



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE INGENIERÍA

**Modelado no lineal de un disipador de
energía sísmica de tipo histerético de
origen mexicano**

TESIS

Que para obtener el título de

Ingeniero civil

P R E S E N T A

Yan Boehm Zatarain

TUTOR DE TESIS

Dr. Héctor Guerrero Bobadilla



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2020

ÍNDICE

ÍNDICE.....	2
ÍNDICE DE FIGURAS	4
AGRADECIMIENTOS	6
RESUMEN.....	7
ABSTRACT.....	7
1. INTRODUCCIÓN.....	8
1.1 Planteamiento del problema.....	8
1.2 Justificación	8
1.3 Objetivos y alcance.....	9
2. REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE	10
3. PRUEBAS EXPERIMENTALES	12
3.1 Configuración experimental.....	12
3.1.1 Arreglo experimental.....	12
3.1.2 Disipadores	12
3.1.3 Protocolo de carga	15
3.2 Resultados	15
3.2.1 Curvas de histéresis.....	15
3.2.2 Ductilidad acumulada	17
3.3 Conclusiones de las pruebas	18
4 MODELO NUMÉRICO EN ABAQUS.....	19
4.1 Modelado del disipador.....	19
4.1.1 Definición de las partes.....	19
4.1.2 Material.....	21
4.1.3 Secciones.....	23
4.1.4 Ensamble	23

4.1.5 Pasos.....	24
4.1.6 Salida de datos	25
4.1.7 Aplicación de la carga.....	25
4.1.8 Condiciones de frontera.....	25
4.2 Resultados	27
4.2.1 Representación gráfica de esfuerzos y deformaciones.....	27
4.2.2 Curva fuerza-desplazamiento	28
5 COMPARACIÓN DE RESULTADOS NUMERICOS Y EXPERIMENTALES	30
5.1 Prueba 1.....	30
5.2 Prueba 2.....	31
6 EVALUACIÓN DE PARÁMETROS DE INTERÉS	32
6.1 Efecto de la Longitud.....	32
6.1.1 Alargamiento.....	32
6.1.2 Acortamiento.....	35
6.1.3 Comparación de resultados	38
6.2 Efecto del Espesor.....	39
6.2.1 Doble Espesor	39
6.2.2 Triple Espesor.....	42
6.2.3 Comparación de resultados	45
7 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	46
7.1 Conclusiones.....	46
7.2 Recomendaciones	47
REFERENCIAS	48

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.0.1 Croquis de colocación del dissipador Dampo 1505.....	8
Figura.3.0.1. Arreglo Experimental	12
Figura 3.0.2. Dimensiones del dissipador ensayado en cm (vista lateral y frontal).....	13
Figura 3.0.3 Fotografías de los ensayos.....	14
Figura3.0.4. Curva ciclos de desplazamiento aplicados en la prueba 2	15
Figura 3.0.5. Curva carga-desplazamiento de la prueba 1.	16
Figura 3.0.6. Curvas carga-desplazamiento de la prueba 2.	16
Figura 3.0.7. Curva carga-desplazamiento prueba fatiga	17
Figura 3.0.8. Curva de ductilidad acumulada	18
Figura 4.1. Modelo de la placa dentada.....	19
Figura 4.2. Modelo de la placa ranurada	20
Figura 4.3. Mallado Placa Dentada.....	20
Figura 4.4. Mallado Placa Ranurada	21
Figura 4.5. Curva esfuerzo-deformación acero, según modelo de Park (2007)	22
Figura 4.6 Ensamble del modelo del dissipador Dampo 1505.....	23
Figura 4.7. Conexiones tipo “tie”	24
Figura 4.8. Amplitud de la carga relativa	25
Figura 4.9. Condición de frontera, empotramiento	26
Figura 4.10. Condición de frontera, desplazamiento.....	26
Figura 4.11. Espectro de esfuerzos	27
Figura 4.12. Espectro de la deformación plástica.....	28
Figura 4.13 Curva fuerza-desplazamiento.....	29
Figura 5.2. Curvas fuerza-desplazamiento de los modelos numérico y experimental para la Prueba 2	31
Figura 6.1. Dimensiones en mm, placa dentada alargada	32
Figura 6.2. Modelo dissipador con placa dentada alargada	33
Figura 6.3. Espectro de esfuerzos modelo con placa dentada alargada	34
Figura 6.4. Curva fuerza-desplazamiento del modelo con placa dentada alargada.....	34
Figura 6.5. Dimensiones en mm, placa dentada acortada	35
Figura 6.6. Modelo dissipador con placa dentada acortada.	36
Figura 6.7. Espectro de esfuerzos modelo con placa dentada acortada	37

Figura 6.8. Curva fuerza-desplazamiento del modelo con placa dentada acortada.....	37
Figura 6.9. Curvas fuerza-desplazamiento diferentes longitudes.	38
Figura 6.10. Dimensiones en mm, placa dentada y placa ranurada con doble espesor	39
Figura 6.11. Modelo disipador con placas con doble espesor de placas	40
Figura 6.12. Espectro de esfuerzos modelo con doble espesor de placas	41
Figura 6.13. Curva fuerza-desplazamiento modelo con doble espesor de placas	41
Figura 6.14. Dimensiones en mm, placa dentada y placa ranurada con triple espesor	42
Figura 6.15. Modelo disipador con placas con triple espesor.	43
Figura 6.16. Espectro de esfuerzos modelo con triple espesor de placas	44
Figura 6.17. Curva fuerza-desplazamiento modelo con triple espesor de placas	44
Figura 6.18. Curvas fuerza-desplazamiento diferentes espesores.	45

AGRADECIMIENTOS

Al Instituto de Ingeniería de la UNAM por el apoyo económico y académico que fue brindado durante la realización de esta tesis.

A Dampo Systems S.A. de C.V. por brindar información necesaria y permitirme trabajar con su disipador de energía sísmica.

Al Dr. Héctor Guerrero Bobadilla por el apoyo académico y moral que me brindó en este proyecto.

A mis padres, hermano, pareja, amigos y a todas las personas que hicieron posible realizar este trabajo.

RESUMEN

Esta tesis presenta el estado del arte sobre disipadores de energía sísmica, pruebas experimentales realizadas al disipador de energía sísmica denominado “Dampo 1505” en el Instituto de Ingeniería de la UNAM, un modelo no lineal del disipador al que se realizaron las pruebas experimentales y modelos no lineales con variaciones en parámetros de longitud y espesor. Se obtuvieron resultados que muestran el comportamiento del disipador ante variaciones de propiedades de interés.

Con base en los resultados obtenidos se presentan conclusiones y recomendaciones para investigaciones futuras.

ABSTRACT

This thesis presents the state of the art on seismic energy dissipators, experimental tests carried out on the Dampo 1505 device at the Engineering Institute of UNAM and a non-linear model of the dissipator. Non-linear models, varying length and thickness parameters, were developed to assess their effects on the dissipator's behavior

Based on the obtained results, conclusions and recommendations for future research are presented.

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Planteamiento del problema

Desde sus orígenes, la Ingeniería civil ha buscado que las estructuras tengan la mayor seguridad posible, especialmente en zonas de alta actividad sísmica, donde los daños estructurales, causados por sismos de gran magnitud, muestran que se requiere disipar la energía de éstos. Ello ha llevado a los ingenieros a buscar elementos estructurales y/o dispositivos que ayuden a que las estructuras tengan mayor seguridad. Los disipadores de energía sísmica han mostrado buenos resultados, por lo que son de gran interés para proteger a las estructuras (Black et al., 2004).

La función de los disipadores de energía sísmica es disipar la cantidad de energía que la estructura del edificio recibe por un sismo. Los disipadores pueden ser implementados tanto en proyectos nuevos, como en edificaciones ya erguidas, en las cuales funcionan como refuerzo (Oviedo, 2013).

El dispositivo que se analiza en esta tesis es de tipo hysterético. Es denominado Dampo 1505 de desarrollo y patente en México. Este dispositivo tiene un comportamiento no lineal estable, por lo cual, es ideal para proteger estructuras en zonas sísmicas. Éste se instala en línea con un contraviento de conexión como se muestra en la Figura 1.1 (Dampo Systems, 2020).

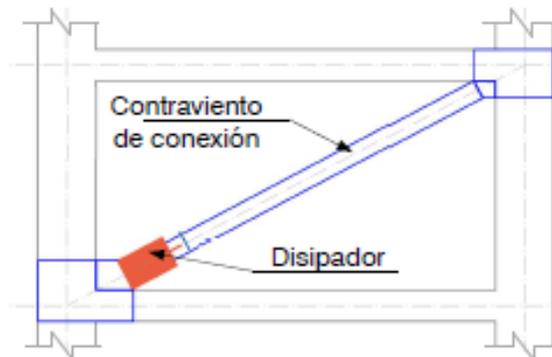


Figura 1.0.1 Croquis de colocación del disipador Dampo 1505

1.2 Justificación

La seguridad estructural siempre ha sido una prioridad en la Ingeniería Civil. Debido a esto, es de vital importancia implementar y desarrollar nuevas tecnologías que mejoren la

seguridad estructural. En México, actualmente se están implementando nuevas tecnologías, especialmente sismorresistentes.

El estudio de la respuesta de estas tecnologías sismorresistentes es una de las principales opciones para optimizarlas y conocer con detalle su comportamiento. El desarrollo de modelos numéricos resulta de gran utilidad, pues, al realizarse de manera correcta, se puede conocer el comportamiento de dispositivos de manera aceptable sin la necesidad de realizar pruebas en laboratorio.

Ya que el disipador histerético Dampo 1505 es de patente mexicana, es necesario realizar investigación acerca de éste para poder evaluar su comportamiento y el de sus posibles variantes.

En esta tesis, se presentan resultados experimentales de un disipador Dampo 1505 ensayado en laboratorio. Se desarrollo un modelo numérico y se evalúan variaciones físicas de éste. El objetivo es conocer los efectos de esas variaciones y se plantean conclusiones que puedan ser de utilidad en aplicaciones prácticas y en investigaciones posteriores.

1.3 Objetivos y alcance

El objetivo general de esta tesis es desarrollar un modelo de elementos finitos de un disipador de energía sísmica para evaluar los que tiene la variación de diferentes propiedades físicas en su comportamiento.

Los objetivos particulares son:

- Desarrollar un modelo de elementos finitos que presente un comportamiento similar al de un disipador ensayado en laboratorio.
- Desarrollar modelos con variaciones físicas del disipador, para conocer los efectos en si comportamiento.
- Generar conclusiones respecto al efecto de las variaciones físicas del disipador.
- Proponer recomendaciones para aplicaciones prácticas y estudios posteriores.

Los alcances de esta tesis incluyen el desarrollo de un modelo de elementos finitos del disipador Dampo 1505, dos modelos que evalúan el efecto de la longitud de sus placas, dos modelos que evalúan el efecto del espesor de sus placas y el análisis y conclusiones sobre los resultados.

2. REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE

Black et al. (2004) determinaron, después de realizar pruebas a carga axial, que los disipadores histeréticos del tipo Contraventeos restringidos al Pandeo (CRP): (1) cumplen apropiadamente con predicciones teóricas de estabilidad estructural; (2) muestran capacidad inelástica ante grandes demandas sísmicas. Los autores determinaron que la configuración más crítica se da con el pandeo torsional plástico del núcleo del contraventeo. Por último, demostraron que los CRP presentan un comportamiento dúctil estable.

Guerrero et al. (2016), después de realizar diferentes pruebas en una mesa vibratoria y de vibración libre de un modelo a escala de 4 niveles con y sin contraventeos, determinaron que: (1) la inclusión de CRPs no sólo aumenta la rigidez también aumenta el amortiguamiento de la estructura, (2) el desplazamiento máximo y distorsión de entrepiso se reducen en más del 50%, la velocidad y aceleración máximas se redujeron en más de un 25%. Por otro lado, dado que la intensidad de Arias (medida de contenido de energía) fue 8 veces menor en el caso del modelo con CRPs los daños causados a edificaciones con CRPs serán considerablemente menores, especialmente en la zona lacustre del valle de México. Finalmente, los autores comentaron que no fueron perceptibles deformaciones permanentes en el modelo con CRPs, incluso después de ser retirados.

Guerrero et al. (2018) realizaron experimentaciones en estructuras de concreto reforzado prefabricado con y sin CRPs, además de realizar pruebas a carga axial de los CRPs individualmente. De los resultados obtenidos concluyeron: (1) la resistencia individual de los CRPs es ligeramente mayor a compresión que a tensión; (2) la implementación de CRPs en la estructura de concreto reforzado prefabricado mejoró el amortiguamiento significativamente tanto en bajas como en altas intensidades sísmicas; (3) los CRPs reducen considerablemente las afectaciones en la resistencia de las estructuras de concreto reforzado prefabricado; (4) los desplazamientos máximos y relativos en el modelo sin CRPs eran del doble que en el modelo equipado con CRPs, mientras que las velocidades y aceleraciones se mantuvieron similares en ambos modelos; (5) el modelo al que se le implementaron CRPs después de ser probado presentó un periodo de vibrar menor y desplazamientos mayores que el modelo con CRPs, por lo que se espera que las estructuras nuevas y las rehabilitadas tendrán un comportamiento diferente, dependiendo del daño previo.

Tremblay et al. (2006) realizaron pruebas en seis CRPs con dos longitudes de núcleo (1001 y 2483 mm) y dos diferentes mecanismos de restricción al pandeo (tubos rellenos de concreto y tubos huecos). Se aplicaron cargas cuasi estáticas cíclicas y cargas sísmicas. Además, se realizaron las mismas pruebas a un contraventeo convencional, para comparar resultados. Se obtuvieron las siguientes conclusiones: (1) las dos muestras con un tubo de acero relleno de concreto presentaron un comportamiento elástico predecible y una respuesta inelástica dúctil y estable sin ruptura, (2) el CRP corto presentó una mayor resistencia tanto a compresión como a tensión, en ambas longitudes la resistencia a compresión fue ligeramente mayor, los CRPs rellenos de concreto presentaron un comportamiento histerético mejor, se debe mantener en constante monitoreo la unión entre el contraventeo y el mecanismo de restricción al pandeo, para evitar esfuerzos por fricción y tener una respuesta uniforme en el CRP.

Merritt et al. (2003) realizaron pruebas en seis especímenes aislados de CRPs. Después de analizar los resultados concluyeron que: (1) bajo amplitudes estándar los CRPs tienen un buen comportamiento y no presentan fallas; (2) todos los especímenes fallaron en algún punto de la prueba de fatiga, presentando la fractura en la parte media del elemento y con un comportamiento histerético estable; (3) previo a la fractura todos los especímenes lograron una rotación de hasta 0.027 radianes en la dirección transversal; (4) el factor de ajuste por tensión (w) como función de la deformación axial del CRP puede aproximarse por una función lineal y (5) el factor de ajuste por compresión (β) como función de la deformación axial tiene un comportamiento cuasi lineal.

Según los resultados de las pruebas que se han realizado con anterioridad, se puede notar que los disipadores histeréticos tienen un comportamiento histerético estable, con gran capacidad de disipación.

En comparación con los sistemas convencionales, los disipadores histeréticos presentan comportamiento elástico predecible y respuesta inelástica estable, por lo que soportan mayores demandas sísmicas.

En esta tesis se evalúa el comportamiento del disipador Dampo 1505. Se realiza un modelo de elementos finitos y se evalúan variaciones dimensionales en su diseño, con la finalidad de evaluar los efectos en su comportamiento.

3. PRUEBAS EXPERIMENTALES

Este capítulo presenta resultados de pruebas experimentales realizadas en 2019 por el Instituto de Ingeniería de la UNAM para la Empresa Dampo Systems SA de CV (Instituto de Ingeniería, 2019).

El experimento constó de tres pruebas de carga cíclica reversible, una en el rango elástico-lineal, una incremental y la última de fatiga.

3.1 Configuración experimental

3.1.1 Arreglo experimental

Para las tres pruebas se utilizó un marco de carga con un actuador MTS, fijados a una losa de reacción. El disipador se colocó entre el actuador y una placa de conexión sujeta a la losa, como se puede observar en la Figura 3.1.

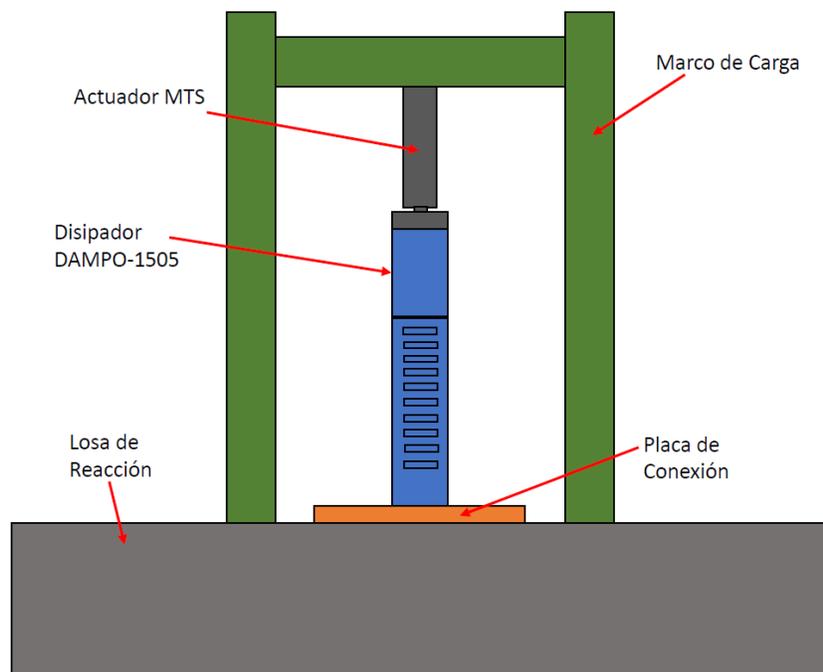


Figura.3.0.1. Arreglo Experimental

3.1.2 Disipadores

El Dampo 1505 está compuesto por tres placas ranuradas, dos laterales apoyadas y una central, unidas por nueve placas dentadas, como se puede ver en la Figura 3.2.

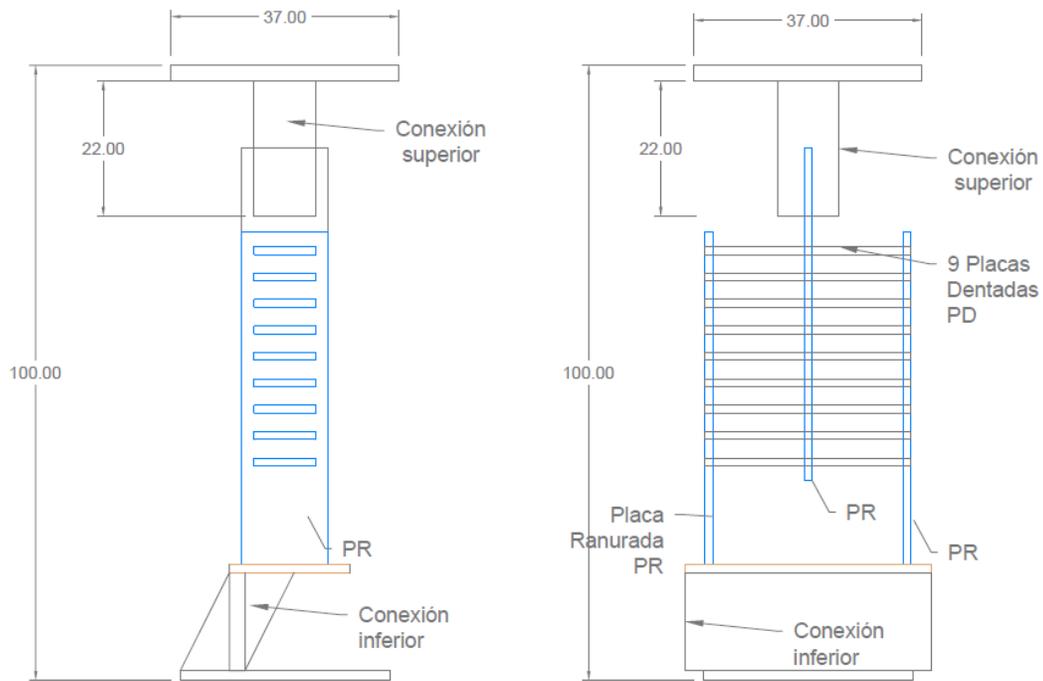


Figura 3.0.2. Dimensiones del disipador ensayado en cm (vista lateral y frontal)

En la Figura 3.3 se puede observar imágenes tomadas durante pruebas en laboratorio. Las fotografías se tomaron en: (1) estado sin deformación, (2) estado de deformación máxima en compresión y (3) estado de deformación máxima en tensión.



Figura 3.0.3 Fotografías de los ensayos

3.1.3 Protocolo de carga

Se realizaron tres pruebas, cada una con diferente protocolo de carga. El primero con desplazamientos de ± 2.5 mm, el segundo con ciclos iguales a los mostrados en la Figura 3.4 y el último a ciclos con deformaciones máximas, para evaluar la fatiga del disipador.

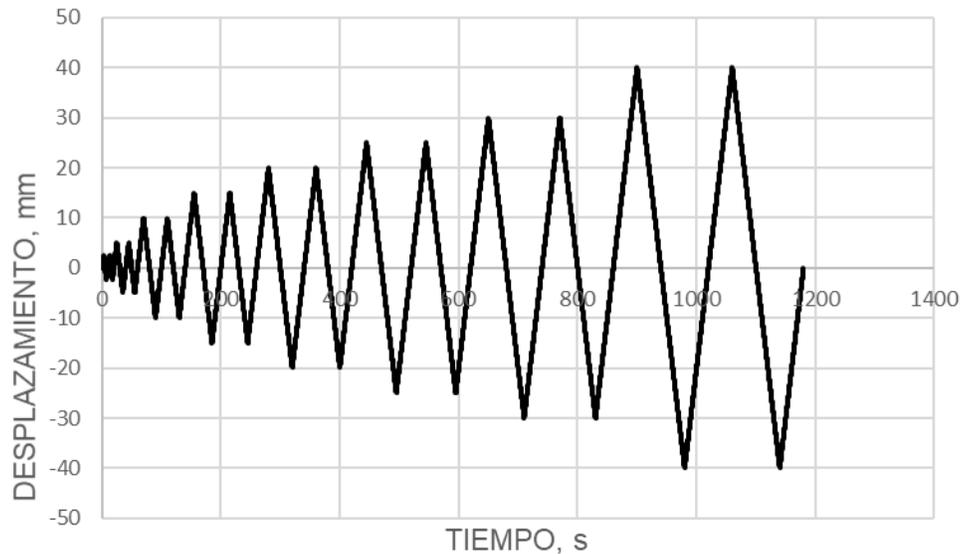


Figura3.0.4. Curva ciclos de desplazamiento aplicados en la prueba 2

3.2 Resultados

3.2.1 Curvas de histéresis

Mientras las cargas se medían con una celda instalada en el actuador, los desplazamientos se midieron con un transductor de desplazamientos.

En el primer protocolo de carga (± 2.5 mm) utilizado en la primera prueba, el disipador presentó un comportamiento elástico-lineal, como se puede observar en la Figura 3.5.

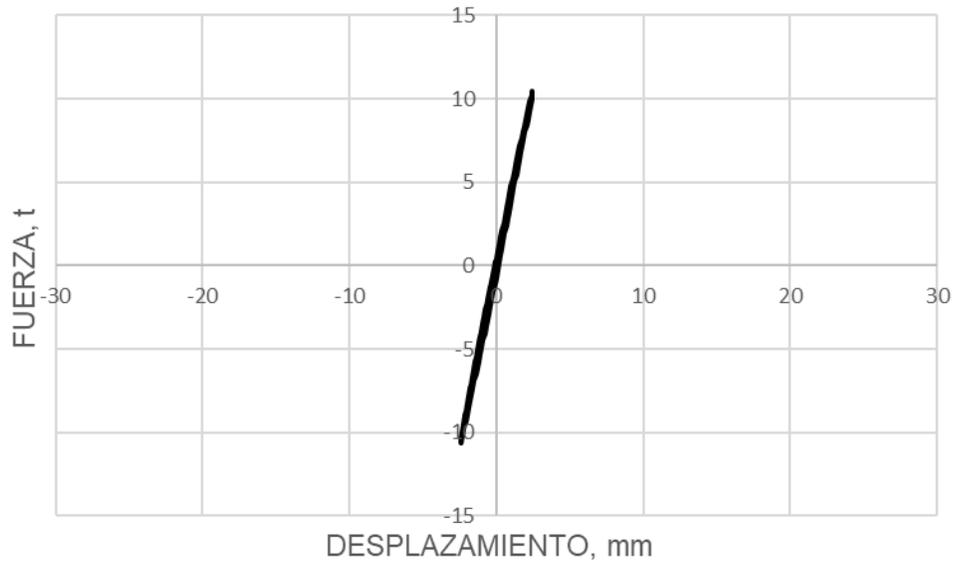


Figura 3.0.5. Curva carga-desplazamiento de la prueba 1.

En la segunda prueba, el dissipador presentó comportamiento inelástico estable, llegando a un desplazamiento máximo de 40 mm, lo que representa una ductilidad de desplazamiento de 8, lo que se puede deducir de la Figura 3.6.

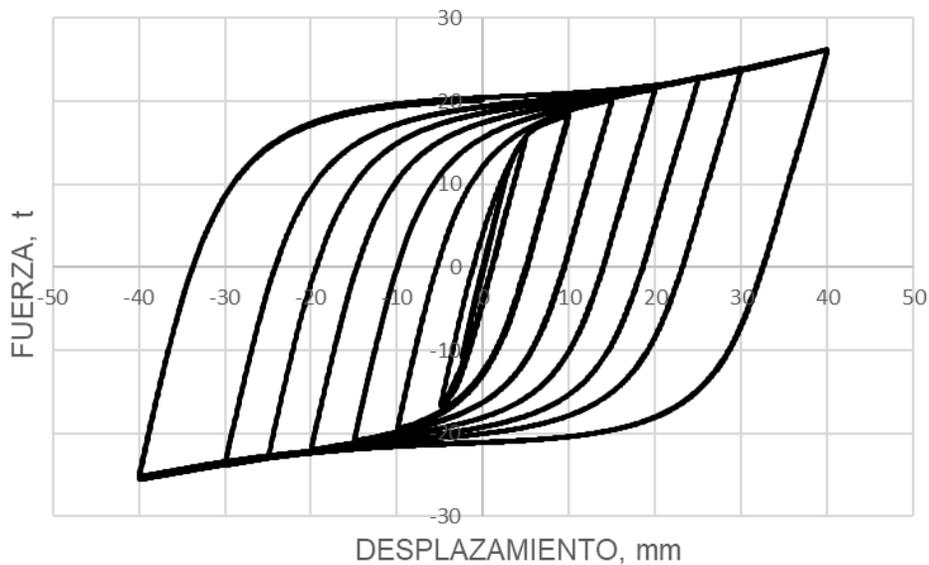


Figura 3.0.6. Curvas carga-desplazamiento de la prueba 2.

La ductilidad de desplazamiento (μ_{Δ}) es la relación de desplazamiento máximo entre el de fluencia. Este concepto es muy útil para el control del daño. La ductilidad de desplazamiento se expresa como:

$$\mu_{\Delta} = \frac{\Delta_u}{\Delta_y} \quad (1)$$

Donde:

μ_{Δ} - es la ductilidad de desplazamiento.

Δ_u - es el desplazamiento máximo.

Δ_y -es el desplazamiento de fluencia.

La ductilidad indica la capacidad de absorción de energía fuera del intervalo elástico; es una propiedad básica en el diseño sismo resistente pues al absorber la energía se evita el colapso y se salvan vidas (González, 2014).

Finalmente, en la prueba de fatiga el disipador, éste logro desarrollar tres ciclos con deformación máxima, de manera estable, antes de presentar una degradación mayor al 20% de su capacidad de carga, como se puede observar en la Figura 3.7.

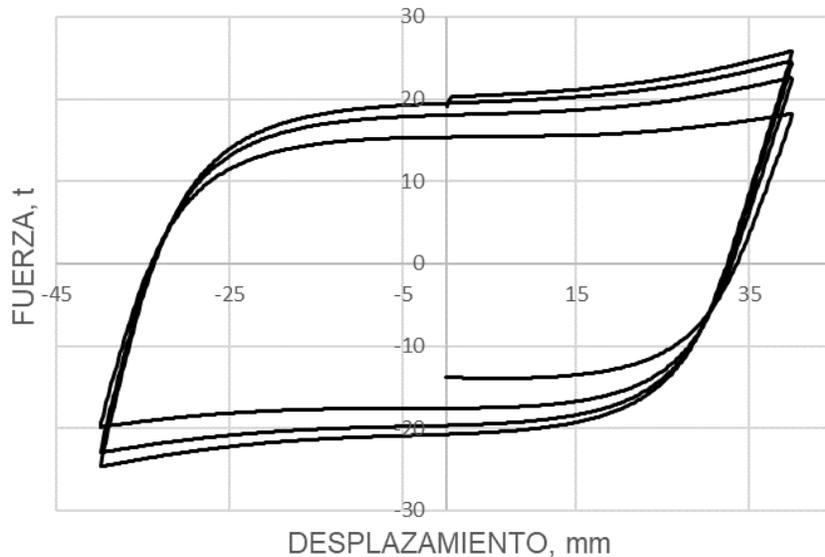


Figura 3.0.7. Curva carga-desplazamiento prueba fatiga

3.2.2 Ductilidad acumulada

La capacidad de disipar energía del disipador se puede medir por su capacidad de ductilidad acumulada. En la Figura 3.8 se puede observar la ductilidad acumulada de las pruebas 2 y

3, así como una línea de referencia que indica la demanda máxima esperada de un sismo muy intenso.

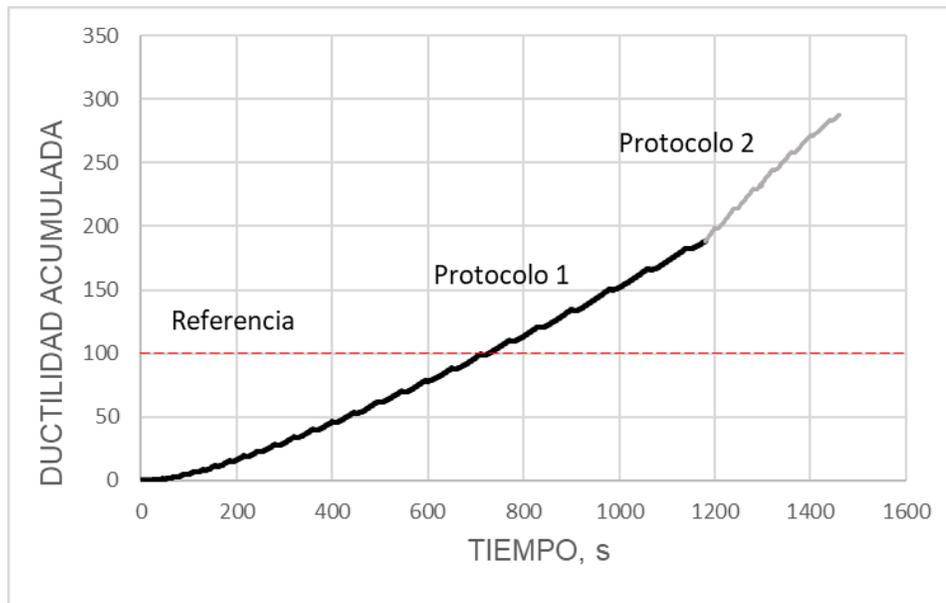


Figura 3.0.8. Curva de ductilidad acumulada

3.3 Conclusiones de las pruebas

Según los resultados observados en las pruebas experimentales de carga cíclica reversible aplicada de manera cuasi-estática en el disipador de energía sísmica tipo “Dampo 1505” se pudo observar que:

- El disipador tuvo un comportamiento, durante el primer protocolo de prueba, elástico-lineal, con desplazamientos de ± 2.5 mm.
- Durante el segundo protocolo de carga, el disipador tuvo un comportamiento inelástico estable, logrando deformaciones de hasta 40 mm y ductilidad de desplazamiento de 8.
- El disipador logró tres ciclos completos de carga a máxima deformación, antes de perder el 20% de su capacidad de carga, en el tercer protocolo de carga.
- La capacidad de ductilidad máxima como medida de disipación de energía, fue cercana a tres veces la demanda de un sismo muy intenso.

En general, el disipador de energía sísmica tipo “Dampo 1505” presentó un buen comportamiento inelástico estable con una gran capacidad de disipación de energía.

4 MODELO NUMÉRICO EN ABAQUS

Abaqus FEA es el conjunto de programas de simulación que aplican el método de elementos finitos para realizar cálculos estructurales estáticos, lineales y no lineales, dinámicos, simulación de impactos, contacto de sólidos, térmicos, acoplamientos acústico-estructurales, mecánica de fluidos, entre otros.

El conjunto lo conforman cuatro productos: Abaqus/CAE (*Complete Abaqus Environment*), Abaqus/CFD (*Computational Fluid Dynamics*), Abaqus/Standard y Abaqus/Explicit. Para el análisis de esta tesis se utilizó Abaqus/CAE.

4.1 Modelado del disipador

4.1.1 Definición de las partes

Se define la geometría de cada elemento del disipador. Primero, se desarrolló la placa dentada, definiendo su geometría y posteriormente su espesor. Finalmente, se crea una representación de la pieza, como se observa en la Figura 4.1.

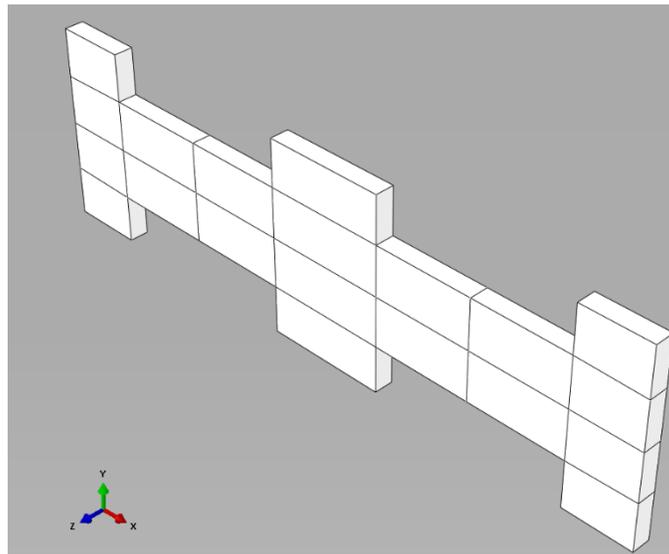


Figura 4.1. Modelo de la placa dentada

Después, se realizó el modelo de la placa ranurada siguiendo el mismo procedimiento de la placa dentada. (Figura 4.2)

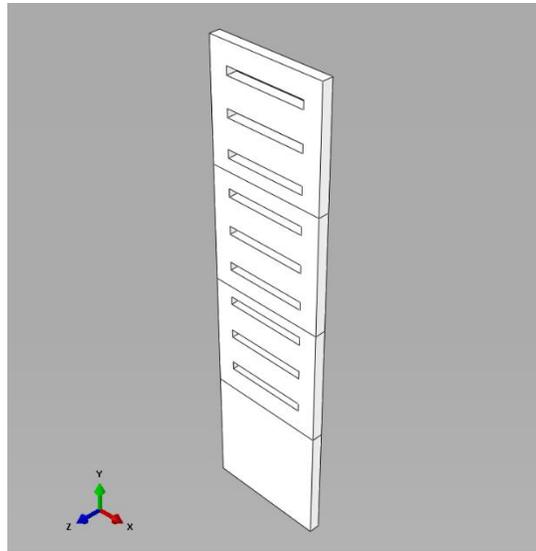


Figura 4.2. Modelo de la placa ranurada

Posteriormente, se realizó una discretización de cada elemento. En ambas placas se utilizó el mismo tamaño de malla, de 5 mm, asegurando un ensamble de las piezas estable. El mallado se puede observar en las figuras 4.3 y 4.4.

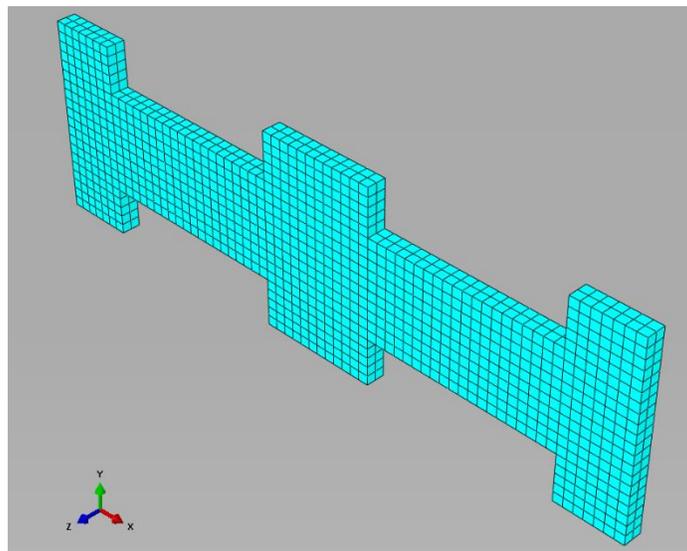


Figura 4.3. Mallado Placa Dentada

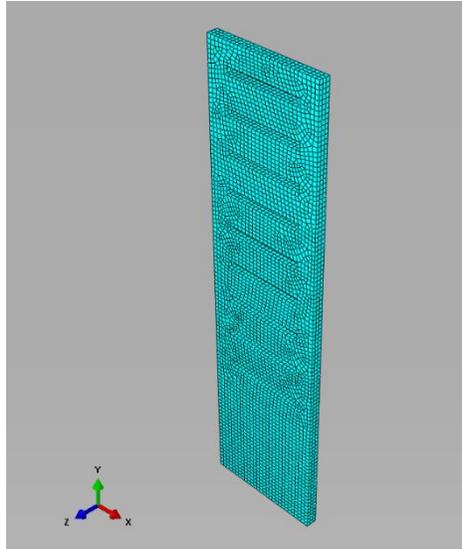


Figura 4.4. Mallado Placa Ranurada

4.1.2 Material

Una vez definidas las partes del disipador, se especifica el material. Se consideró una densidad de $0.00785 \frac{kg}{cm^3}$, un módulo de Young de $2,100,000 \frac{kg}{cm^2}$ y un coeficiente de Poisson de 0.3.

Las propiedades mecánicas del material se obtuvieron de valores experimentales obtenidos por el Instituto de Ingeniería (2019). Esta experimentación se llevó a cabo en tres muestras, se obtuvieron los siguientes resultados de esfuerzo de fluencia esperado y último esperado:

$$f_{ye} = 3774 \frac{kg}{cm^2} \text{ y } f_{ue} = 5013 \frac{kg}{cm^2}$$

A partir de estos valores se utilizó el modelo propuesto por Park (2007) el cual considera tres secciones en la curva de esfuerzo deformación: (1) elástico-lineal, (2) meseta de endurecimiento y (3) endurecimiento. El comportamiento de la curva varía según la zona, debido a esto Park (2007) propuso las siguientes ecuaciones para cada una (Calvi, 2007):

- Elástico Lineal $0 \leq \varepsilon_s \leq \varepsilon_y$ $f_s = E_s \varepsilon_s \leq f_y$ (2)

- Meseta de endurecimiento $\varepsilon_y \leq \varepsilon_s \leq \varepsilon_{sh}$ $f_s = f_y$ (3)

- Endurecimiento $\varepsilon_{sh} \leq \varepsilon_s \leq \varepsilon_{su}$ $f_s = f_u - (f_u - f_y) \left(\frac{\varepsilon_{su} - \varepsilon_s}{\varepsilon_{su} - \varepsilon_{sh}} \right)^2$ (4)

Donde:

ε_s - es la deformación unitaria en un punto específico de la curva.

ε_y - es la deformación unitaria en el punto de fluencia, con un valor de 0.0018.

ε_{sh} - es la deformación unitaria en la cual termina la meseta de endurecimiento con un valor típico de 0.008.

ε_{su} - es la deformación unitaria última con un valor experimental de 0.112.

f_s - es el esfuerzo en un punto específico de la curva.

f_y - es el esfuerzo de fluencia con un valor experimental de $3774 \frac{kg}{cm^2}$.

f_u - es el esfuerzo último con un valor experimental de $5013 \frac{kg}{cm^2}$.

E_s - es el Módulo de elasticidad del acero, con un valor típico de $2100000 \frac{kg}{cm^2}$.

La curva esfuerzo-deformación, con los valores obtenidos de manera experimental, se muestra en la Figura 4.5.

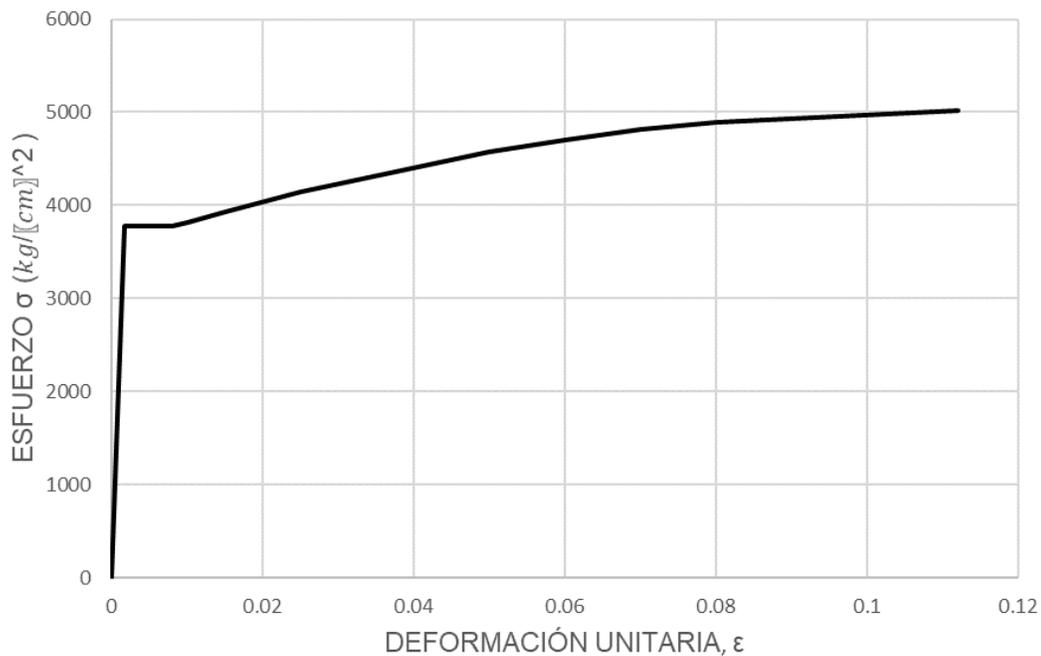


Figura 4.5. Curva esfuerzo-deformación acero, según modelo de Park (2007)

Una vez obtenida la curva característica del acero se introducen los valores necesarios a Abaqus (2020).

4.1.3 Secciones

Se define el tipo de sección que tendrá cada elemento del disipador. Como todos los componentes son del mismo material y éste es homogéneo en toda la pieza, se define una sección de tipo continua, homogénea y sólida.

4.1.4 Ensamble

Una vez que cada parte tiene asignada su sección y material, se ensamblan todas las partes. Para esto, primero se unió una de las placas ranuradas laterales con las nueve placas dentadas. Después, se ensambló la segunda placa ranurada lateral y, por último, se unió la placa ranurada central a los demás elementos, como se puede ver en la Figura 4.6.

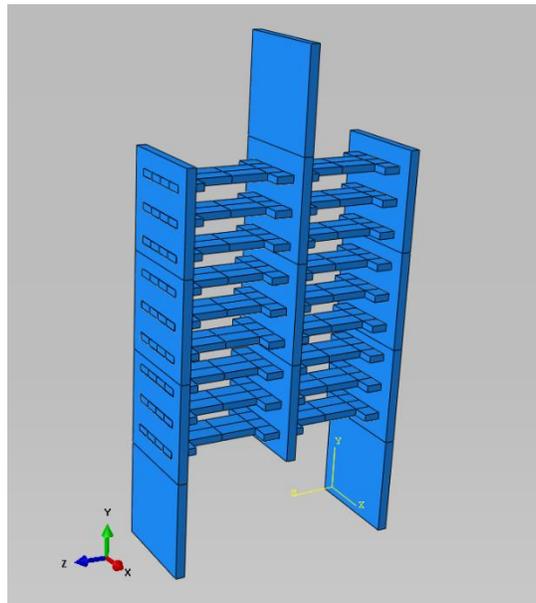


Figura 4.6 Ensamble del modelo del disipador Dampo 1505

Una vez ensamblado el dispositivo, se define la interacción entre las piezas del disipador. Para esto, se utilizó el tipo de unión "tie", la cual une las piezas "perfectamente" y permite que el modelo trabaje como un conjunto. Esta interacción debe definirse en todas las superficies de conexión, como se puede observar esquemáticamente en la Figura 4.7.

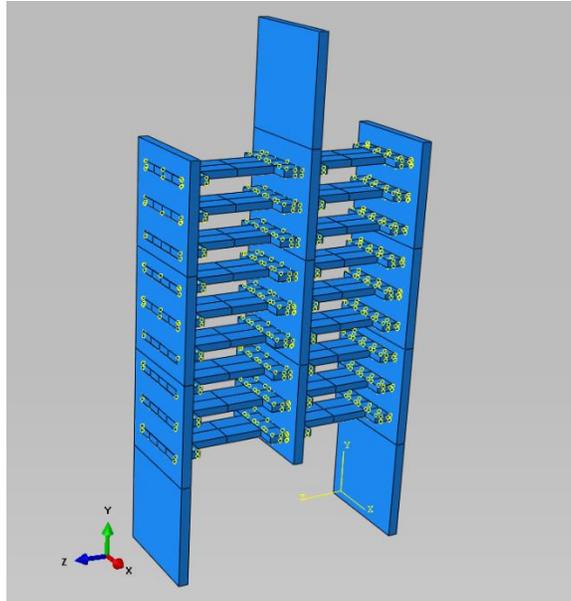


Figura 4.7. Conexiones tipo "tie"

4.1.5 Pasos

Ya que el ensamble del dispositivo se definió, se establecen los pasos que realizará el programa para el análisis del disipador. Por defecto Abaqus nos presenta un paso inicial, en el cual se asignan las condiciones iniciales al modelo, incluyendo las condiciones de soporte.

Posteriormente, se definió un paso para aplicar el desplazamiento. En este paso se estableció una duración de 60 segundos con un incremento máximo de 60 segundos y uno mínimo de 6×10^{-5} .

En general los problemas de mecánica de sólidos pueden resolverse con un análisis lineal, pues suponen deformaciones infinitesimales y que éstas se componen de tensiones en funciones de primer grado. Considerando que el contorno de las secciones permanece constante.

Existen tres causas por las que los problemas requieren análisis no lineal: (1) no linealidad geométrica, (2) no linealidad por comportamiento de material y (3) por condiciones del contorno. Para los 3 casos la solución por métodos analíticos resulta compleja o inexistente, por lo tanto, es necesario recurrir a métodos numéricos (Beléndez, 2001).

En el análisis se tomó no linealidad geométrica y no linealidad por comportamiento de material.

4.1.6 Salida de datos

Ya que Abaqus (2020) es un programa que permite analizar una amplia variedad de simulaciones, se deben definir los datos de salida para evitar obtener resultados que no sean de utilidad.

En el modelo únicamente se obtuvieron resultados de esfuerzos, los componentes de la deformación plástica, traslaciones y rotaciones en cada eje y las fuerzas y momentos de reacción.

4.1.7 Aplicación de la carga

En esta sección se definió el incremento del desplazamiento que aplicó el programa al modelo, en el tiempo. Esta amplitud consta de dos partes, la primera es el tiempo y la segunda el valor de la amplitud, el cual es el coeficiente del desplazamiento a lo largo del tiempo. La forma de la amplitud relativa de la carga se muestra en la Figura 4.8.

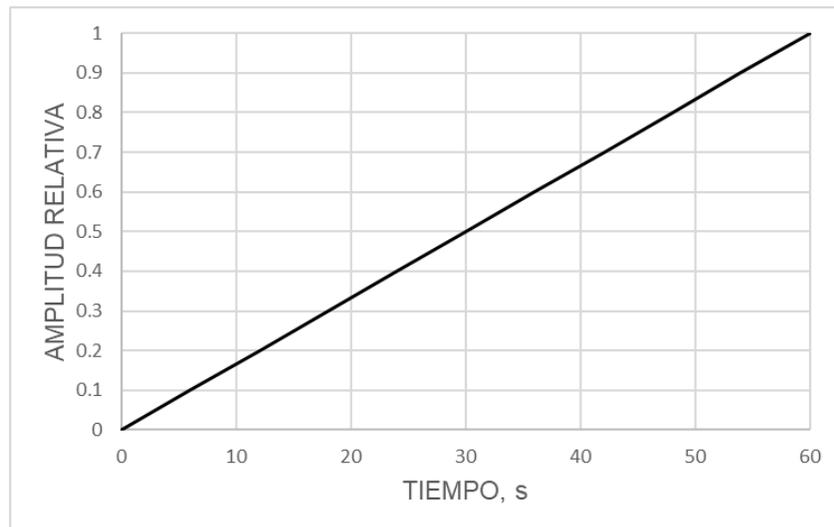


Figura 4.8. Amplitud de la carga relativa

4.1.8 Condiciones de frontera

La primera condición de frontera que se definió es el empotramiento del dispositivo, aplicada en el paso inicial del modelo. Ello se asignó en la base de las dos placas ranuradas

laterales con desplazamientos y rotaciones iguales a 0 en todas las direcciones, como se observa esquemáticamente en la Figura 4.9.

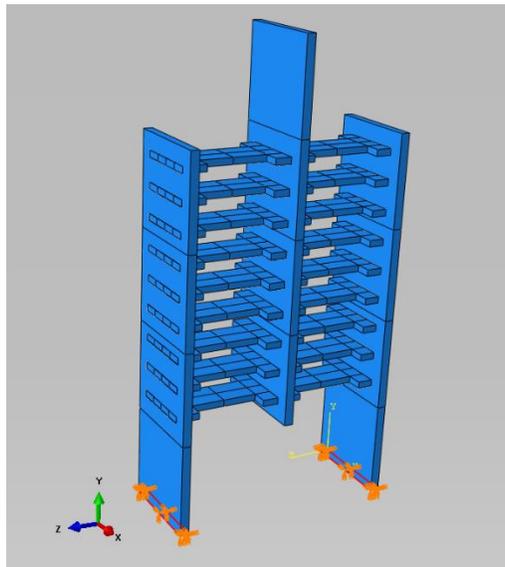


Figura 4.9. Condición de frontera, empotramiento

Por último, se definió la condición de desplazamiento del modelo, aplicada en el paso posterior al inicial. En esta condición se definió un desplazamiento en la parte superior de la placa ranurada central, de tipo distribución uniforme, de 4 cm, en la dirección del eje “y” y tomando como base de aplicación la amplitud de la Figura 4.8. La aplicación de esta condición se muestra en la Figura 4.10.

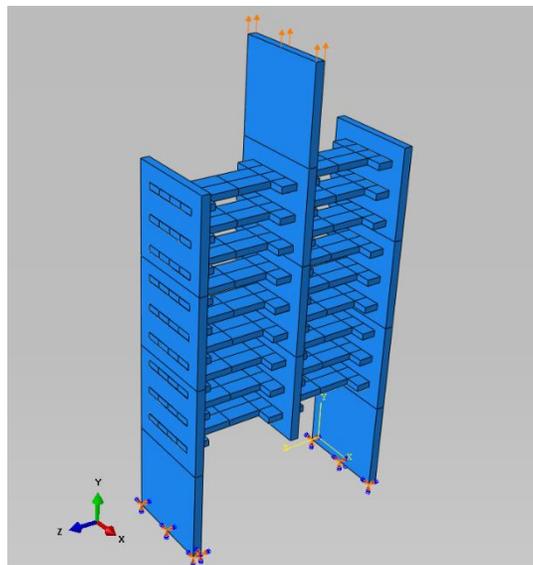


Figura 4.10. Condición de frontera, desplazamiento

La Figura 4.12 muestra la distribución de la deformación plástica del dispositivo. La deformación plástica mayor se presenta en los bordes de la conexión entre la placa dentada y la placa ranurada, con un valor de 0.1059. Este valor es la deformación plástica mayor que se presentó en el dispositivo, por lo que se tomó como parámetro para definir la deformación máxima que se puede acomodar en este. En este sentido, se tomó como criterio de falla del disipador.

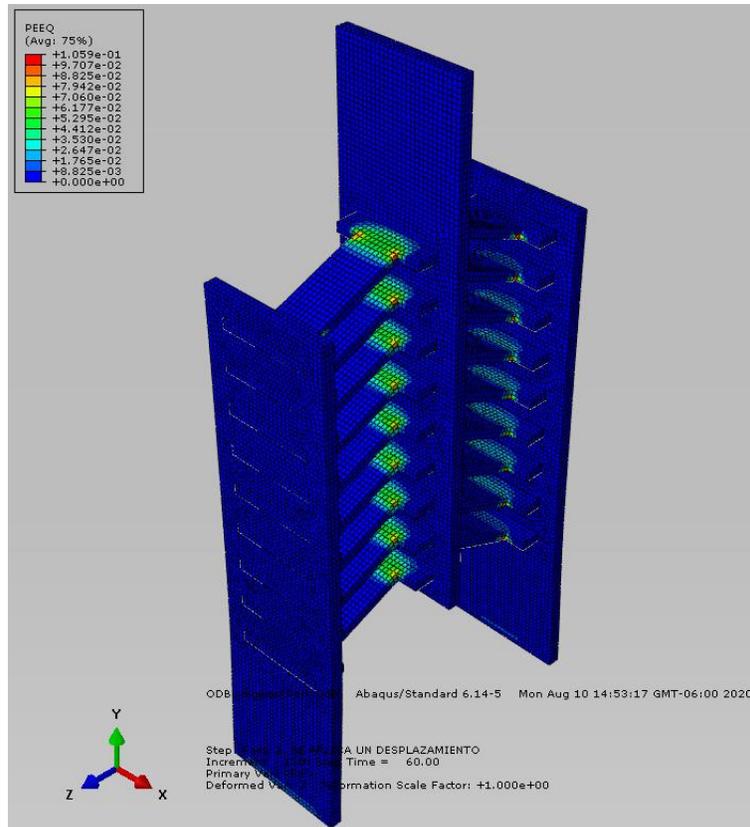


Figura 4.12. Espectro de la deformación plástica

4.2.2 Curva fuerza-desplazamiento

La curva fuerza-desplazamiento del modelo se presenta en la Figura 4.13. Se puede observar que las resistencias de fluencia y máxima fueron de 17 t y 25.35 t respectivamente. De manera similar, los desplazamientos de fluencia y máximo fueron de 0.47 cm y 4 cm respectivamente. Por lo que se obtiene una ductilidad de desplazamiento del disipador igual a 8.51.

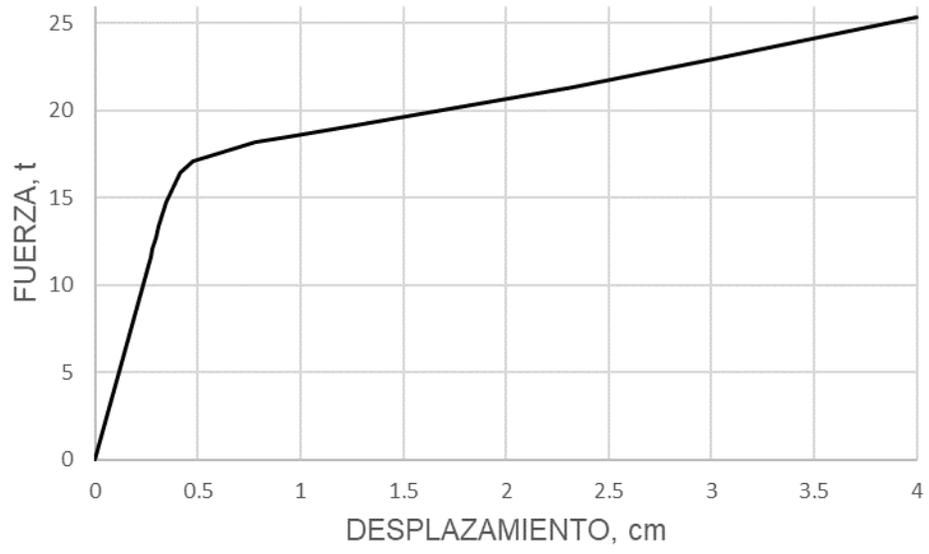


Figura 4.13 Curva fuerza-desplazamiento

5 COMPARACIÓN DE RESULTADOS NUMERICOS Y EXPERIMENTALES

Una vez obtenidos los resultados del modelo del disipador de energía Dampo 1505 y con los resultados obtenidos de manera experimental por el Instituto de Ingeniería (2019) mostrados en el capítulo 2, se puede realizar una comparación de ambos resultados para dar validez al modelo numérico del dispositivo.

Se recuerda que en las pruebas experimentales, se realizaron tres pruebas. La primera con un desplazamiento de ± 2.5 mm. La segunda con desplazamientos de hasta 40mm. Y la tercera prueba, que fue para estudiar la fatiga, llego igual hasta ± 40 mm.

En las siguientes secciones se comparan los resultados de las primeras dos pruebas. Dado que no se hizo un modelo con carga cíclica, la tercera prueba no se compara con los resultados del modelo.

5.1 Prueba 1

En esta prueba, el disipador presentó un comportamiento elástico lineal. Este comportamiento se presentó en las pruebas experimentales y en el modelo del disipador, como se puede observar en la Figura 5.1. Se puede apreciar que el comportamiento de ambos es similar.

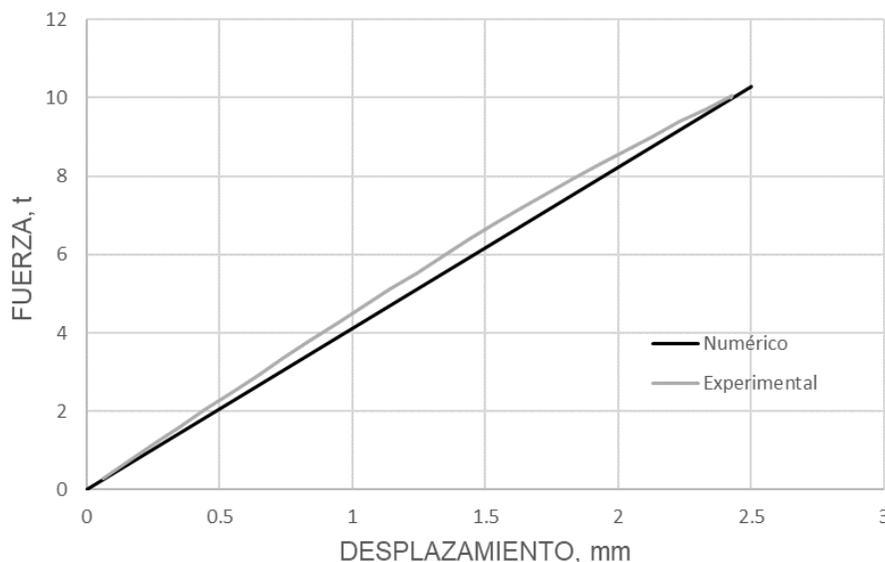


Figura 5.1 Curvas fuerza-desplazamiento de los modelos numérico y experimental para la Prueba 1

5.2 Prueba 2

En esta prueba el disipador presentó plasticidad estable con una ductilidad de desplazamiento de 8, como se puede observar en la Figura 5.2. Claramente, se puede observar un comportamiento muy similar entre la curva numérica y la envolvente de la curva experimental.

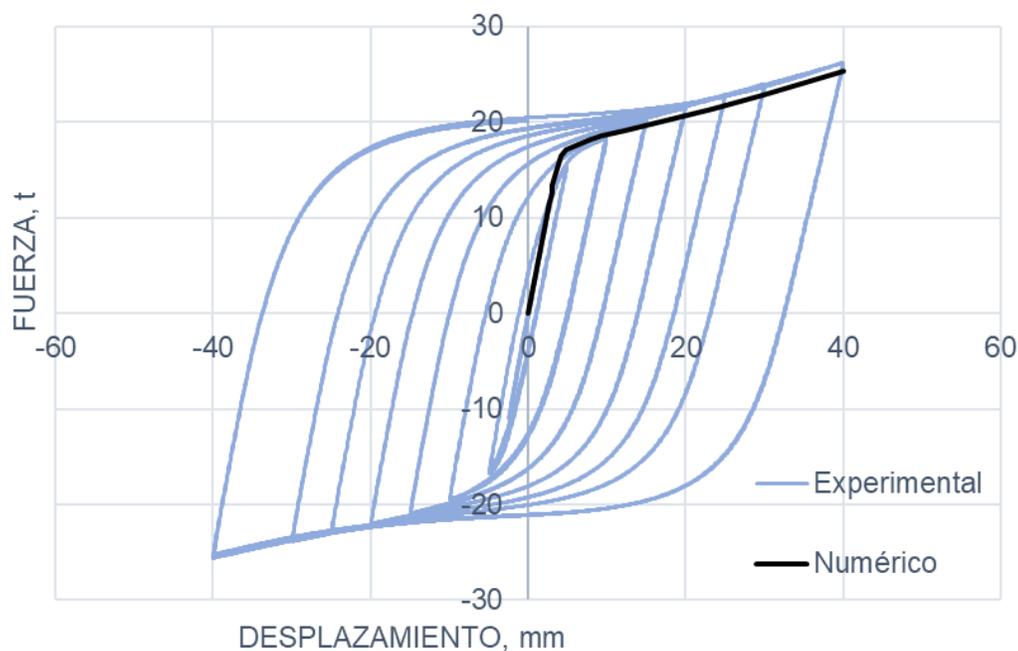


Figura 5.2. Curvas fuerza-desplazamiento de los modelos numérico y experimental para la Prueba 2

De la Figura 5.2 se puede observar el comportamiento del disipador está bien representado por el modelo numérico. Esto asegura que el comportamiento del material que se calculó por el modelo de Park (2007) es similar al que presentó el acero utilizado en el disipador ensayado.

Ya que los resultados del modelo del disipador son similares a los que se presentaron en las pruebas experimentales se puede decir que el modelo numérico es adecuado para continuar con la evaluación de otros parámetros de interés.

6 EVALUACIÓN DE PARÁMETROS DE INTERÉS

Se realizaron cuatro modelos del disipador Dampo 1505 con variaciones en parámetros físicos, con la finalidad de conocer el efecto que éstos tienen en su comportamiento.

Ya que las placas dentadas son las piezas que presentan los mayores esfuerzos, las variaciones se realizaron principalmente en éstas. En el caso la evaluación del efecto del espesor se requirió modificar la placa ranurada, para que esta tuviera la capacidad requerida.

6.1 Efecto de la Longitud

6.1.1 Alargamiento

Se duplicó la longitud de las zonas no empotradas de la placa dentada, aumentando de 100 mm a 200 mm. Todas las demás dimensiones se mantuvieron iguales, como se puede observar en la figura 6.1.

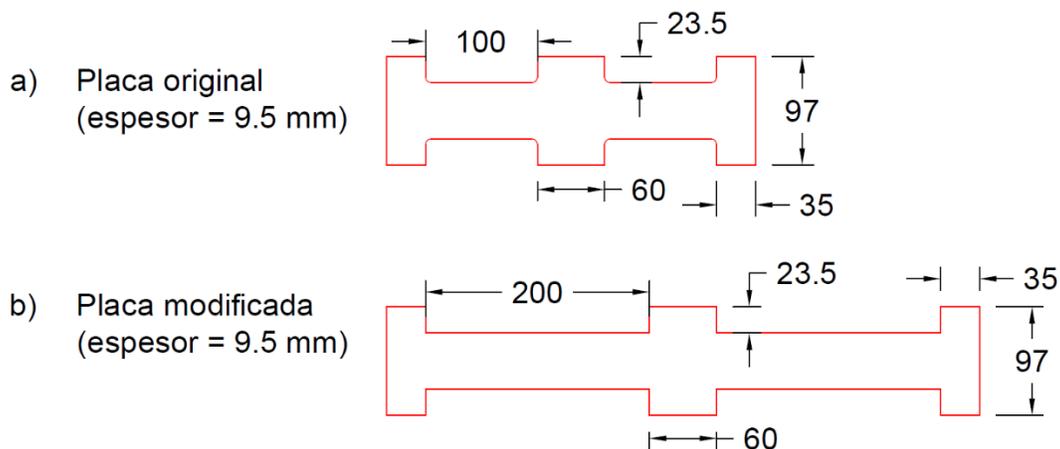


Figura 6.1. Dimensiones en mm, placa dentada alargada

El modelado se realizó siguiendo el mismo procedimiento que se implementó en el modelo original del dispositivo. En la Figura 6.2 se puede observar el modelo 3D del disipador con la placa dentada alargada. También se puede observar que no se realizaron modificaciones a la placa ranurada.

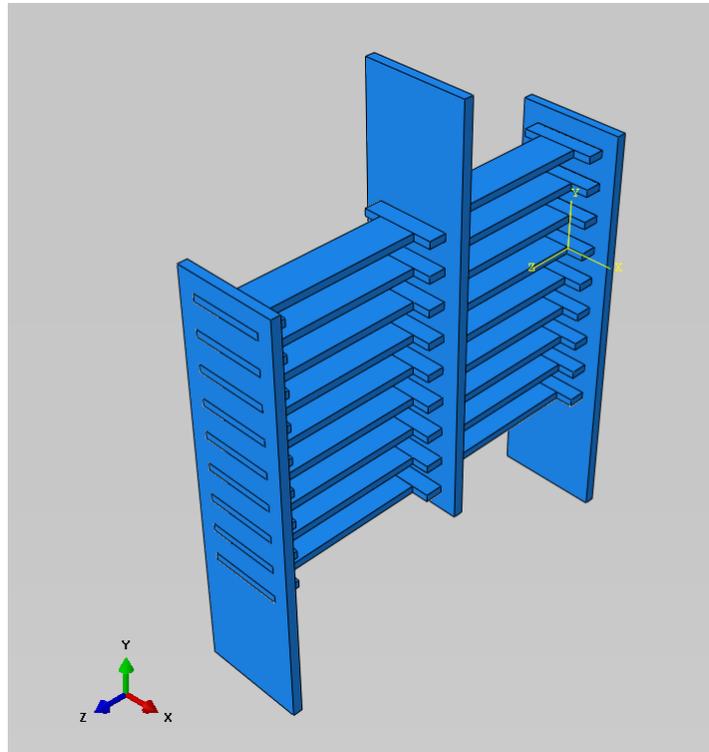


Figura 6.2. Modelo disipador con placa dentada alargada

Utilizando la deformación plástica máxima de 0.1059 como parámetro para determinar la falla, se realizaron iteraciones para llegar a una deformación plástica cercana a este valor, con un error de $\pm 5\%$. Con un desplazamiento vertical de 8 cm en la placa ranurada central se presenta una deformación plástica de 0.1090 (con un error del 2.9%) por lo que se interpretó que a este desplazamiento se presentó la falla.

En la Figura 6.3 se pueden observar los esfuerzos que presenta el modelo para un desplazamiento de 8 cm. También se puede observar que la distribución de éstos es similar a la que se presentó en el modelo original del disipador, pero los esfuerzos fueron menores.

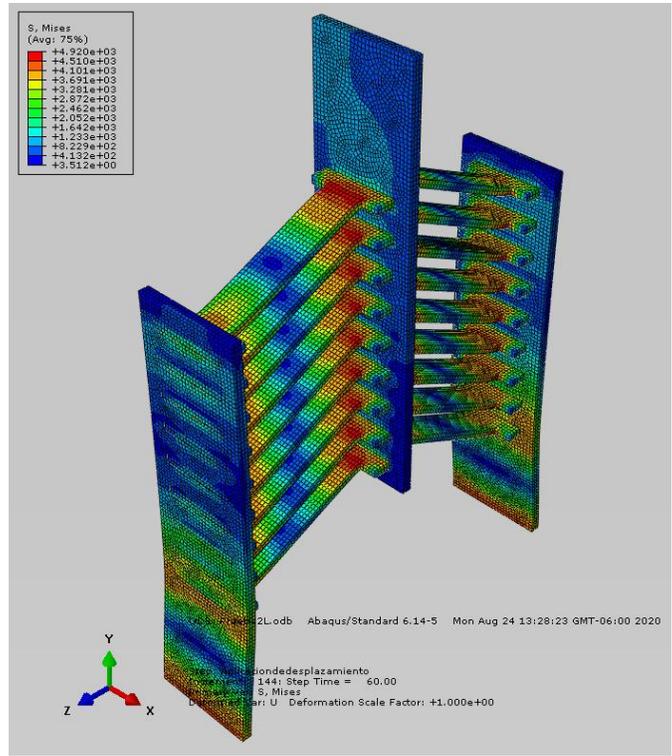


Figura 6.3. Espectro de esfuerzos modelo con placa dentada alargada

Según los datos obtenidos del modelo, se obtuvo la curva fuerza-desplazamiento del modelo, la cual podemos observar en la Figura 6.4. Las resistencias del modelo a la fluencia y máxima fueron de 7.6 t y 14.3 t, para desplazamientos de 0.87 cm y 8 cm respectivamente. La ductilidad de desplazamiento fue de 9.2.

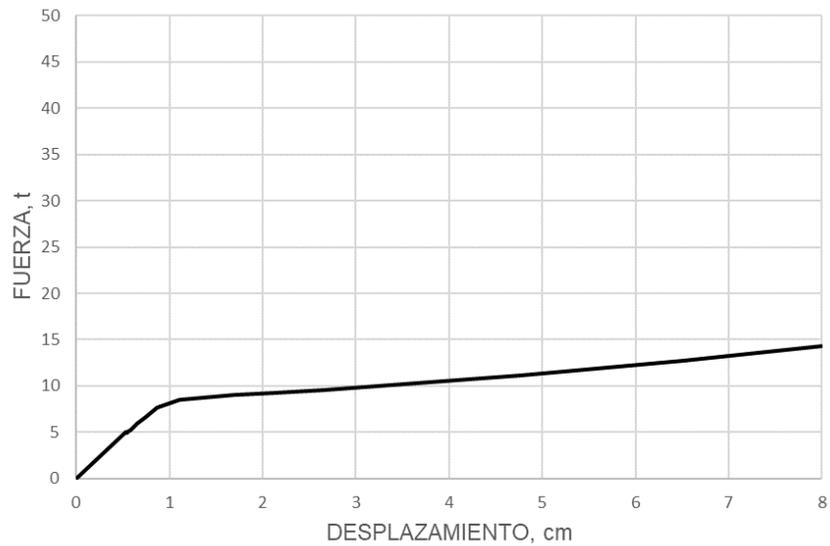


Figura 6.4. Curva fuerza-desplazamiento del modelo con placa dentada alargada

6.1.2 Acortamiento

Se redujo a la mitad la longitud de la zona fuera del empotramiento de la placa dentada. Acortando el segmento de 100 mm a 50 mm. Todas las demás medidas se mantuvieron constantes, como se puede observar en la Figura 6.5.

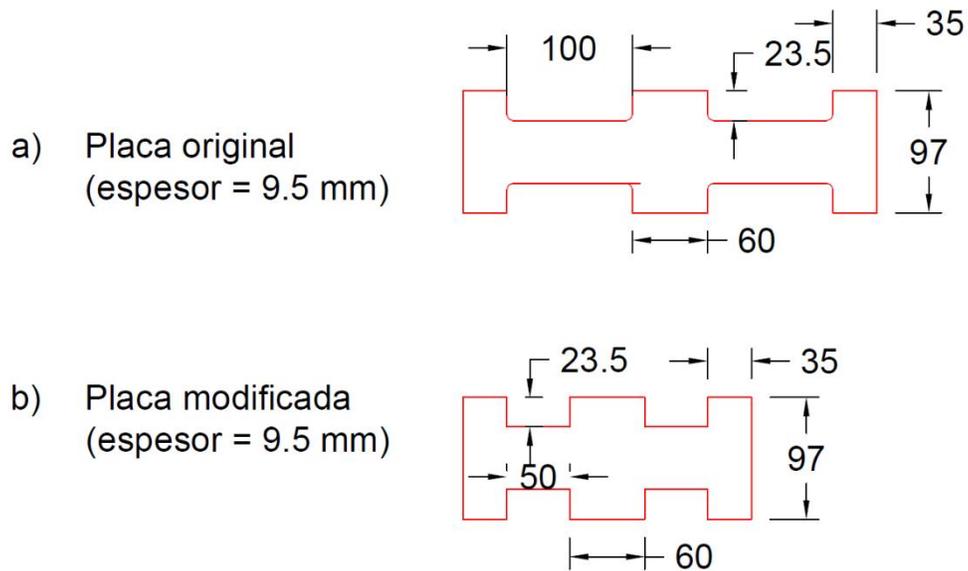


Figura 6.5. Dimensiones en mm, placa dentada acortada

El modelado del dispositivo siguió el mismo procedimiento implementado en el modelo inicial. En la Figura 6.6 se puede observar el modelo tridimensional del dispositivo con placas dentadas acortadas. También se observa que no se realizaron modificaciones a la placa ranurada.

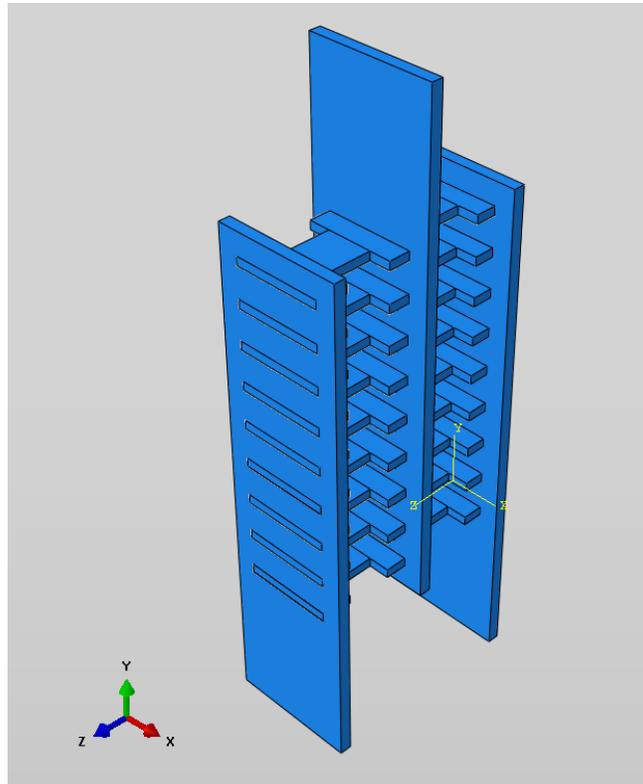


Figura 6.6. Modelo disipador con placa dentada acortada.

Utilizando la deformación plástica de 0.1059 como parámetro para determinar la falla, se realizaron iteraciones para llegar a una deformación plástica cercana a este valor, con un error de $\pm 5\%$. Con un desplazamiento de 2.75 cm se presentó una deformación plástica de 0.1046, con un error del 1.2%, por lo que se interpretó que a ese desplazamiento se presentó la falla.

En la Figura 6.7 se pueden observar los esfuerzos que presenta el modelo con un desplazamiento de 2.75 cm. También se pudo observar que la distribución de éstos es similar a la que se presentó en el modelo inicial del disipador, pero los esfuerzos tienen una distribución más uniforme a lo largo del segmento no empotrado de la placa dentada.

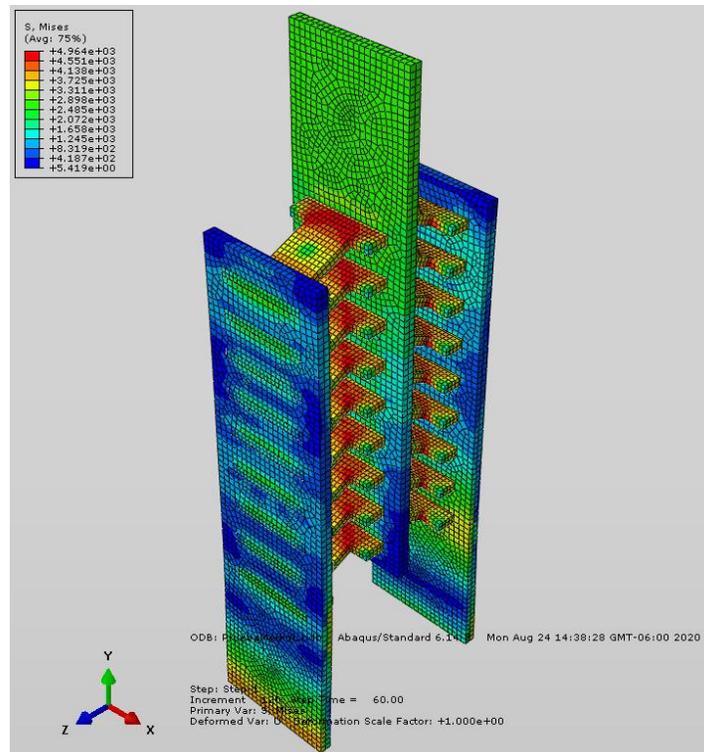


Figura 6.7. Espectro de esfuerzos modelo con placa dentada acortada

Según los datos obtenidos del modelo, se obtuvo la curva fuerza-desplazamiento del modelo, la cual se presenta en la Figura 6.8. Las resistencias del modelo a la fluencia y máxima son de 30.2 t y 46.5 t para desplazamientos de 0.25 cm y 2.75 cm respectivamente. La ductilidad de desplazamiento es de 11.

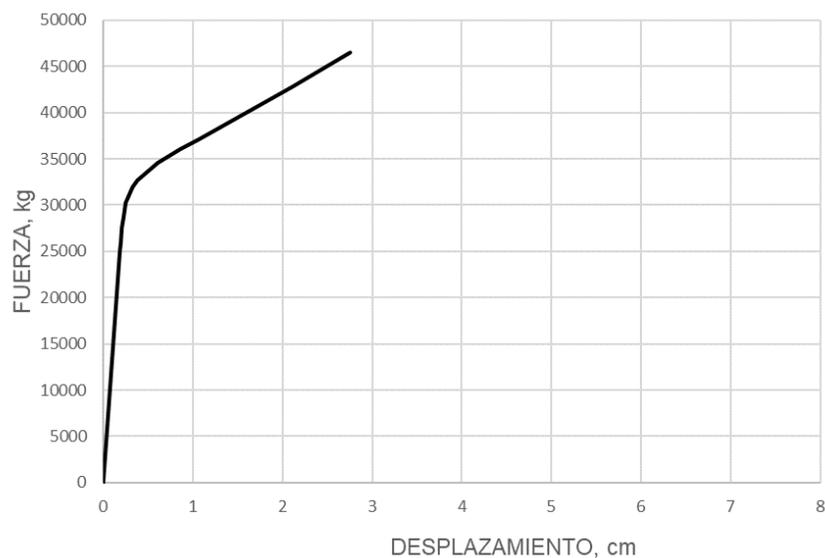


Figura 6.8. Curva fuerza-desplazamiento del modelo con placa dentada acortada

6.1.3 Comparación de resultados

Como se pudo observar en los resultados de los modelos anteriores, la longitud de la placa dentada tiene efectos tanto en la resistencia como en el desplazamiento máximo. En la Figura 6.9 se puede observar la comparación entre los resultados de los modelos numéricos para placas dentadas con longitudes diferentes.

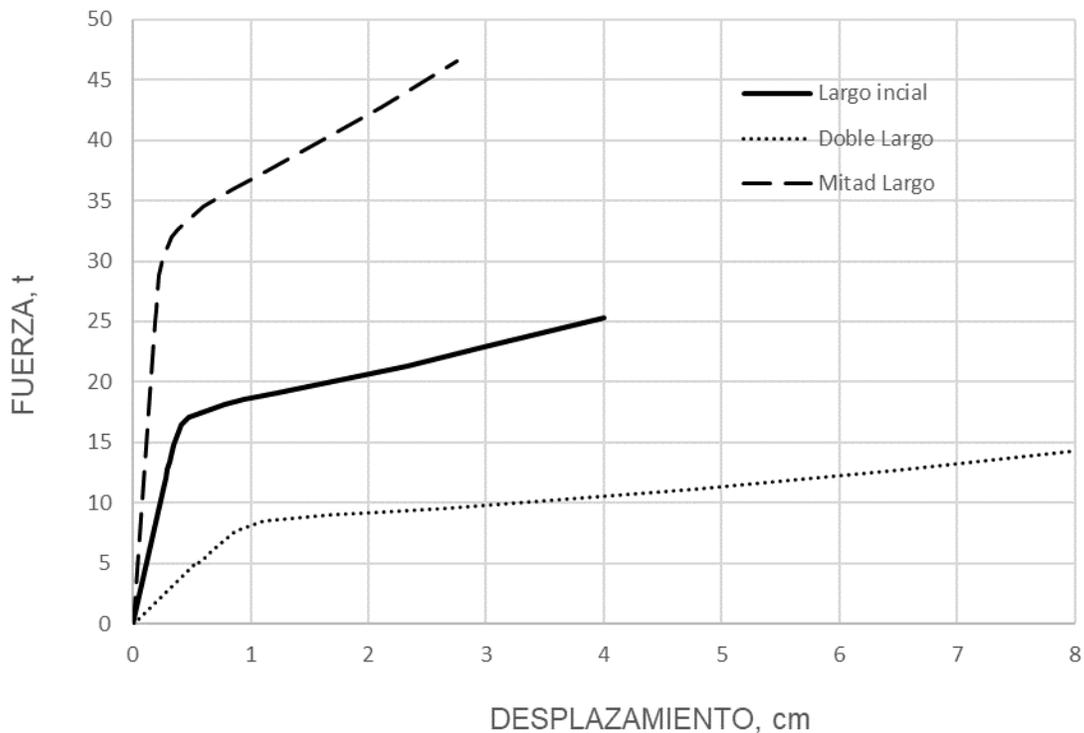


Figura 6.9. Curvas fuerza-desplazamiento diferentes longitudes.

Se puede observar que a menor longitud de la placa dentada el modelo resiste cargas mayores, pero las deformaciones de fluencia y máxima disminuyen. En contra parte, se puede ver que, a mayor longitud, las deformaciones a la fluencia y máxima aumentan, pero las resistencias disminuyen.

En el caso de la ductilidad de desplazamiento se puede observar que al aumentar la longitud ésta se mantuvo similar a la obtenida experimentalmente, pero al disminuirla aumentó.

Por otra parte, se puede observar una rigidez post-fluencia mayor conforme se reduce la longitud de la placa. Esto se debe a la eficiencia de las placas, pues a menor longitud mayor es el porcentaje de la placa que trabaja a esfuerzos mayores.

6.2 Efecto del Espesor

6.2.1 Doble Espesor

Se duplicó el espesor de la placa dentada y de la placa ranurada, aumentando de 9.5 a 19 mm y de 12.7 a 25.4 mm, respectivamente. Se agrandaron las ranuras de la placa ranurada para que las placas dentadas ensamblaran de manera adecuada. Se tuvo que duplicar el espesor de la placa ranurada para asegurar su capacidad. Todas las demás dimensiones se mantuvieron iguales, como se puede observar en la Figura 6.10.

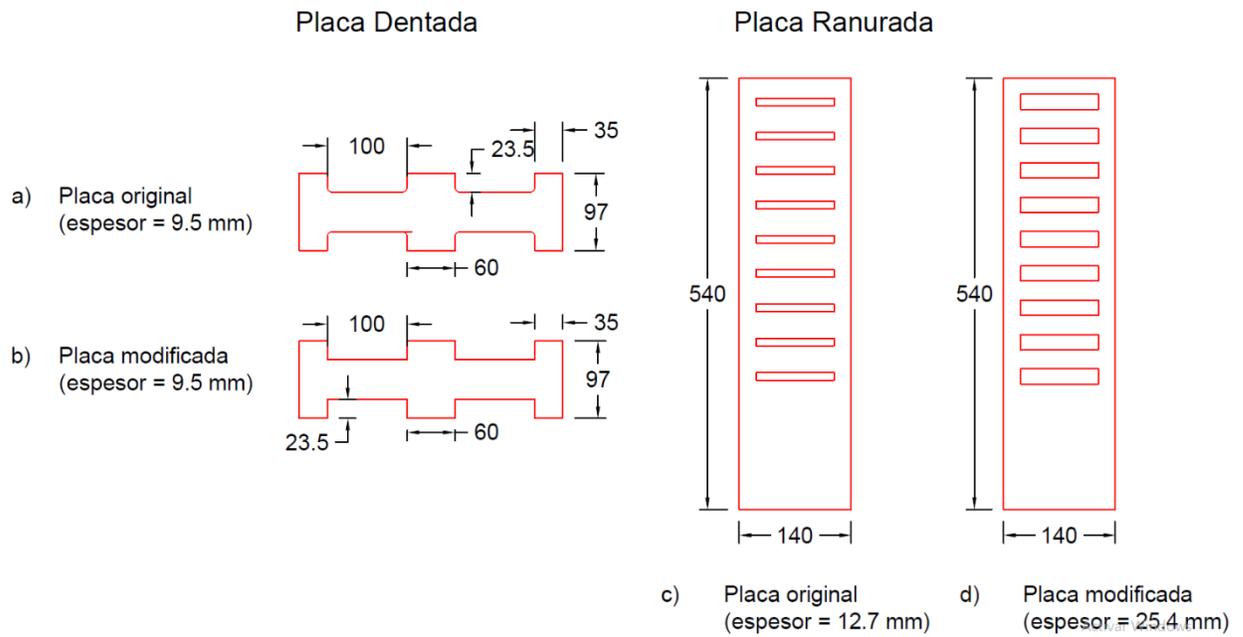


Figura 6.10. Dimensiones en mm, placa dentada y placa ranurada con doble espesor

El modelado se realizó siguiendo el mismo procedimiento que se implementó en el modelo inicial del dispositivo. En la Figura 6.11 se pudo observar el modelo 3D del disipador con el doble de espesor y con las modificaciones mencionadas.

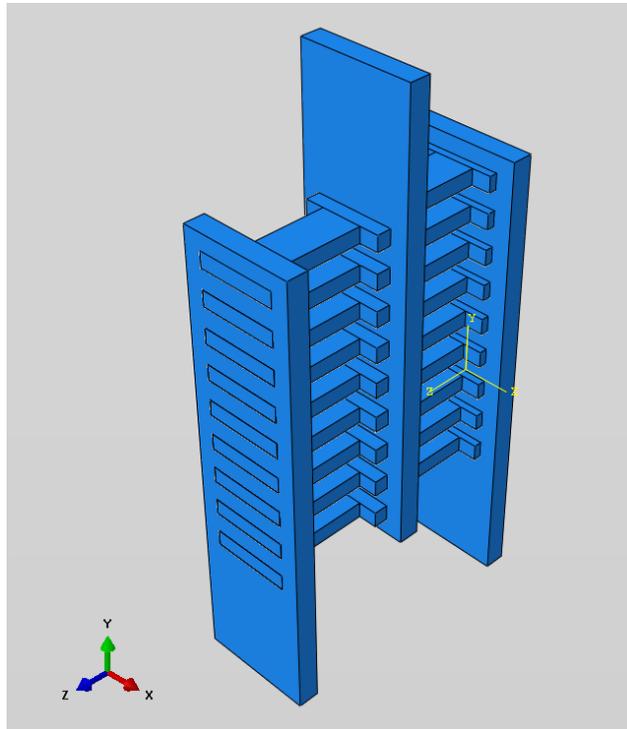


Figura 6.11. Modelo disipador con placas con doble espesor de placas

Utilizando la deformación plástica máxima de 0.1059 como parámetro para determinar la falla, se realizaron iteraciones para llegar a una deformación plástica cercana a este valor, con un error de $\pm 5\%$. Con un desplazamiento vertical de 2.5 cm en la placa ranurada central se presentó una deformación plástica de 0.1090 (con un error del 2.9%) por lo que se interpretó que a este desplazamiento se presentó la falla.

En la Figura 6.12 se pueden observar los esfuerzos que presenta el modelo para un desplazamiento de 2.5 cm. También se pudo observar que la distribución de éstos es similar a la que se presentó en el modelo inicial del disipador, pero presentó esfuerzos mayores en la placa ranurada central.

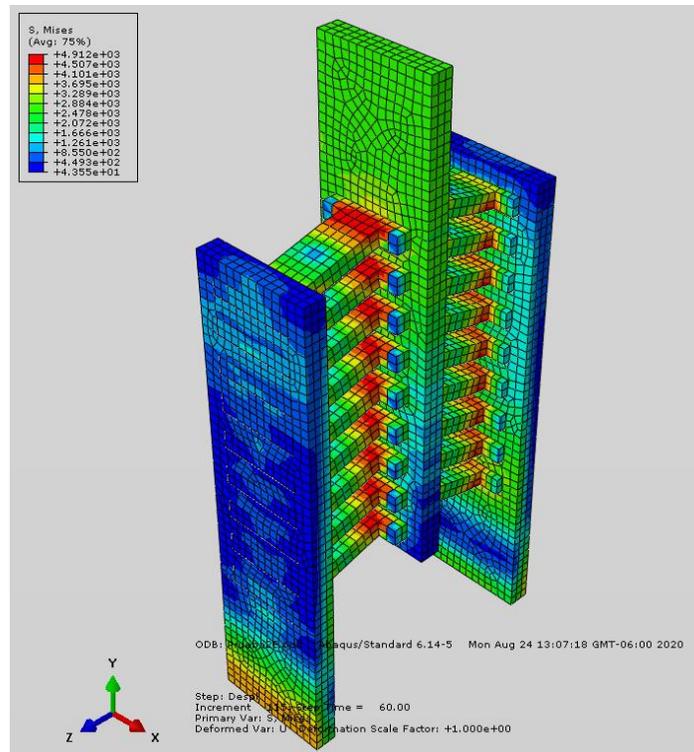


Figura 6.12. Espectro de esfuerzos modelo con doble espesor de placas

Según los datos obtenidos del modelo, se obtuvo la curva fuerza-desplazamiento del modelo, la cual podemos observar en la Figura 6.13. Las resistencias del modelo a la fluencia y máxima fueron 65.2 t y 98.2 t para desplazamientos de 0.2 cm y 2.5 cm respectivamente. La ductilidad de desplazamiento fue de 12.5.

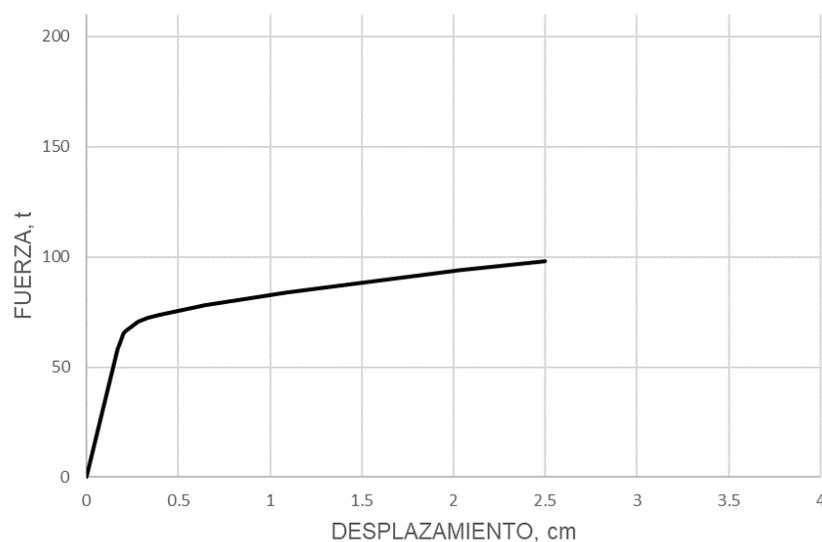


Figura 6.13. Curva fuerza-desplazamiento modelo con doble espesor de placas

6.2.2 Triple Espesor

Se triplicó el espesor de la placa dentada y de la placa ranurada, aumentando de 9.5 a 28.5 mm y de 12.7 a 38.1 mm, respectivamente. Se agrandaron las ranuras de la placa ranurada para que las placas dentadas ensamblaran de manera adecuada. Se tuvo que triplicar el espesor de la placa ranurada y aumentar las pestañas laterales de la placa dentada, para asegurar su capacidad. Todas las demás dimensiones se mantuvieron iguales, como se puede observar en la Figura 6.14.

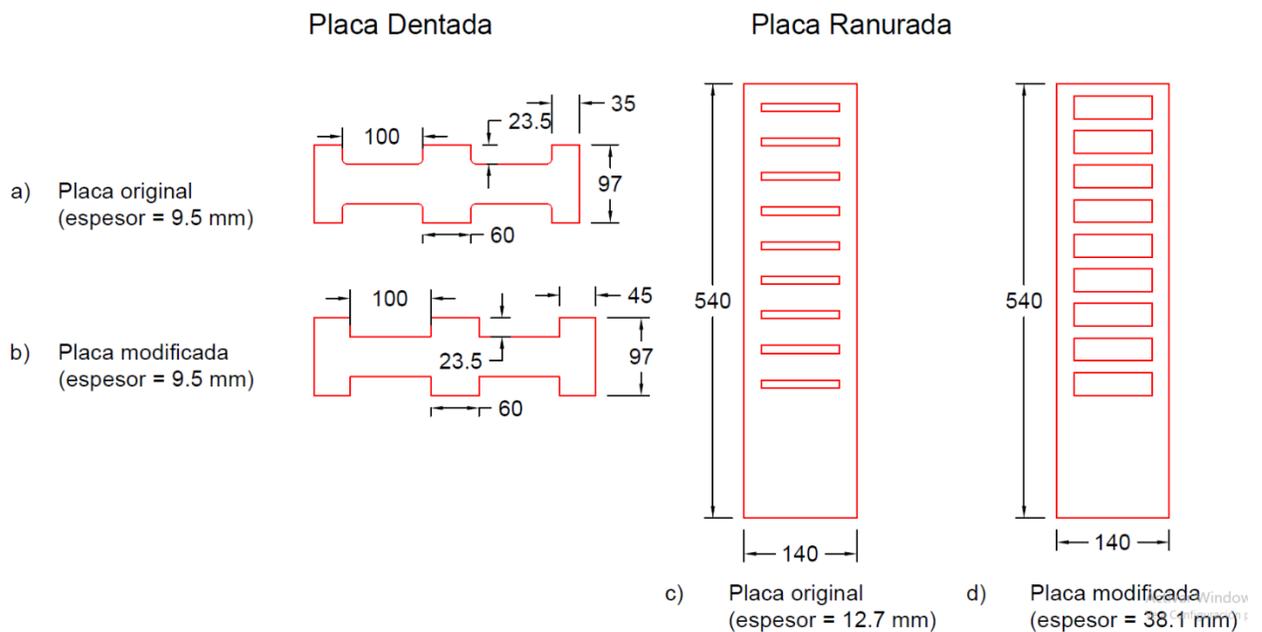


Figura 6.14. Dimensiones en mm, placa dentada y placa ranurada con triple espesor

El modelado se realizó siguiendo el mismo procedimiento que se implementó en el modelo inicial del dispositivo. En la Figura 6.15 se pudo observar el modelo 3D del disipador con el doble de espesor y con las modificaciones mencionadas.

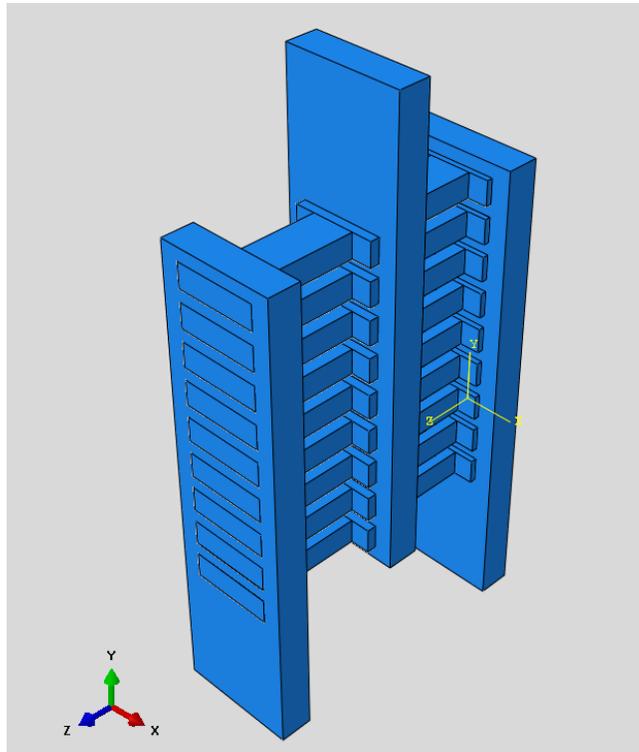


Figura 6.15. Modelo disipador con placas con triple espesor.

Utilizando la deformación plástica máxima de 0.1059 como parámetro para determinar la falla, se realizaron iteraciones para llegar a una deformación plástica cercana a este valor, con un error de $\pm 5\%$. Con un desplazamiento vertical de 1.5 cm en la placa ranurada central se presentó una deformación plástica de 0.1052 (con un error del 0.6%) por lo que se interpretó que a este desplazamiento se presentó la falla.

En la Figura 6.16 se pueden observar los esfuerzos que presenta el modelo para un desplazamiento de 1.5 cm. También se pudo observar que la distribución de éstos es similar a la que se presentó en el modelo inicial del disipador, pero presentó esfuerzos mayores en la placa ranurada central.

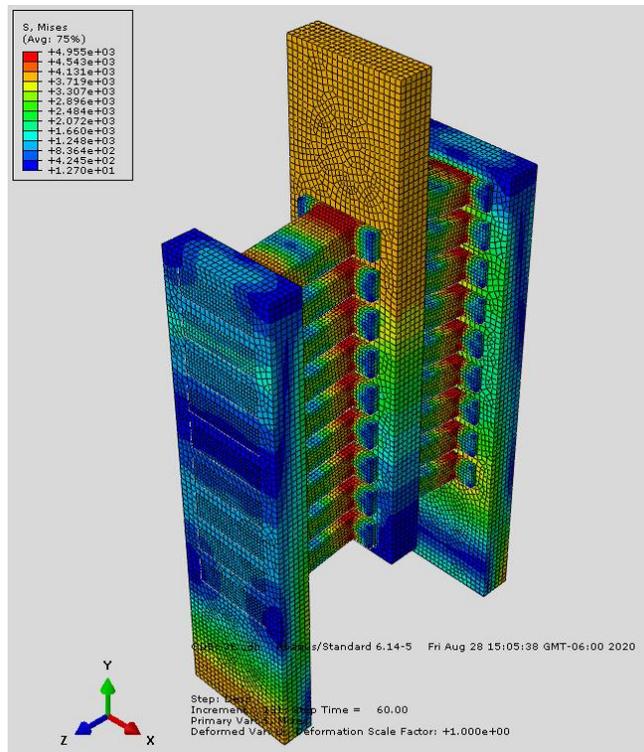


Figura 6.16. Espectro de esfuerzos modelo con triple espesor de placas

Según los datos obtenidos del modelo, se obtuvo la curva fuerza-desplazamiento del modelo, la cual podemos observar en la Figura 6.17. Las resistencias del modelo a la fluencia y máxima fueron 149.7 t y 202.9 t para desplazamientos de 0.18 cm y 1.5 cm respectivamente. La ductilidad de desplazamiento es de 8.33.

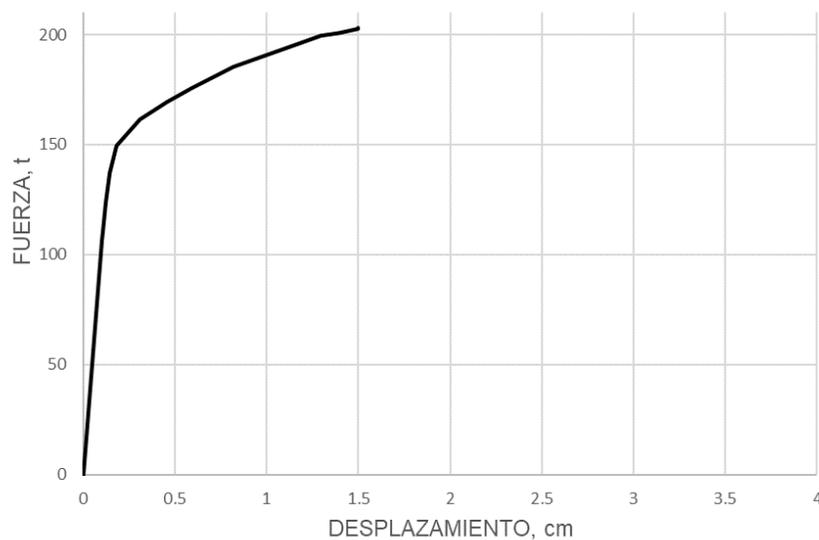


Figura 6.17. Curva fuerza-desplazamiento modelo con triple espesor de placas

6.2.3 Comparación de resultados

Como se pudo observar en los resultados de los modelos anteriores, el espesor de las placas tiene efectos tanto en la resistencia como en el desplazamiento máximo. En la Figura 6.18 se puede observar la comparación entre los resultados de los modelos numéricos para placas con espesores diferentes.

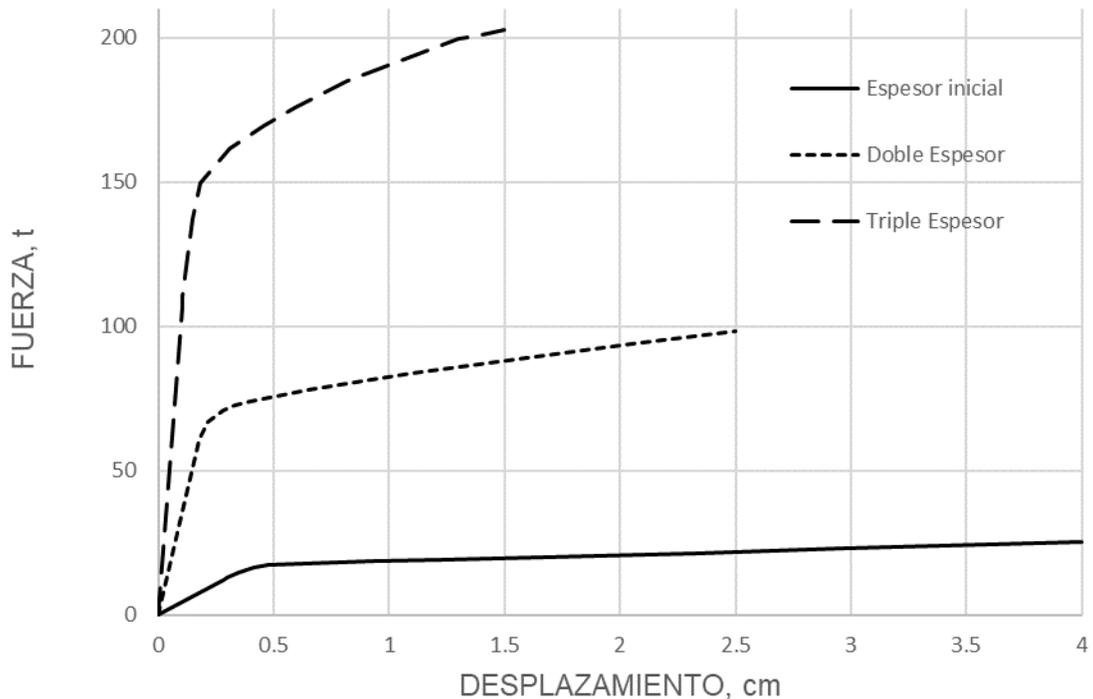


Figura 6.18. Curvas fuerza-desplazamiento diferentes espesores.

Se puede observar que conforme se aumenta el espesor de las placas, la resistencia aumenta, pero el desplazamiento máximo se reduce.

La variación en la ductilidad de desplazamiento no fue clara, pues para el doble de espesor aumentó, pero en el caso del triple de espesor presentó un valor similar a la obtenida experimentalmente. Esto puede deberse a las modificaciones que se tuvieron que realizar al modelo, tanto en la placa ranurada como en la dentada.

Además, se puede observar que al aumentar el espesor la rigidez post-fluencia aumenta. Esto se debe a que, al aumentar el espesor, la cantidad de acero que presenta esfuerzos de fluencia aumenta.

7 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1 Conclusiones

En esta tesis se presentó un resumen del estado del arte sobre disipadores de energía sísmica. Se mostraron resultados de unas pruebas experimentales y se desarrolló un modelo no lineal del disipador Dampo 1505. Se estudiaron los efectos de variaciones de los parámetros de longitud y espesor. Se proponen las siguientes conclusiones:

- Como se pudo observar en el estado del arte, los disipadores de energía sísmica son elementos estructurales que mejoran la seguridad sísmica de las estructuras. Además, son de fácil instalación, lo que se refleja en otras ventajas para las edificaciones.
- Los resultados de las pruebas experimentales realizadas en el Instituto de Ingeniería (2019) muestran que el disipador de energía Dampo 1505 presenta un comportamiento inelástico estable y una gran capacidad de disipación de energía.
- El modelo de elementos finitos desarrollado en este trabajo resultó de gran utilidad para analizar el comportamiento del disipador, permitiendo conocer el comportamiento de parámetros como la deformación plástica y los esfuerzos. Además, una vez calibrado, permitió conocer, con un margen de error bajo, como se comportaría el disipador en condiciones diferentes a las experimentales.
- La comparación de resultados del modelo experimental y el numérico nos indicó que el modelo numérico replica de manera satisfactoria el comportamiento experimental tanto en el intervalo elástico, como en el inelástico. Debido a esto, se puede decir que se validó.
- El alargamiento de la placa dentada generó una mayor capacidad de deformación aumentando de los 4 cm de las condiciones iniciales a 8 cm, pero la resistencia máxima se redujo de 25.3 t a 14.3 t. Esto se debe a que la distribución de esfuerzos en la placa alargada es menos uniforme, por lo que hay secciones que trabajan a esfuerzos menores al de fluencia, mientras que las secciones cercanas a la conexión de placas ya se plastificaron.
- El acortamiento redujo la capacidad de deformación de 4 cm a 2.75 cm y aumentó la resistencia de 25.3 t a 46.5 t. La causa de este comportamiento es que los esfuerzos que presenta la placa dentada son más uniformes, por lo que aportan mayor resistencia al disipador.

- La longitud de la placa dentada tuvo efectos significativos en la resistencia y el desplazamiento del disipador, presentando una relación directamente proporcional en el desplazamiento e inversamente proporcional en la resistencia.
- Las variaciones del espesor también mostraron efectos significativos en el desplazamiento y la resistencia, presentando una relación directamente proporcional con la resistencia e inversamente proporcional con el desplazamiento. Esto se debe a que, a mayor espesor, la cantidad de acero presente en la sección de conexión de placas es mayor, por lo que hay más acero trabajando a esfuerzos plásticos, aumentando la resistencia.

7.2 Recomendaciones

- Se recomienda continuar la investigación tanto con la revisión de la bibliografía, como con pruebas experimentales a dispositivos similares. Esto para conocer con más detalle el comportamiento de los disipadores de energía sísmica en diversos escenarios.
- Para futuras investigaciones se propone realizar ecuaciones que permitan conocer de manera analítica la resistencia y desplazamiento que presenta un disipador Dampo 1505, tomando en cuenta la geometría de sus placas.
- Una vez desarrolladas estas ecuaciones sería conveniente generar una metodología de diseño que permita implementar estas tecnologías a diversas aplicaciones.
- Analizar con modelos no lineales los disipadores Dampo 1505 que ya han sido instalados en aplicaciones reales, para así conocer con mayor precisión su comportamiento.

REFERENCIAS

- Beléndez, T., & Beléndez, A. (2001). No linealidad geométrica en Mecánica de Sólidos: una experiencia de laboratorio. XXVIII Reunión Bienal de la Real Sociedad Española de Física y 11º Encuentro Ibérico para la Enseñanza de la Física. 412-413
- Black, C. J., Makris, N., & Aiken, I. D. (2004). Component testing, seismic evaluation and characterization of buckling-restrained braces. *Journal of Structural Engineering*, 130(6), 880-894.
- Calvi, G. M., Priestley, M. J. N., & Kowalsky, M. J. (2007). Displacement-based seismic design of structures. *Earthquake spectra*, 24(2), 1-24.
- Dampo Systems S.A. de C.V. (2020). Disipador hysterético Dampo 1505. Recuperado el 1 de mayo del 2020, de http://www.dampo.com.mx/wp-content/uploads/2020/03/Diptico_1505_Final.pdf
- González, D. P. N., López, A. L., & Tamariz (2014). Análisis de estructuras de concreto reforzado considerando fatiga de bajos ciclos. Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural. XIX Congreso Nacional de Ingeniería Estructural. Puerto Vallarta ,Jalisco.
- Guerrero, H., Ji, T., & Escobar, J. A. (2016). Experimental studies of a steel frame model with and without buckling-restrained braces. *Ingeniería sísmica*, (95), 33-52.
- Guerrero, H., Ji, T., Escobar, J. A., & Teran-Gilmore, A. (2018). Effects of buckling-restrained braces on reinforced concrete precast models subjected to shaking table excitation. *Engineering Structures*, 163, 294-310.
- Instituto de Ingeniería (2019). Ensayo experimental de disipador de energía sísmica tipo "Dampo 1505". Convenio ISGCONV-126-2019. Instituto de Ingeniería, UNAM, México.
- Kmiecik, P., & Kamiński, M. (2011). Modelling of reinforced concrete structures and composite structures with concrete strength degradation taken into consideration. *Archives of Civil and Mechanical Engineering* Volume 11, issue 3. 623-636.
- Kupfer, H., Hilsdorf, H. K., & Rusch, H. (1969, August). Behavior of concrete under biaxial stresses. In *Journal Proceedings* ,Vol. 66, No. 8, pp. 656-666.

- Merritt, S., Uang, C. M., & Benzoni, G. (2003). Subassemblage testing of Corebrace Buckling-Restrained Braces. , LLC, Department of Structural Engineering, University of California, San Diego.
- Amézquita, J. A. O., & Uribe, M. D. P. D. (2009). Disipadores histeréticos metálicos como técnica de control de respuesta sísmica en edificaciones colombianas. *Revista EIA*, 6(11), 51-63.
- Oviedo, J. A., & Duque, M. D. P. (2006). Sistemas de control de respuesta sísmica en edificaciones. *Revista EIA*, (6), 105-120.
- Tremblay, R., Bolduc, P., Neville, R., & DeVall, R. (2006). Seismic testing and performance of buckling-restrained bracing systems. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 33(2), 183-198.