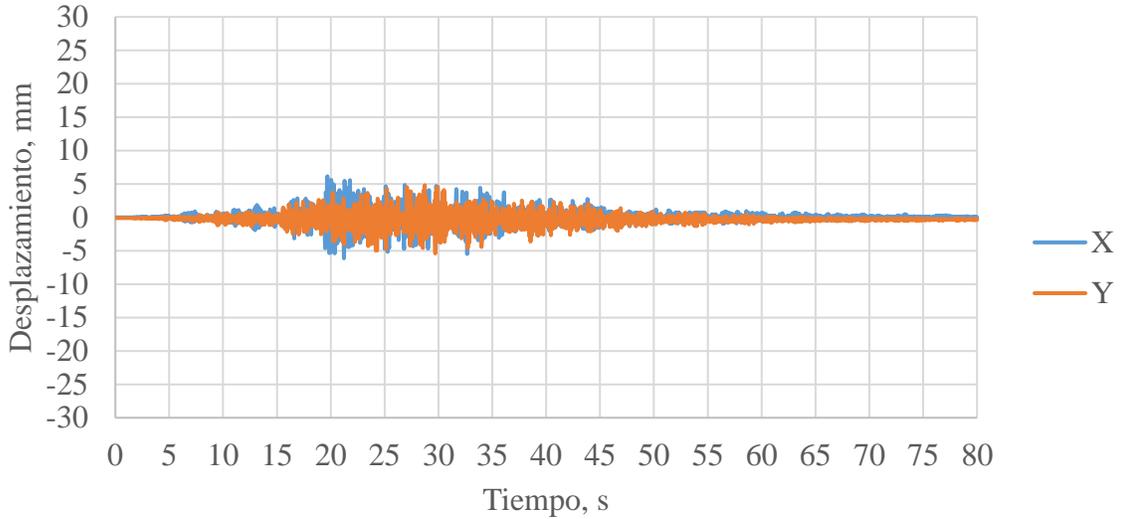


Figura 40. Historia de desplazamiento del análisis dinámico no lineal con disipadores, nodo A, intensidad del 50%.

En el nodo B, el desplazamiento máximo absoluto en dirección X fue de 6.14 mm a los 21.22 s, en dirección Y fue de 5.57 mm a los 29.70 s.

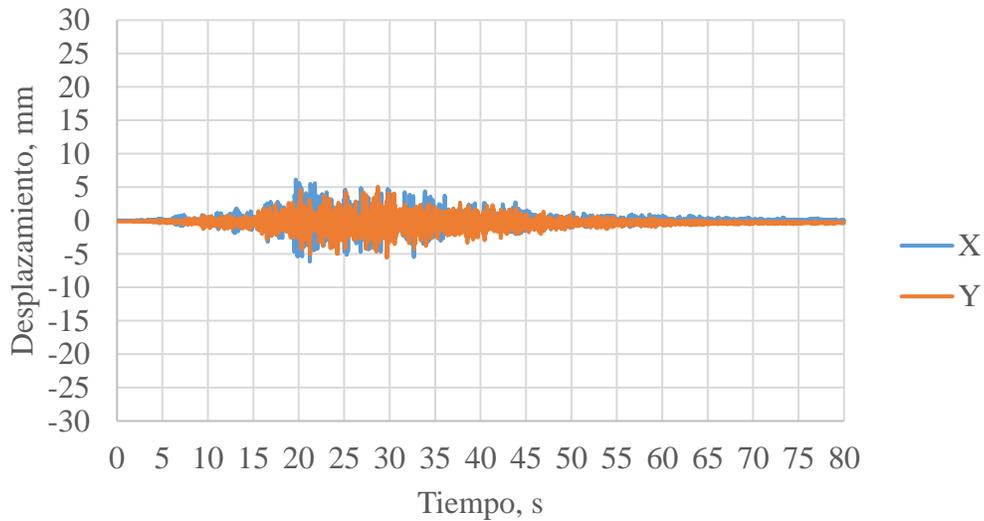


Figura 41. Historia de desplazamiento del análisis dinámico no lineal con disipadores, nodo B, intensidad del 50%.

6.2.1 Desplazamientos laterales máximos

Las Figuras 42 y 43 comparan los desplazamientos laterales máximos absolutos con y sin disipadores. Se puede ver que la estructura con los elementos de protección sísmica muestra resultados con valores de menos de la mitad con respecto a los obtenidos sin disipadores.

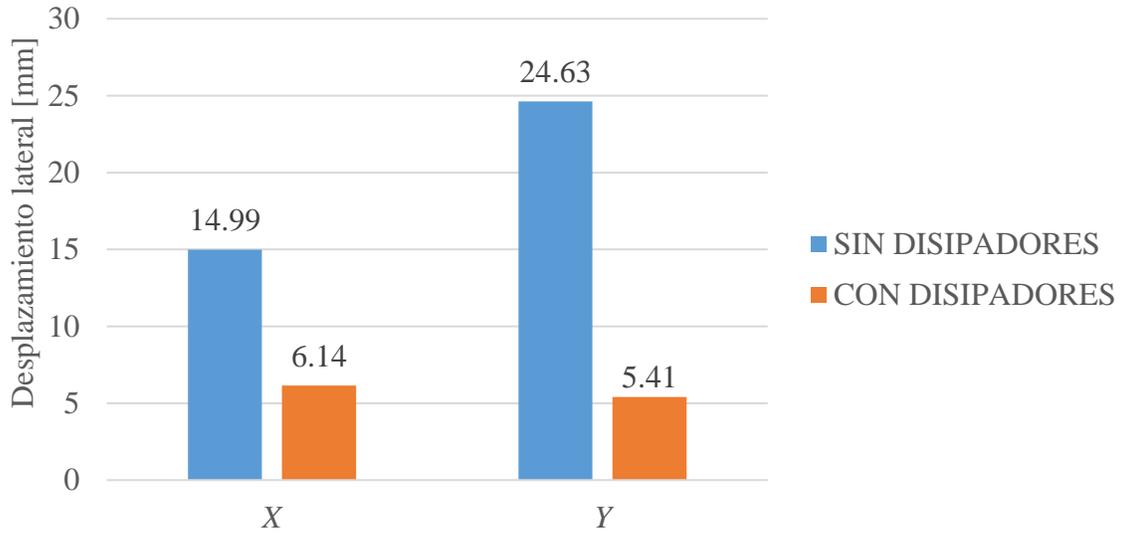


Figura 42. Desplazamiento lateral máximo, nodo A, intensidad del 50%.

Los resultados del nodo B para el modelo sin disipadores fueron, para X, 14.99 mm y, para Y, 19.97 mm. Para el modelo con disipadores, el desplazamiento lateral máximo para X fue de 6.14 mm y para Y de 5.57 mm.

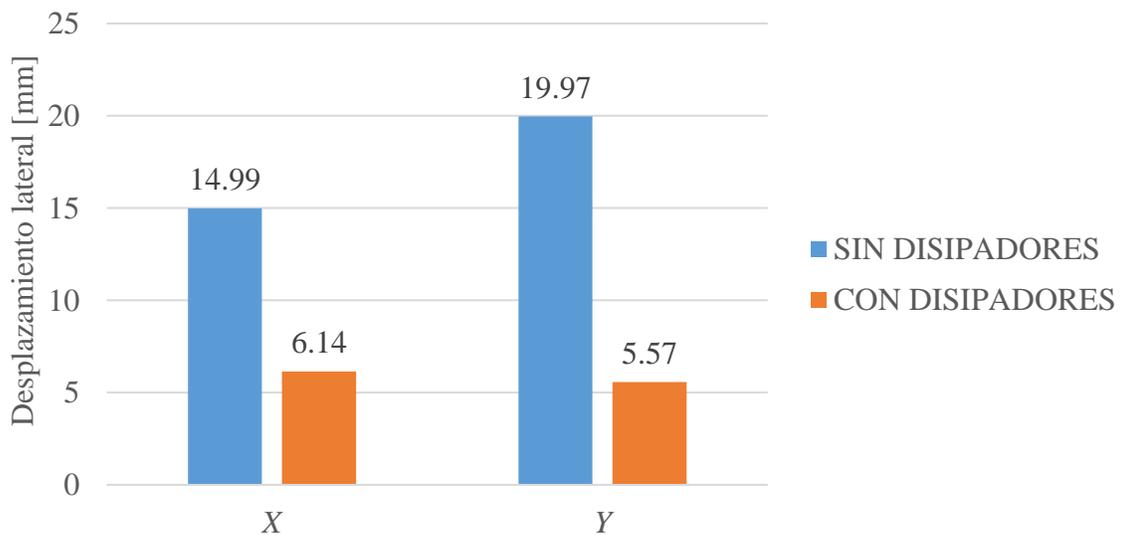


Figura 43. Desplazamiento lateral máximo, nodo B, intensidad del 50%.

6.2.2 Distorsiones de entrepiso

La Figura 44 muestra las demandas máximas de distorsión de entrepiso en la estructura con y sin disipadores para la intensidad sísmica de diseño al 50%. El modelo sin disipadores presentó una distorsión de 0.004 en el sentido X y de 0.008 para Y , superando en dirección Y el límite de servicio, por lo que se esperarían daños no estructurales.

Para el modelo equipado con disipadores, la distorsión máxima de entrepiso para ambas direcciones de análisis fue de 0.002, quedando por debajo de los límites de servicio y de colapso, por lo que se espera estabilidad estructural y que muy probablemente la escuela podrá seguir operando sin ningún daño.

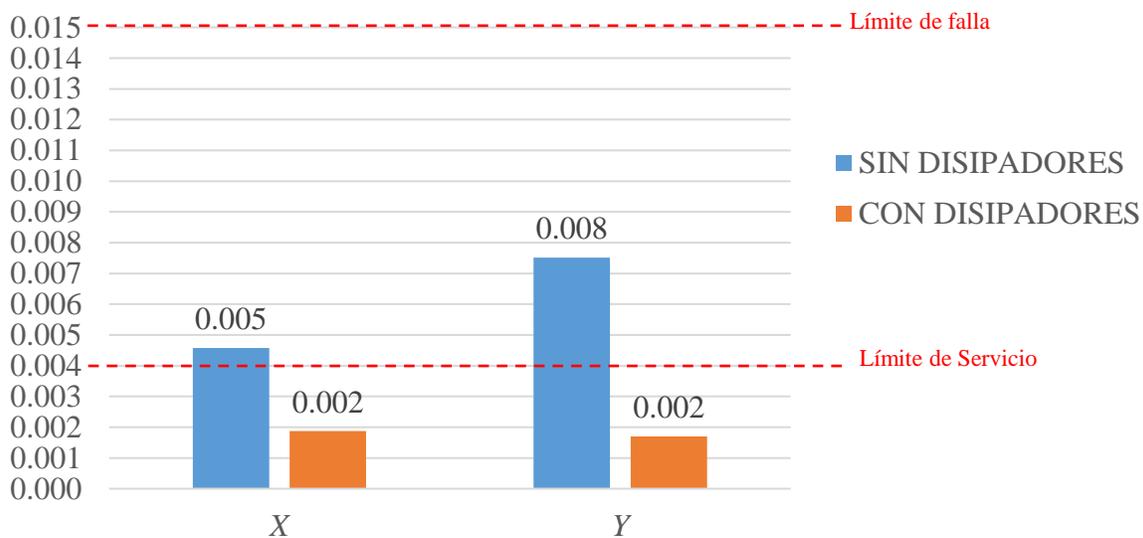


Figura 44. Distorsión de entrepiso máxima para la intensidad al 50%.

6.2.3 Cortante basal

La Figura 45 muestra los valores máximos del cortante basal resultado del análisis no dinámico. El modelo sin disipadores no presenta una falla estructural, los valores del cortante basal neto que se obtuvieron del modelo no equipado fueron un 60% mayores en el eje Y con respecto a los resultados del modelo con disipadores, mientras que en el eje X es mayor en un 25%. Se puede decir que los disipadores de energía lograron reducir las sollicitaciones en términos del cortante basal que el sismo le ejerció sobre las columnas.

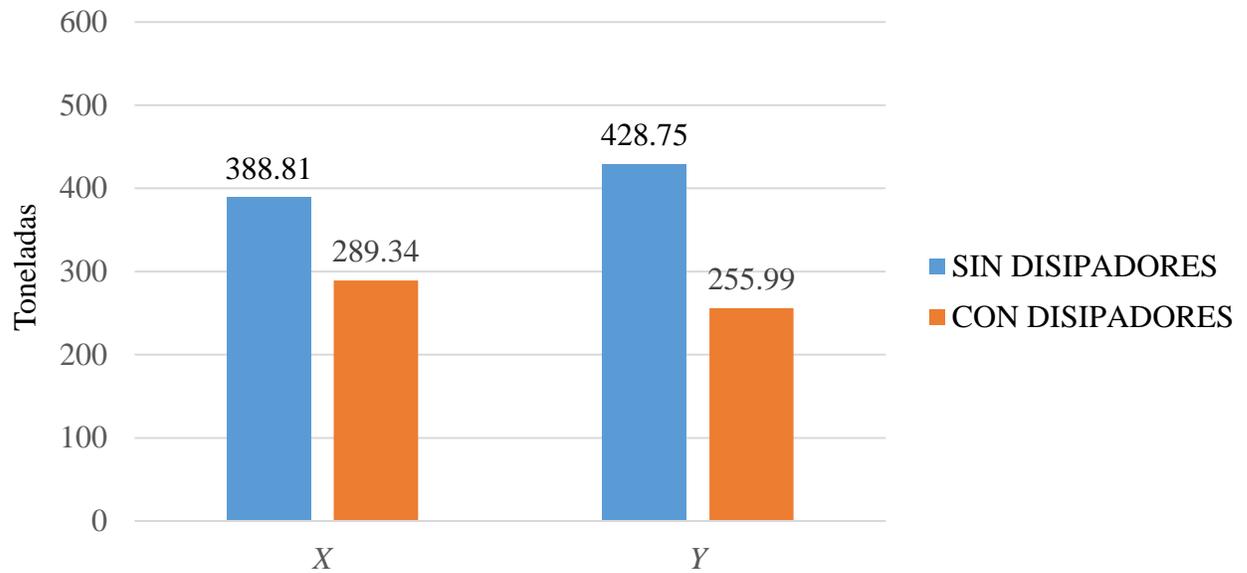


Figura 45. Cortante basal máximo, intensidad al 50%.

6.2.4 Elementos mecánicos

6.2.4.1 Carga axial

Las Figuras 46 y 47 muestran los valores de las cargas axiales, en el modelo equipado con los disipadores las cargas de compresión fueron mayores en casi un 40% que las del modelo sin equipar, mientras que las de tensión en el modelo con disipadores fueron mayores en un 38% con respecto a las del modelo sin disipadores. Las fuerzas axiales de compresión representaron una mayor demanda en cuanto a resistencia.

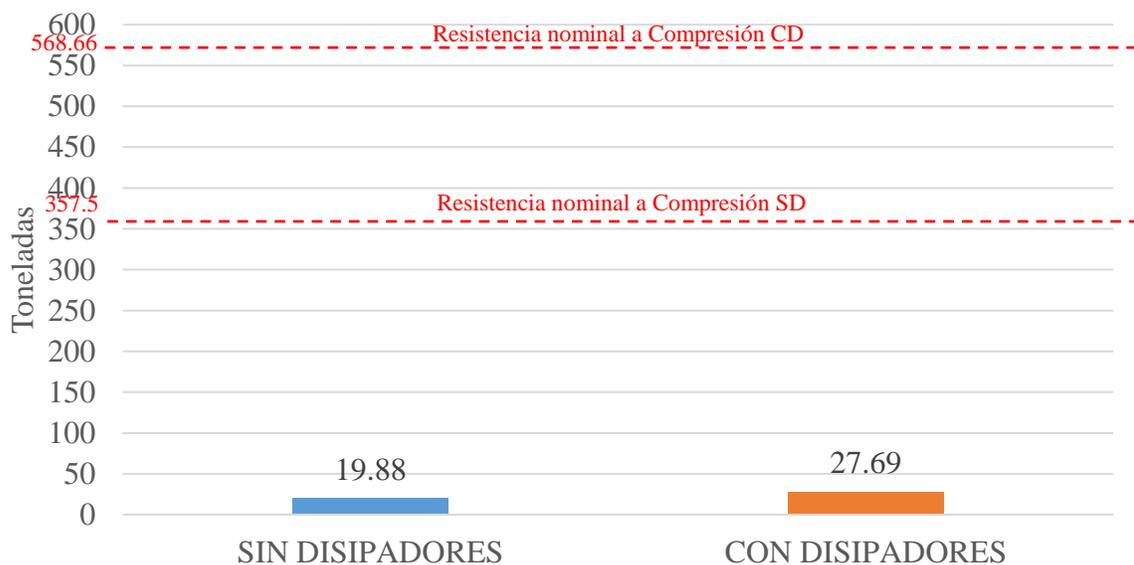


Figura 46. Compresión máxima



Figura 47. Tensión máxima

6.2.4.2 Cortante

La Figura 48 muestra las demandas de cortante máximo en las columnas. Se puede ver que las fuerzas con mayor magnitud las presenta el modelo sin disipadores, con valores que rondan las 20 toneladas en ambas direcciones de análisis. Los disipadores de energía logran reducir las solicitudes de manera importante.

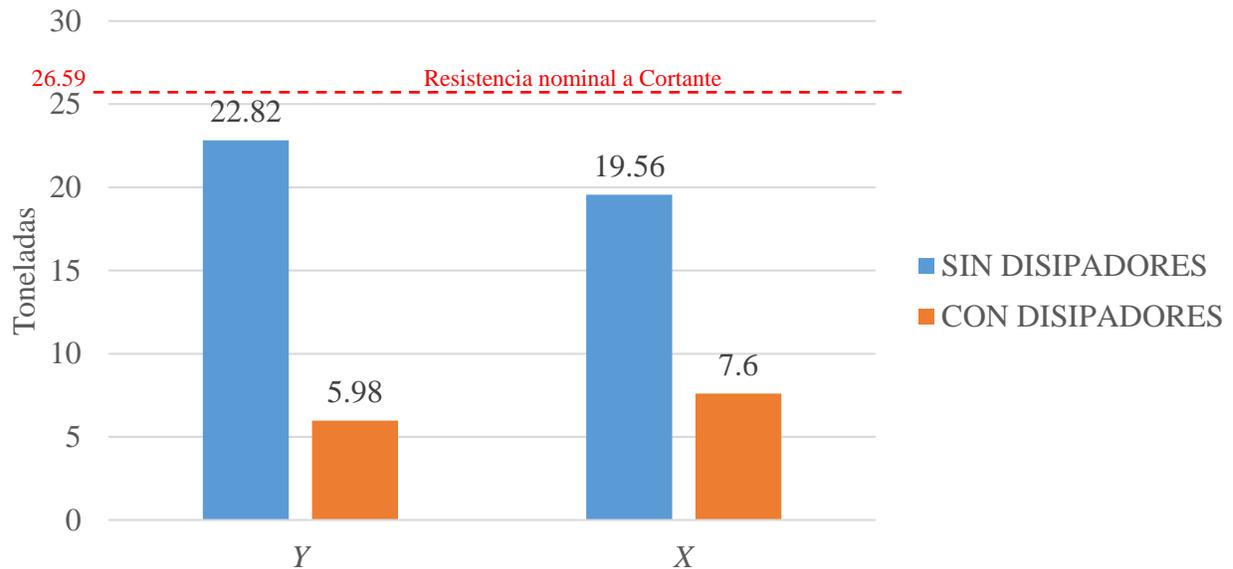


Figura 48. Cortante máximo para la intensidad del 50%.

6.2.4.3 Momento

La Figura 49 muestra los valores de los momentos máximos alrededor del eje X y Y. Los momentos flexionantes fueron de mayor valor en el modelo sin disipadores de energía, mientras que en el modelo con disipadores las solicitaciones se redujeron en más de la mitad.

Por el contrario, los valores máximos absolutos del momento en ambas direcciones del modelo equipado difieren entre sí solo en un 0.8%, lo que genera una flexión uniforme en ambos sentidos de la estructura.

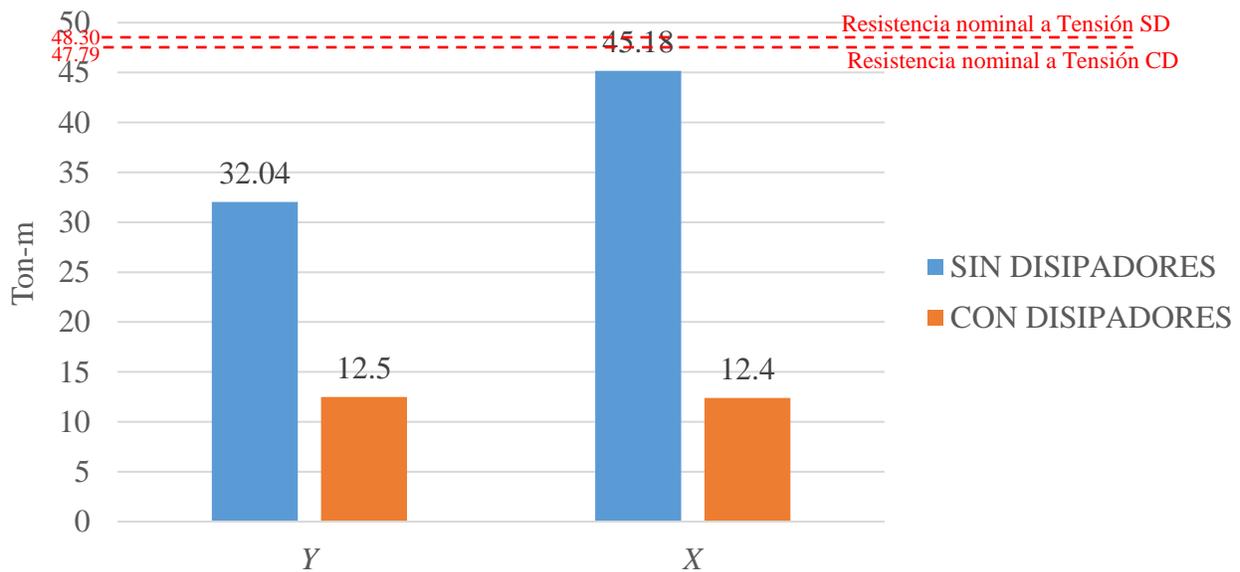


Figura 49. Momento máximo absoluto para la intensidad del 50%.

6.2.5 Estado de daño

En la Figura 50 se observan las articulaciones que se generaron al término del análisis en la estructura U1-C sin disipadores. De las 22 columnas que constituyen a la estructura, 11 de ellas se articularon en su conexión con las vigas, y 6 mostraron una doble articulación.

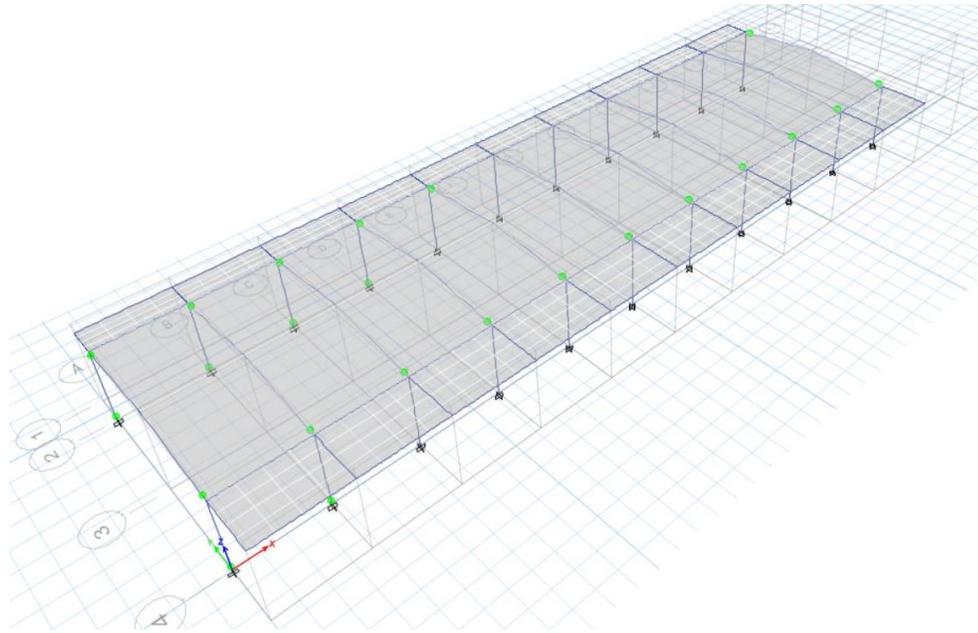


Figura 50. Formación de articulaciones, modelo sin disipadores para la intensidad del 50%.

En la Figura 51, se muestra el estado de daño final de la estructura con disipadores. Se puede ver que no se generaron articulaciones en los elementos estructurales. Se observó que se producen deformaciones muy bajas en los elementos estructurales, lo que indica que los disipadores generan reducciones significativas de las distorsiones de entrepiso, permaneciendo por debajo de los límites de servicio y colapso.

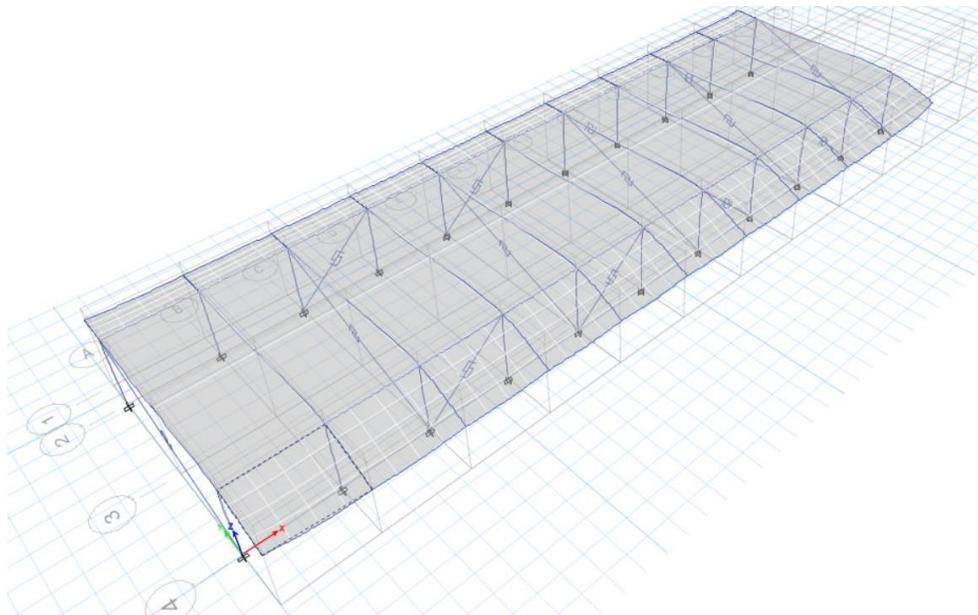


Figura 51. Formación de articulaciones, modelo con disipadores para la intensidad del 50%.

6.2.6 Curvas de histéresis de los disipadores

Las Figuras 52 y 53 muestran las curvas de histéresis de los disipadores, uno en dirección X y otro en Y. Se puede notar que hay una diferencia de aproximadamente 50% en los valores de desplazamiento entre las curvas de histéresis obtenidas para este análisis con intensidad sísmica del 50% (Figuras 52 y 53), y las obtenidas con una intensidad al 100% (figuras 34 y 36), lo cual era de esperarse, debido a que, al bajar la intensidad sísmica, se espera una disminución de las sollicitaciones sísmicas.

El Disipador X tuvo una deformación máxima absoluta de 4.40 mm producida por una carga a compresión con un valor de 24.02 t.

El comportamiento histérico del Disipador Y, tuvo una deformación máxima absoluta de 5.03 mm debido a una carga de compresión de 25.38 t.

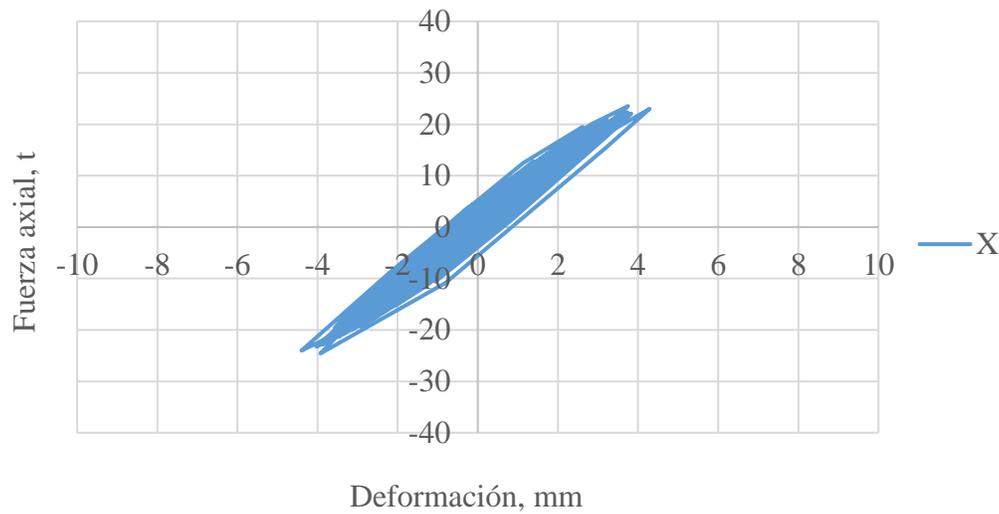


Figura 52. Curva de histéresis dirección X para intensidad del 50%.

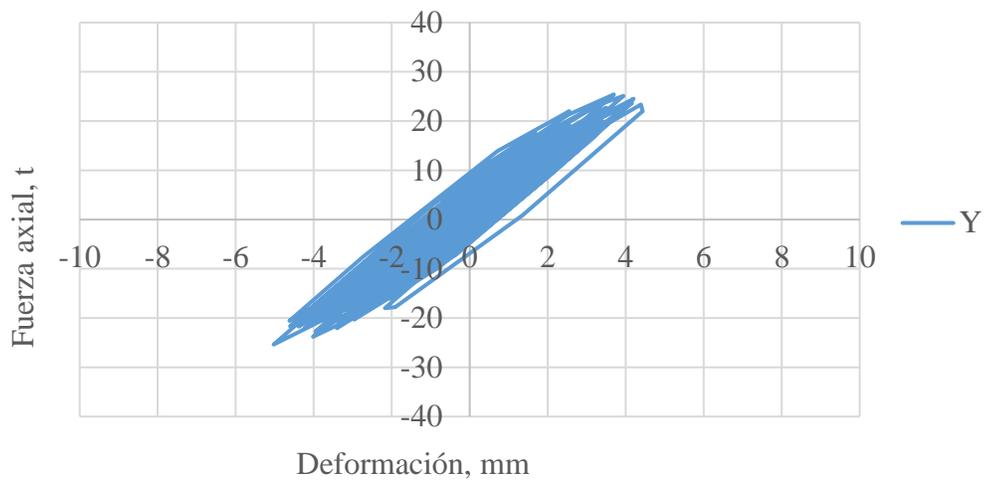


Figura 53. Curva de histéresis dirección Y para intensidad del 50%.

7. Discusión de resultados

La ductilidad acumulada permite medir la capacidad de disipación de energía de un disipador. Al comparar la curva de ductilidad acumulada demandada en el disipador (Figuras 35 y 37) contra la curva de capacidad de ductilidad acumulada, según las pruebas de laboratorio realizadas (Figura 7), resulta evidente que las solicitaciones están por debajo de la capacidad de los disipadores.

La solicitación máxima en términos de la ductilidad acumulada para el disipador fue de 19.51 en X y 25.85 en Y , mientras que la capacidad total del disipador fue de 290. Entonces, las solicitaciones corresponden a solo un 10% de la capacidad del disipador. Esto indica que los disipadores agregados a la estructura podrán resistir casi 10 veces un movimiento sísmico de igual magnitud que el considerado para el análisis al 100% de la intensidad de diseño. Es decir, será necesario reemplazar los disipadores agregados a la estructura hasta que la ductilidad acumulada en dichos elementos rebase el valor de la capacidad, lo cual dependerá de la ocurrencia y magnitud de los sismos que se presenten a lo largo de la vida útil de dichos elementos. Lo anterior se traduce en una alta longevidad y un bajo costo.

Rebasada la capacidad de los disipadores, estos se podrán sustituir por elementos nuevos con las mismas características. El procedimiento, en cuestiones constructivas, es muy sencillo comparándolo con las actividades que se deberían ejecutar para reparar la estructura después de un evento sísmico de altas magnitudes. Después de cada evento sísmico, puede monitorear el estado de los disipadores para que siempre estén en óptimas condiciones, si resulta necesario, darles mantenimiento y, así, evitar daños en la edificación.

Se observó que las esquinas de la estructura se desplazan más para el caso sin disipadores que con estos. De hecho, la estructura sin disipadores presentó colapso. Al evaluar las distorsiones de entrepiso generadas en el modelo equipado, los valores quedaron por debajo del límite permisible que marca el MDOC-MDS (Comisión Federal de Electricidad, 2015) para asegurar la seguridad del edificio contra colapso.

Estudiando el cortante basal máximo, se observó que la capacidad de la estructura aumentó de manera importante, en otras palabras, los disipadores ayudaron a la edificación a resistir solicitaciones mayores, ya que estos absorben una gran cantidad de la energía inducida por el sismo.

Como resultado del análisis dinámico no lineal se obtuvo que la fuerza de tensión máxima demandada para el modelo no equipado fue de 8.21 toneladas, sin embargo, la resistencia de las columnas sin

disipadores es de 6.87 toneladas, por lo que la demanda fue mayor que la resistencia, lo cual indica que se generó una falla a tensión. Por el contrario, en el modelo con disipadores, se obtuvo una demanda de 22.42 toneladas y una resistencia de 129.64 toneladas. Esto es debido a que los disipadores proveen arrostramiento a la estructura, lo que genera momentos menores y mayor capacidad de carga axial en las columnas.

Comparando el cortante máximo absoluto producido en las columnas del modelo sin equipar contra el modelo equipado, se obtuvo que la demanda en el modelo sin disipadores en la dirección *Y* fue de 24.68 toneladas valor que está cerca de la resistencia de las columnas que es de 26.59 toneladas, sin embargo, al adicionar los disipadores al modelo, la demanda disminuyó en un 50%. Lo anterior indica que, los disipadores de energía logran aumentar la rigidez del edificio de tal manera que el cortante que actúa en las columnas es de menor magnitud.

El estado de daño al final del análisis dinámico lineal para la estructura analizada sin disipadores mostró que hay presencia de articulaciones en 20 columnas de las 22 que conforman los marcos rígidos, es decir, las uniones de las columnas llegan a su estado plástico. La escuela equipada con el sistema de protección sísmica no presentó articulaciones, por lo que todos los elementos estructurales trabajaron en su estado elástico lineal.

Para evaluar la disipación de energía de los disipadores Dampo 1505, se obtuvieron las curvas de histéresis, las cuales muestran que dichos elementos funcionan en su estado plástico no lineal, lo que asegura un comportamiento apropiado. Dado un evento sísmico, primero actuarán los dispositivos que disiparán gran parte de la energía. Como resultado de esto, las solicitaciones que se demanden en las columnas serán de menor magnitud.

Durante el desarrollo de este trabajo, se decidió evaluar el desempeño de la estructura con el 50% de la intensidad sísmica y se compararon los resultados con y sin los disipadores. Los desplazamientos máximos obtenidos en el modelo sin disipadores, en dirección *Y*, fueron cercanos a 25 mm y para *X* a 15 mm, lo que sugiere una menor rigidez en el sentido *Y* de la estructura. En cuanto a la estructura con disipadores, en dirección *Y* se registró un desplazamiento de 5.6 mm y en *X* de 6.1 mm, lo que indica que los disipadores propuestos no sólo aportan mayor rigidez a la estructura en sentido *Y*, si no que logran que el comportamiento sea más uniforme en ambas direcciones.

En la estructura no equipada, la distorsión de entrepiso en dirección *Y* superó el valor del límite de servicio que marca el Manual de Diseño por Sismo de la CFE (Comisión Federal de Electricidad,

2015), así que sigue presentando daños en los elementos secundarios como muros divisorios, pisos, ventanas, etc. Eso no ocurrió en la estructura equipada. Lo anterior indica que, aún en un sismo moderado, resultaría útil aplicar un sistema de disipación de energía en la estructura, ya que se evitarían daños no estructurales que imposibilitan el uso de la misma, llevándola a un nivel de protección de ocupación inmediata post sismo.

El estado de daño final de la estructura sin disipadores de energía mostró que 17 columnas sufrieron articulaciones ante la intensidad sísmica del 50%, mientras que el modelo equipado tuvo deformaciones tales que las columnas siguieron trabajando en su estado elástico lineal por lo que no se observaron articulaciones.

Ante la intensidad sísmica al 50% los dispositivos alcanzaron a disipar una gran cantidad de energía, aunque menor a aquella que se disipó con el 100% de la intensidad.

8. Conclusiones y recomendaciones

8.1 Conclusiones

Se analizó una escuela tipo U1-C con y sin disipadores de energía sísmica. Los resultados de los análisis muestran que la estructura sin disipadores presentó falla para la intensidad sísmica del 100%. Ello no ocurrió en el modelo con disipadores. Los disipadores ayudaron a la estructura a tener un mejor desempeño sísmico, ya que no se presentaron articulaciones en sus columnas.

El desplazamiento máximo en dirección *Y*, registrado antes de la falla del modelo sin disipadores, fue de 26.79 m; para el modelo con disipadores ese desplazamiento máximo en *Y* fue de 10.46 mm, por lo que los disipadores lograron mitigar la demanda de desplazamientos en un 61%.

En el caso del modelo con disipadores de energía sísmica, se muestra que las distorsiones de entrepiso están por debajo de los límites reglamentarios; por lo que el uso de los disipadores permitió mejorar el comportamiento ante las sollicitaciones sísmicas evaluadas y llevar a la estructura a un nivel de seguridad superior para el inmueble estudiado.

Se observó que no solo hay una disminución en el valor de los elementos mecánicos, sino que también estos valores presentaron simetría con respecto a los ejes principales de la estructura. Ello indica que la presencia de los disipadores de energía en la estructura logró que ésta fuera más eficiente y la distribución sugerida ayudó a que el comportamiento fuera más uniforme en ambas direcciones de análisis. Este resultado hizo comprender la importancia de tener cuidado de realizar una distribución apropiada de los disipadores, pues así se logrará que el comportamiento de la estructura sea regular y que se registren desplazamientos menores, disminuyan las distorsiones de entrepiso, y se asegure la estabilidad del edificio ante un sismo severo.

8.2 Recomendaciones

Dada la importancia del inmueble, que es de uso escolar, y que está ubicado en una zona de alta sismicidad como lo es el estado de Guerrero, el uso de dispositivos parece una opción muy viable para reforzarlo. Sin embargo, también se deben evaluar otros aspectos no considerados en este trabajo y que son relevantes, como: efectos de interacción suelo-estructura, costos de inversión, tiempo de instalación, mantenimiento y vida útil de los dispositivos.

9. Referencias

- American Society of Civil Engineers. (2017). *ASCE standard, ASCE/SEI, 47-17, Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings*. Reston, Virginia: American Society of Civil Engineers.
- Chopra, A. (2014). *Dinámica de Estructuras* (4a edición ed.). México: Pearson.
- Comisión Federal de Electricidad. (2015). *Manual de Diseño de Obras Civiles*. Distrito Federal, México: CFE.
- Dampo. (2019). *Manual de diseño de disipadores histeréticos*. Recuperado el 19 de junio de 2020, de <http://www.dampo.com.mx/disipador-histeretico-dampo-1505/>
- Diáz de León, J. E. (2018). *Comparativa de dos filosofías de diseño sísmico aplicadas a edificios de concreto reforzado: método basado en desplazamientos y método basado en fuerzas NTC 2017*. Ciudad de México, México: UNAM.
- García, J. E. (2019). *Caracterización experimental de disipadores de energía sísmica de bajo costo*. Ciudad de México, México: UNAM.
- Genatios, C., & Lafuente, M. (2016). *Introducción al uso de aisladores y disipadores en estructuras*. Caracas, Venezuela: CAF - Banco de Desarrollo de América Latina.
- Hahn, R., & Sawislak, J. (2018). *The future of Infrastructure*. Londres : AECOM. Recuperado el 25 de 04 de 2020, de <https://aecom.com/thinkahead-issue2-2018-es/infraestructuras-resilientes/>
- Hanson, R. (1993). *Supplemental damping for improved seismic performance*. Michigan: Department of Civil & Environmental Engineering, University of Michigan.
- Instituto de Ingeniería. (2019). *Ensaye experimental de disipador de energía sísmica ripo "Dampo 1505"*. Ciudad de México, México: UNAM. Recuperado el 18 de Abril de 2020
- Merrit, S., Uang, C.-M., & Benzoni, G. (2003). *Subassemblage testing of corebrace buckling-restrained braces*. California, San Diego, EEUU: Universidad de California.
- Poy, L. (12 de julio de 2020). Infraestructura y equipamiento de escuelas públicas presentan "grave rezago", reconoce la SEP. *La Jornada*, pág. 13. Recuperado el 06 de octubre de 2020, de <https://www.jornada.com.mx/2020/07/12/politica/013n2pol>
- Rodríguez, V. (2019). *Diseño de disipadores de energía sísmica del tipo contraventeos restringidos al pandeo (CRP)*. Ciudad de Médico, México: UNAM. Recuperado el 03 de Abril de 2020
- Sánchez, D. (2020). *Simulación híbrida de una estructura equipada con disipadores tipo BRB*. Ciudad de México, México: UNAM.
- Wen, Y.-K. (1976). *Method for random vibration of hysteretic systems*. Journal of Engineering Mechanis, ASCE.