

ESTUDIO PARAMÉTRICO DEL COMPORTAMIENTO DE DISIPADORES

Estudio paramétrico del comportamiento histerético de disipadores de placas ranuradas
usando las herramientas de *Ansys Workbench*

Autoras:

Paula Daniela Báez Vargas

Yelin Patricia Suárez Marín

Trabajo de grado para optar el título de Ingeniera Civil

Universidad Industrial de Santander

Facultad de ingenierías fisicomecánicas

Escuela de Ingeniería Civil

Bucaramanga

2022

Estudio paramétrico del comportamiento histerético de disipadores de placas
ranuradas usando las herramientas de *Ansys Workbench*

Autoras:

Paula Daniela Báez Vargas

Yelin Patricia Suárez Marín

Director

Óscar Javier Begambre Carrillo

Ingeniero, IC., MSC., PHD.

Codirectores

Jeffrey Guevara Corzo - Ingeniero, IC., MSC.

Angie Paola Mendoza Cuy - Ingeniera, IC., MSC.

Universidad Industrial de Santander

Facultad de ingenierías fisicomecánicas

Escuela de Ingeniería Civil

Bucaramanga

2022

DEDICATORIAS

Antes de caer la noche y empezar un nuevo día cerraba mis ojos y agradecía a Dios por la maravillosa familia que me ha otorgado, han sido momentos difíciles por los que juntos hemos pasado pero el amor y la unión han permitido superar las diferentes adversidades. Es mi deseo como sencillo gesto dedicar este fruto a mi familia, a ti abuela por ser uno de los cimientos más importantes de la familia, me has demostrado ser una mujer valiente y gracias a ti aprendí a no rendirme, abuelo gracias por tu alegría por tus llamadas porque aunque no lo pensaras esas palabras me animaron a cumplir mi sueño, querida madre agradezco tu comprensión, amor y paciencia gracias por escucharme te amo mami, padre has estado ahí en todo mi proceso académico apoyándome en cada locura que se me ocurría gracias por confiar en mí y en hacer lo imposible para apoyarme, a mis hermanos porque han sido la principal fuente de motivación. Gracias, tía Xime porque con tu personalidad llena de carisma aprendí a no desistir de mis sueños gracias por recibirme siempre con amor y paciencia. Siento felicidad infinita porque Dios me ha permitido conocer grandes personas que me ayudaron a ser este sueño una realidad agradecimiento especial a doña Tulia Pimiento por recibirme en su casa con mucho cariño y amor, gracias a la universidad conocí a personas de buen corazón a amigos de lucha con los que nos animábamos recíprocamente para no caer en la desesperación, gracias Ye por estar ahí siempre en este proceso por ser el complemento más importante para hacer esta propuesta realidad, finalmente gracias a todos mis amigos de corazón que me recuerdan siempre como la amiga alegre hoy les quiero decir esto es para todos ustedes y para mi mundo entero.

Paula Báez

*Dedico con todo mi amor este trabajo de grado a mis padres; a mi madre por ser el pilar mas importante y por demostrarme siempre su cariño y apoyo incondicional y a mi padre, por hacerme confiar en mis decisiones. A mi hermano Javier, pues sin duda alguna fue el primero que deposito todo su apoyo y confianza en mi para ser hoy en día
una Ingeniera.*

Esta tesis se la dedico también a mis amigos (a Harold y a Tita por acompañarme incondicionalmente, y a la memoria de Any), quienes me animaron en este campo de estudio y durante varios años facilitaron y aportaron a mi crecimiento personal y profesional.

Yelin Suárez

AGRADECIMIENTOS

Terminar este proyecto no hubiera sido posible sin el apoyo profesional de nuestros profesores. Agradecemos al Doctor Óscar Begambre y a los especialistas Jeffrey Guevara y Angie Mendoza quienes con dedicación y esmero encausaron nuestra investigación con sus conocimientos. A la Universidad Industrial de Santander por recibirnos en su alma mater y brindarnos una educación de calidad y un segundo hogar. A todos nuestros profesores, quienes con su compromiso y vocación de enseñanza aportaron a nuestra formación para poder optar nuestro título de Ingenieras. Y, a todos nuestros amigos, compañeros y colegas por haber hecho parte del proceso.

Tabla de Contenido

Introducción	11
1. Objetivos	14
1.1 Objetivo general	14
1.2 Objetivos específicos.....	14
2. Revisión del estado del arte	15
3. Marco conceptual	21
3.1 Balance de energía.....	21
3.2 Control pasivo	21
3.3 Disipador histérico de placas ranuradas	22
3.4 Condiciones cuasiestáticas	24
3.4.1 <i>Quasi-static cyclic test</i>	24
3.4.2 <i>Shaking table test</i>	25
3.5 Histéresis	25
4. Estudio paramétrico de disipadores de placas ranuradas	27
4.1 Validación del modelo.....	27
4.2 Simulación en <i>Ansys</i>	29
4.2.1 Propiedades del acero	30
4.2.2 Protocolo de carga	31
4.3 Estudio paramétrico.....	32
4.4 Modelos para analizar	33
5. Análisis de resultados	37
Conclusiones.....	44
Referencias bibliográficas	47

Lista de Figuras

Figura 1 Disipador hysterético de placa ranuras	22
Figura 2 Historial de desplazamiento para pruebas cíclicas	24
Figura 3 Montaje para una prueba de mesa vibratoria	25
Figura 4 Diagrama esfuerzo-deformación unitaria	26
Figura 5 Configuración geométrica del dispositivo simulado, dimensiones en mm.....	27
Figura 6 Resultados de la validación.....	28
Figura 7 Esquema gráfico del desplazamiento aplicado.....	31
Figura 8 Modelo de disipador de ranuras circulares.....	32
Figura 9 Configuraciones de los disipadores en estudio con 3 ranuras, dimensiones en mm. ...	34
Figura 10 Configuraciones de los disipadores en estudio con 4 ranuras, dimensiones en mm. .	35
Figura 11 Configuraciones de los disipadores en estudio con 5 ranuras, dimensiones en mm. .	36
Figura 12 Modelo de disipador de ranuras circulares y protocolo de carga utilizado para la simulación	37
Figura 13 Disipador analizado en el estudio para 3 ranuras circulares con mayor energía disipada (1871,9 J).....	38
Figura 14 Disipador analizado en el estudio para 4 ranuras circulares con mayor energía disipada (2456,1 J).....	39
Figura 15 Disipador analizado en el estudio para 5 ranuras circulares con mayor energía disipada (2483,8 J).....	39
Figura 16 Configuración del dispositivo con mayor disipación de energía con 3 ranuras variando la ubicación de los orificios en forma oblicua, dimensiones en mm.....	42
Figura 17 Disipador analizado en el estudio para 3 ranuras circulares variando la ubicación de los orificios en forma oblicua. Energía disipada (1887,5 J).....	42
Figura 18 Configuración del dispositivo con mayor disipación de energía con 3 ranuras variando la ubicación de los orificios, dimensiones en mm.	42
Figura 19 Disipador analizado en el estudio para 3 ranuras circulares variando la ubicación de los orificios. Energía disipada (1897,1 J)	42
Figura 20 Configuración del dispositivo con mayor disipación de energía con 4 ranuras variando la ubicación de los orificios en forma oblicua, dimensiones en mm.	43
Figura 21 Disipador analizado en el estudio para 4 ranuras circulares variando la ubicación de los orificios en forma oblicua. Energía disipada (2559,8 J).	43
Figura 22 Configuración del dispositivo con mayor disipación de energía con 5 ranuras variando la ubicación de los orificios, dimensiones en mm.....	43

Lista de Tablas

Tabla 1 Clasificación de las técnicas de respuesta sísmica	16
Tabla 2 Propiedades del acero estructural para el estudio	30
Tabla 3 Diseño del experimento factorial 3^3	33
Tabla 4 Resultados obtenidos para disipadores con 3 ranuras circulares	38
Tabla 5 Resultados obtenidos para disipadores con 4 ranuras circulares	38
Tabla 6 Resultados obtenidos para disipadores con 5 ranuras circulares	39
Tabla 7 Resultados obtenidos modificando la distribución de ranuras	41

Lista de Gráficas

Gráfica 1 Propiedades del acero estructural para el estudio.	31
Gráfica 2 Ciclo de desplazamiento dividido en 4 etapas	32
Gráfica 3 Análisis de datos para un disipador de 3 ranuras variando la relación de aspecto de la placa y su diámetro	40
Gráfica 4 Análisis de datos para un disipador de 4 ranuras variando la relación de aspecto de la placa y su diámetro	40
Gráfica 5 Análisis de datos para un disipador de 5 ranuras variando la relación de aspecto de la placa y su diámetro	41

Resumen

Título: Estudio paramétrico del comportamiento histerético de disipadores de placas ranuradas usando las herramientas de *Ansys Workbench*. *¹

Autores: Suárez Marín, Yelin Patricia. Báez Vargas, Paula Daniela. **²

Palabras clave: Disipador, control sísmico, control pasivo, histéresis, edificaciones.

Descripción: Con el paso de los años se han originado diferentes técnicas de disipación de energía sísmica, esto como solución ante la ocurrencia de eventos telúricos y fuertes vientos que afectan gravemente la respuesta dinámica de las edificaciones. Una de estas técnicas son los disipadores pasivos, que han sido un referente ampliamente estudiado por diferentes autores y dentro de sus resultados se consideran a los dispositivos histeréticos metálicos con ranuras como elementos con ciclos de histéresis estables, razón por la cual se pueden aplicar como la mejor alternativa de implementación en el diseño tradicional de edificaciones para países en vía de desarrollo como Colombia.

Este estudio tuvo como objetivo analizar el comportamiento histerético de un disipador metálico con ranuras circulares. La investigación se realizó mediante un estudio paramétrico sobre 27 modelos de disipadores sometidos a un protocolo de carga cíclica. Para determinar la capacidad de disipación de los dispositivos se empleó el software de análisis estructural basado en elementos finitos *Ansys Workbench*. A partir de los resultados obtenidos en esta investigación, se concluye que la relación de aspecto de la placa del dispositivo es el factor con mayor influencia en su desempeño, resaltando que los disipadores con ranuras circulares de menor radio son los que presentan una mayor capacidad de disipación de energía. Finalmente, se determinó lo contraproducente que puede ser el que se dispongan orificios en una sola fila, debido a la concentración de esfuerzos en el material entre ranuras.

* Proyecto de grado

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: PhD. Oscar Javier Begambre Carrillo. Codirectores: MSc Jeffrey Guevara Corzo, MSc Angie Paola Mendoza Cuy

Abstract

Title: Parametric study of the hysteretic behavior of slotted plate heatsinks using *Ansys Workbench* tools. *³

Authors: Suárez Marín, Yelin Patricia. Báez Vargas, Paula Daniela. **⁴

Key words: Dissipator, seismic control, passive control, hysteresis, buildings.

Description: Over the years, different seismic energy dissipation techniques have been developed as a solution to the occurrence of telluric events and strong winds that seriously affect the dynamic response of buildings. One of these techniques are the passive dissipators, which have been a reference widely studied by different authors and within their results, metallic hysteretic devices with slots are considered as elements with stable hysteresis cycles, reason why they can be applied as the best alternative for implementation in the traditional design of buildings for developing countries such as Colombia. The objective of this study was to analyze the hysteretic behavior of a metallic heatsink with circular slots.

The research was carried out by means of a parametric study on 27 heatsink models subjected to a cyclic loading protocol. The finite element based structural analysis software *Ansys Workbench* was used to determine the dissipation capacity of the devices. From the results obtained in this research, it is concluded that the aspect ratio of the device plate is the factor with the greatest influence on its performance, highlighting that the heatsinks with circular slots of smaller radius are the ones that present a greater energy dissipation capacity. Finally, it was determined how counterproductive it can be to have holes in a single row, due to the concentration of stresses in the material between slots.

* Bachelor thesis.

** Faculty of Mechanical Physics Engineering. Civil Engineering School. Director: PhD. Oscar Javier Begambre Carrillo. Codirectores: MSc Jeffrey Guevara Corzo, MSc Angie Paola Mendoza Cuy

Introducción

Debido a la interacción de las placas litosféricas de Nazca, Sudamericana y Caribe, el territorio colombiano se encuentra sometido a constantes movimientos tectónicos en varias direcciones, lo que facilita la ocurrencia de sismos y otros fenómenos naturales (Arcila et al, 2020). En relación con la sismicidad, en el informe *Estudio general de amenaza sísmica de Colombia* (2009), realizado por la Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (AIS, 2009), se divide el territorio nacional en zonas de actividad sísmica alta, intermedia o baja y se evidencia que las ciudades más pobladas se ubican en las zonas de mayor amenaza.

Teniendo en cuenta lo anterior, con el propósito de preservar la vida y el patrimonio de los ciudadanos, la Comisión Asesora Permanente para el régimen de construcciones sismo resistentes NSR-10 (CAP, 2010) , establece, en el reglamento, las pautas para el diseño de estructuras, siguiendo los fundamentos de resistencia y ductilidad que garantizan que los elementos estructurales del sistema principal resistan las fuerzas inducidas por el sismo y las solicitaciones por su uso (Oviedo y Duque, 2006).

Sin embargo, en las técnicas tradicionales, la capacidad de disipación de energía es limitada y se pueden presentar niveles de daño asociados a la intensidad del sismo, tal como los describe la norma colombiana: para temblores de poca intensidad no se permiten daños en el sistema estructural, en presencia de temblores moderados son posibles los daños a elementos no estructurales, pero el sistema estructural no se puede ver afectado y, para temblores fuertes, se admiten de igual manera daños a elementos estructurales y no estructurales, pero sin colapso (CAP, 2010); en este último caso, la reparación podría resultar financieramente inviable.

Esta no es una problemática solo nacional. Países con alta actividad sísmica como Japón, Estados Unidos y China han logrado desarrollar e implementar alternativas de solución que incluyen sistemas de control de respuesta sísmica que reducen y controlan la respuesta dinámica y el daño en elementos del sistema estructural principal (Colunga y Contreras, 2017). Los sistemas de control de respuesta sísmica se clasifican en pasivos, activos, semiactivos e híbridos. Los sistemas pasivos relacionan dispositivos de aislamiento, disipación y masa adicional; dentro de los disipadores se relacionan elementos de tipo: histerético, viscoso, viscoelástico y de fricción (Oviedo y Duque, 2006) y los sistemas de control activo e híbrido cuentan con dispositivos que necesitan de algún sistema de energía externa para su accionamiento (Oviedo y Duque, 2009b; Pimiento et al., 2014).

Autores como: Kunisue et al. (2000); Chan y Albermani, (2008); Chan et al. (2009); Oh S.-H et al. (2009); Ghabraie et al. (2010); Chan et al. (2013) y Saffari et al. (2013) han propuesto disipadores de energía histeréticos metálicos de placas ranuradas con alta capacidad de disipación y con ciclos de histéresis muy estables. Estudios cualitativos realizados por Oviedo y Duque (2006) y Askariani y Garivani (2020) consideran a estos dispositivos como la mejor alternativa de implementación en el diseño tradicional de edificaciones para países en vía de desarrollo como Colombia, dado que son elementos eficientes y de bajo costo.

No obstante, se evidencia que la capacidad de disipación de energía de estos dispositivos se ve influenciada por su geometría y aún no se conoce la mejor alternativa. Algunas investigaciones sugieren que disipadores con ranuras circulares permiten una mejor distribución de esfuerzos (Ferrer y Villalba, 2017; Mendoza y Tirado, 2018). En este trabajo se determinó numéricamente el comportamiento histerético de dispositivos

disipadores metálicos cuando son sometidos a cargas cíclicas, variando la localización, el tamaño de las ranuras y la relación de aspecto (ancho/alto) de la placa conservando la misma cantidad de material, lo que permitió la obtención de los resultados de la energía disipada por cada modelo parametrizado.

Este trabajo de grado presenta cuatro apartados y las conclusiones. En el primero se muestra una breve descripción de los estudios previos que se han desarrollado a partir de la necesidad de descubrir nuevos modelos capaces de disipar la energía para la protección sísmica de edificaciones; en el segundo, se menciona una base teórica que permite introducir, conocer y evaluar el comportamiento histerético del modelo del disipador para esta investigación. Luego, en el tercero, se hace mención del desarrollo metodológico del trabajo, el cual contiene la validación del modelo y el proceso de modelado de los diferentes dispositivos en el software *Ansys Workbench* (Ansys Workbench, 2020); seguido, en el cuarto, se desarrolla el análisis de las pruebas obtenidas y, finalmente, se presentan las conclusiones en las que se evidencian las comprobaciones numéricas de este estudio para tomar decisiones sobre el modelo en complementación con los resultados.

1. Objetivos

1.1 Objetivo general

Determinar numéricamente el comportamiento histerético de disipadores de placas ranuradas sometidos a cambios geométricos por medio de un estudio paramétrico.

1.2 Objetivos específicos

1. Establecer los parámetros del estudio y la cantidad de configuraciones geométricas que se estudiarán manteniendo la misma cantidad de material.
2. Modelar los disipadores de placas ranuradas en un software de análisis estructural basado en elementos finitos para conocer su capacidad de disipación.
3. Evaluar la influencia de las variables del estudio en la capacidad de disipación de energía de los disipadores de placas ranuradas.

2. Revisión del estado del arte

Durante las últimas décadas, algunos países afectados por la alta actividad sísmica y fuertes vientos han visto la necesidad de construir edificaciones más seguras. Para esto, ingenieros y científicos han desarrollado sistemas de protección sísmica de acuerdo con las características y necesidades propias de cada estructura. Los avances en las técnicas de control de respuesta dinámica han permitido el desarrollo de dispositivos que controlan y reducen el daño estructural asociado principalmente a temblores; además, estos sistemas complementan las técnicas tradicionales de diseño al introducir elementos estructurales adicionales que deben disipar la mayor parte de la energía de vibración introducida por los sismos.

Las técnicas de control de respuesta sísmica se pueden clasificar en cuatro tipos de sistemas: control pasivo, control semiactivo, control activo e híbrido (Oviedo y Duque, 2009b). El primer tipo de sistema, el de control semiactivo, se caracteriza por dos tipos: el control de amortiguamiento y el control de rigidez dentro de los cuales se encuentran dispositivos de tipo hidráulico y riostras respectivamente; el segundo y tercero son de control activo e híbrido, que se rigen por el control de fuerza y el efecto de masa y el cuarto tipo de sistema, dentro de la clasificación, es el de control pasivo, donde se hallan el aislamiento sísmico, el efecto de masa adicional (sistemas de masa y resorte, de tipo pendular, vibración de líquido entre otros) y la disipación de energía.

Para el sistema de disipación de energía los ingenieros señalan tres clasificaciones, primera, de tipo friccionante; segunda, de tipo fluido, en el que se encuentran dispositivos hidráulicos y viscosos, y tercera, de tipo histerético. Dentro de los dispositivos histeréticos están los de fricción y los metálicos, en estos existen tres clasificaciones: los dispositivos de extrusión de plomo, de aleaciones con memoria y, finalmente, los disipadores por

fluencia (ADAS, X-ADAS, T-DAS, riostras no ligadas y los sistemas de placas ranuradas) (Pimiento et al., 2014). Para más detalle, en la **Tabla 1** se presenta la clasificación de las técnicas de respuesta sísmica más estudiadas en los últimos años.

Tabla 1 Clasificación de las técnicas de respuesta sísmica

SISTEMAS DE CONTROL	CLASIFICACIÓN	TIPO	DISPOSITIVO
Control Pasivo.	Aislamiento sísmico.	Mecanismos deslizantes o de rodillos.	Apoyo de rodillos.
			Apoyo de placa deslizante, tipo péndulo, basculante.
			Capa deslizante.
			Otros.
		Elemento flexible.	Elastómeros de multicapas.
			Dispositivo flexible.
	Disipación de energía.	De tipo histerético.	Acero.
			Plomo.
			Otros.
		De tipo friccionante.	
		De tipo fluido.	Hidráulico.
			Viscoso.
			Otros.
		De tipo viscoelástico.	
Efecto de masa adicional.	De masa y resorte.		
	De tipo pendular.		
	Vibración de líquido.		
	Otros.		
Otros.			
Control semiactivo.	Control de amortiguamiento.	Sistema de amortiguamiento variable.	De tipo hidráulico.
			Otro.
	Control de rigidez.	Sistema de rigidez variable.	Riostra.
			Otro.
Control activo e híbrido.	Efecto de masa.	Amortiguamiento activo de masa.	
		Amortiguamiento híbrido de masa.	
	Control de fuerza.	Tendón activo.	
		Otro.	
		Otro.	

Nota: Información tomada del artículo “Sistemas de control de respuesta sísmica en edificaciones” (Oviedo y Duque, 2006).

Como se puede detallar en la tabla presentada, las técnicas de disipación presentan un gran número de dispositivos los cuales deben ser empleados según las necesidades de cada estructura.

Ahora bien, el sistema de protección pasivo con disipadores histeréticos metálicos de placas ranuradas, es un conjunto de elementos constituidos únicamente por una placa delgada de acero que presenta ranuras que varían en relación con el tamaño, forma y cantidad (Ferrer y Villalba, 2017). La técnica se caracteriza por usar componentes adicionales más simples al sistema principal y al colocarse estratégicamente en la estructura logran intervenir la respuesta dinámica de la edificación controlando el daño de ésta (Oviedo y Duque, 2009b); estos tipos de dispositivos son utilizados en edificaciones de diferentes alturas y materiales.

Una alternativa de instalación de estos dispositivos en edificaciones es entre la viga y un arriostramiento tipo V invertida de un pórtico, este sistema aporta rigidez a la estructura cuando la placa se encuentra en el estado elástico. Al pasar a un estado plástico el dispositivo absorbe parte de la energía generada en la estructura por medio de ciclos de histéresis, evitando daños estructurales importantes. Esta situación conduce a que los dispositivos fallen por fluencia, pero los elementos estructurales de la edificación no son afectados (Pimiento et al., 2014; Ferrer y Villalba, 2017). Además, el estudio realizado por Pimiento et al. (2014) justifica que este tipo de dispositivos al estar sometidos ante acciones sísmicas disminuyen hasta en un 90% las derivas presentes en la estructura, dado que actúan como rótulas plásticas que evitan la generación de sobre esfuerzos en los elementos principales.

Estos tipos de dispositivos ofrecen grandes ventajas dado que requieren procedimientos sencillos para su fabricación e instalación en la estructura (Pimiento et

al., 2014). De hecho, para intervenir en la respuesta sísmica de una edificación se pueden usar menos componentes adicionales y son una alternativa eficiente, económica y fácilmente reemplazable después de que sufren daños ocasionados por sismos o vientos (Oviedo y Duque, 2009b); sin embargo, en Colombia debido a la poca información del funcionamiento de estos dispositivos puede llevar a que dichas técnicas sean rechazadas o desaprovechadas (Oviedo y Duque, 2009a).

El uso de las técnicas de disipación pasiva ha logrado la obtención de resultados relacionados con la reducción del daño en elementos estructurales y no estructurales. Diversos países, con la finalidad de mejorar la implementación de estas técnicas de disipación, han propuesto diferentes normativas. En Latinoamérica países como Chile y México ya cuentan con las especificaciones que rigen el análisis y diseño de los diferentes elementos. Chile estableció la NCH 2745 “Análisis y Diseño de Edificios con Aislación sísmica” (NCh2745 ,2003) y México propuso la Norma Técnica Complementaria (NTC, 2004) para Diseño por Sismo avalada por la SMIE.

En consecuencia, Colombia es un país en desventaja en relación con la implementación de sistemas de protección, y aunque no se ha concretado una norma para el control y calidad de los dispositivos, algunas edificaciones como la Clínica Amiga Comfandi y la Clínica Imbanaco, localizadas en la ciudad de Cali, han empleado dispositivos aisladores de base en su diseño. El avance en lo referente a los dispositivos pasivos ha sido limitado, pues hasta el momento solo se ha recurrido a ellos como una técnica de rehabilitación y no como un sistema de protección en el diseño, como es el caso de hospital el Tunal, Bogotá (Oviedo y Duque, 2009a).

Por otro lado, en las últimas décadas los disipadores de hendidura de acero con diferentes geometrías o aberturas han sido estudiados por diversos autores. Una propuesta

de investigación es la realizada por Chan y Albermani (2008) los cuales realizan el diseño y análisis de un dispositivo libre de soldaduras, de este estudio se concluye que los dispositivos con ranuras más largas y anchas tienen un comportamiento flexible. Por otra parte, los de ranuras cortas y estrechas aportan mayor rigidez; además, su estudio determinó cómo la resistencia de los mecanismos disminuye a medida que la tensión de las tiras de acero se concentra lentamente en los extremos. Asimismo, la investigación realizada por Ghabraie et al. (2010), demuestra cómo es posible optimizar la forma de este tipo de elementos implementando una técnica de optimización topológica. De este análisis se logra concluir que la hendidura rómbica es la forma de la abertura óptima para ese estudio.

Por otra parte, la investigación numérica y experimental realizada por Ma et al. (2010), analiza once modelos de disipadores que se caracterizaron por tener dos tipos de enlace: el de tipo rectangular y el de forma de mariposa. De los resultados obtenidos, se determinó que los modelos con enlace de mariposa presentan curvas de histéresis más estables; de igual manera Lee et al. (2015) realizaron el estudio experimental de dispositivos de hendiduras de acero con enlaces prismáticos y rectangulares; finalmente, al analizar los resultados concluyeron que los dispositivos con enlaces prismáticos tienen mejor capacidad de respuesta que los de enlaces rectangulares.

Otro estudio realizado por Ahmadie et al. (2018), proponen un nuevo dispositivo denominado ‘disipador de hendidura en bloque’ o en inglés *Block Slit Damper* (BSD). Este elemento se caracteriza por tener mejor desempeño sísmico dado que presenta un diseño que le permite tener mayor capacidad de respuesta al corte. Además, los autores consideran que este tipo de elemento es más económico que los disipadores de hendidura de acero (SSD). Para determinar el comportamiento histerético de este tipo de dispositivo,

los autores fabricaron y probaron 5 tipos, cambiando las relaciones de aspecto (ancho/alto). De acuerdo con el análisis de resultados, se determinaron curvas de histéresis estables, caracterizadas por altas capacidades de disipación en consecuencia con la resistencia al pandeo. Además, se prueba que al disminuir la relación de aspecto (ancho/alto) las curvas de histéresis alteran su forma ampliándose, en efecto, la capacidad de desplazamiento disminuye y por ende la capacidad de disipación de energía aumenta.

Por último, el estudio realizado por Wang et al. (2021) trata del análisis numérico y experimental de siete modelos fabricados en acero corrugado. Los resultados de esta investigación definen curvas de histéresis estables, asimismo, se evidencia la disminución de la capacidad de carga y se deduce que la falla final de las muestras es causada por la deformación plástica que se acumula en la red corrugada.

3. Marco conceptual

3.1 Balance de energía

Ante efectos de cargas dinámicas, el objetivo de las técnicas de disipación de energía consiste en disminuir la cantidad de energía por deformación histerética. Para esto se aumenta el valor de la energía potencial (Pimiento & Salas, 2017). En una estructura al estar sometida a efectos sísmicos, las excitaciones dinámicas se pueden relacionar mediante la ecuación de balance de energía; Oviedo y Duque (2006) proponen una ecuación de energía derivada de un modelo matemático de un sistema estructural de un grado de libertad, la cual se describe en la ecuación 1:

$$E_t = E_k + E_p + E_\beta + E_H \quad (1)$$

Donde:

E_t : Energía de entrada.

E_k : Energía cinética.

E_p : Energía potencial.

E_β : Energía por amortiguamiento viscoso equivalente.

E_H : Energía por deformación histerética.

3.2 Control pasivo

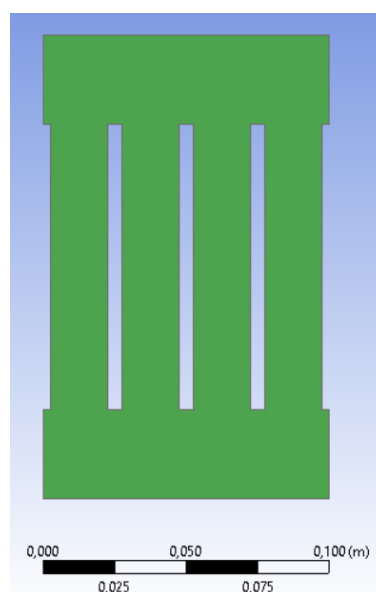
El control pasivo es una técnica de disipación de energía que no requiere de fuentes externas de energía para controlar la respuesta sísmica de las estructuras. Este sistema está constituido por diferentes tipos como aislamiento sísmico, dispositivos de disipación de energía, efecto masa adicional, entre otros. Este sistema es el menos costoso

en términos de fabricación, instalación y mantenimiento. Con relación a términos constructivos y económicos, los dispositivos de fluencia metálicos tienen mayor aplicación si se compara con otros dispositivos de disipación, pues la energía sísmica de entrada se disipa mediante deformaciones plásticas. (Askariani y Garivani, 2020)

3.3 Disipador histerético de placas ranuradas

Para aplicaciones de ingeniería sísmica, del estudio realizado por Chan y Albermani (2008), se considera que un disipador de características metálicas debe poseer dos importantes aspectos para usarse en estos fines: ser un elemento estable con alta capacidad de disipación de energía y, además, debe presentar un modelo representativo del comportamiento cíclico. De acuerdo con resultados experimentales y análisis de diferentes prototipos, se consideran a los elementos disipadores pasivos histeréticos como excelentes dispositivos para mejorar el rendimiento de las estructuras. A continuación, en la *Figura 1* se muestra un modelo de disipador histerético con ranuras.

Figura 1 Disipador histerético de placa ranuradas



Fuente: Elaboración propia usando el Software de análisis estructural, *Ansys Workbench*, (2020)

El estudio del disipador histerético metálico de placas ranuradas se ha desarrollado a lo largo de las últimas décadas. Para ello se han propuesto diferentes modelos con características que fueron evaluadas en estudios que han servido de base para las nuevas propuestas. Dentro de estos estudios se encuentran algunos como la investigación hecha por Chan y Albermani, (2008) quienes consideraron al disipador de hendidura de acero (SSD) como un dispositivo que proporciona una capacidad de disipación de energía estable y razonablemente grande, que al presentar un diseño sin soldaduras elimina incertidumbres e imperfecciones asociadas a esta.

Otro tipo de dispositivo analizado es el de ranuras múltiples (MSD). Fue desarrollado al combinar dispositivos con ranuras de acero fuertes y débiles. El funcionamiento de este dispositivo está asociado a la intensidad de los sismos en el que se consideran dos etapas de disipación de energía con diferentes fuerzas de rendimiento y rigidez. Para terremotos de baja a media intensidad, el disipador de rendija débil disipa la energía sísmica. Para terremotos más fuertes, se restringe una mayor deformación en el disipador de hendidura débil y el dispositivo de hendidura fuerte comienza a disipar la energía (Naeem y Kim, 2019).

El estudio hecho para el disipador de sección hueca cuadrada (SHS) describe un elemento de longitud corta con una placa de diafragma soldada en su interior. Bajo cargas sísmicas moderadas, el dispositivo se deforma plásticamente bajo fuerzas cortantes aplicadas, mientras que los miembros del marco permanecen esencialmente elásticos. Según los resultados experimentales, el dispositivo presenta un comportamiento histerético estable con una capacidad de disipación de energía significativa (Chan et al., 2006).

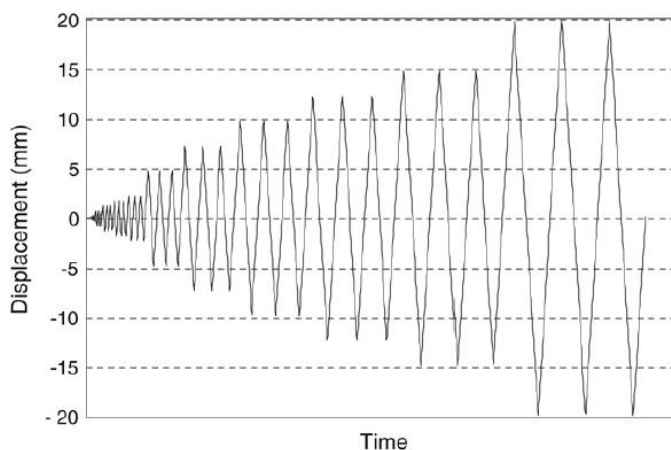
3.4 Condiciones cuasiestáticas

Para estudiar el comportamiento de los disipadores, el código FEMA 461, *Applied Technology Council* (ATC, 2007), acepta dos procedimientos con los que se espera determinar sus características de rendimiento sísmico.

3.4.1 *Quasi-static cyclic test*

En este tipo de procedimiento, los efectos sísmicos se replican mediante la aplicación cíclica lenta de cargas (o deformaciones) que sigue un patrón predeterminado. Este protocolo no es adecuado para elementos cuyo comportamiento dependa de la velocidad de aplicación de las cargas y se puede usar, entre otras cosas, para derivar las propiedades constitutivas (modelo fuerza-deformación) y datos histeréticos de componentes estructurales. En correspondencia con lo dicho, la **Figura 2** muestra un historial el cual representa el desplazamiento en función del tiempo,

Figura 2 Historial de desplazamiento para pruebas cíclicas.

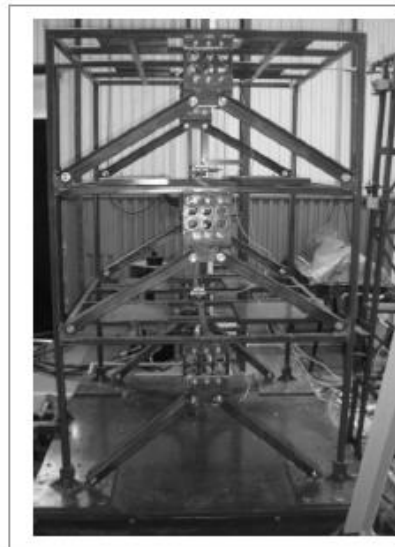


Nota: Información tomada de “*Experimental study of steel slit damper for passive energy dissipation*” Chan y Albermani (2008).

3.4.2 *Shaking table test*

Este procedimiento debe usarse para evaluar las características del comportamiento de elementos sensibles a la velocidad o sensibles a los efectos de la velocidad de deformación. Este protocolo no debe usarse si se necesitan datos de histéresis o de capacidades de deformación. A continuación, en la **Figura 3** se muestra un pórtico rehabilitado con placas ranuradas con 6 agujeros circulares expuesto en el estudio de Pimiento et al. (2014).

Figura 3 Montaje para una prueba de mesa vibratoria



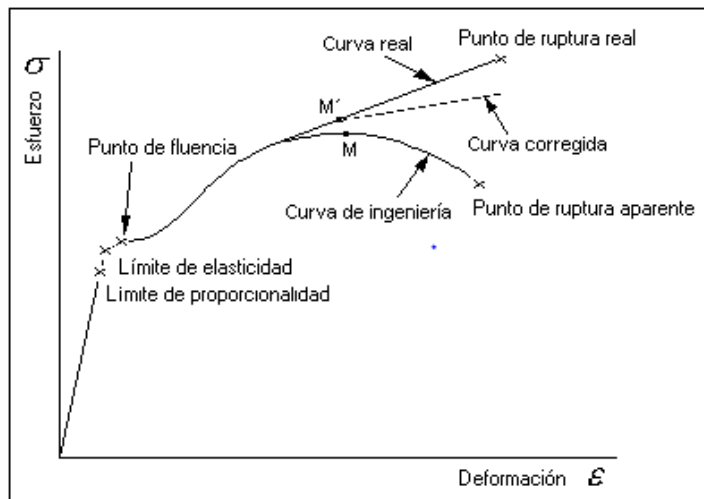
Nota: Imagen tomada de “*Desempeño sísmico de un pórtico con disipadores de energía pasivos de placas ranuradas de acero*” Pimiento et al. (2014).

3.5 Histéresis

El acero común presenta un comportamiento lineal elástico antes del punto de fluencia. Al principio trata de oponerse a la deformación y recobra su forma original, mientras la fuerza a la que se somete no exceda su límite de proporcionalidad. Luego experimenta una deformación aún elástica antes de llegar al punto de fluencia. Al llegar

a esta, el esfuerzo ha superado la capacidad y de ahí en adelante el comportamiento será plástico como se muestra en la **Figura 4**. En esta imagen se representa cómo el área bajo la curva esfuerzo-deformación de cualquier material que se lleva hasta la falla, es una medida de la capacidad del material para absorber energía por unidad de volumen.

Figura 4 Diagrama esfuerzo-deformación unitaria



Fuente: adaptación propia de Teoría 3: Solicitaciones mecánicas de los materiales. (2013)

Cuando al material se le imponen una serie de ciclos de carga, descarga y nuevamente carga, en los cuales los esfuerzos sobrepasan el límite elástico del material, se obtiene un tipo de comportamiento que se conoce con el nombre de respuesta histerética. Por lo tanto, hace referencia al comportamiento de los materiales estructurales, cuando se ven sometidos a deformaciones o esfuerzos alternantes que están fuera del rango de respuesta lineal o elástica ante una sollicitación. Gran parte de la energía que es capaz de disipar el material estructural en el rango inelástico de respuesta se asocia con el área comprendida dentro de los ciclos de histéresis.

4. Estudio paramétrico de disipadores de placas ranuradas

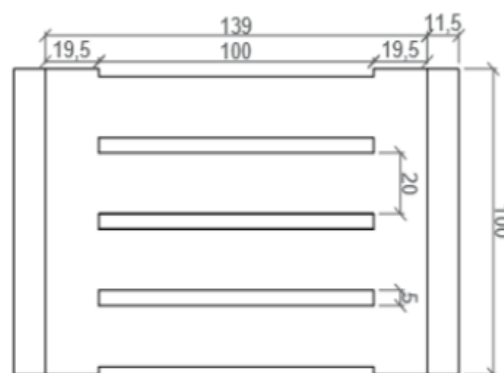
Para el desarrollo de este estudio se empleó el programa *Ansys Workbench* (Ansys Workbench, 2020); el cual es un software de análisis estructural que trabaja a través de herramientas de análisis de elementos finitos que permite resolver ecuaciones asociadas a problemas físicos e ingenieriles.

Para la simulación de los diferentes modelos se tuvo en cuenta los lineamientos teóricos sobre los materiales, para este, caso se propuso un material de tipo elástico plástico.

4.1 Validación del modelo

Para validar las técnicas de modelado numérico se usó la investigación propuesta por Ferrer y Villalba (2017) denominada *Influencia de la forma de disipadores de placas ranuradas en su capacidad de disipación de energía*. La configuración geométrica del dispositivo simulado se observa en la *Figura 5*.

Figura 5 Configuración geométrica del dispositivo simulado, dimensiones en mm



Fuente: Ferrer y Villalba (2017).

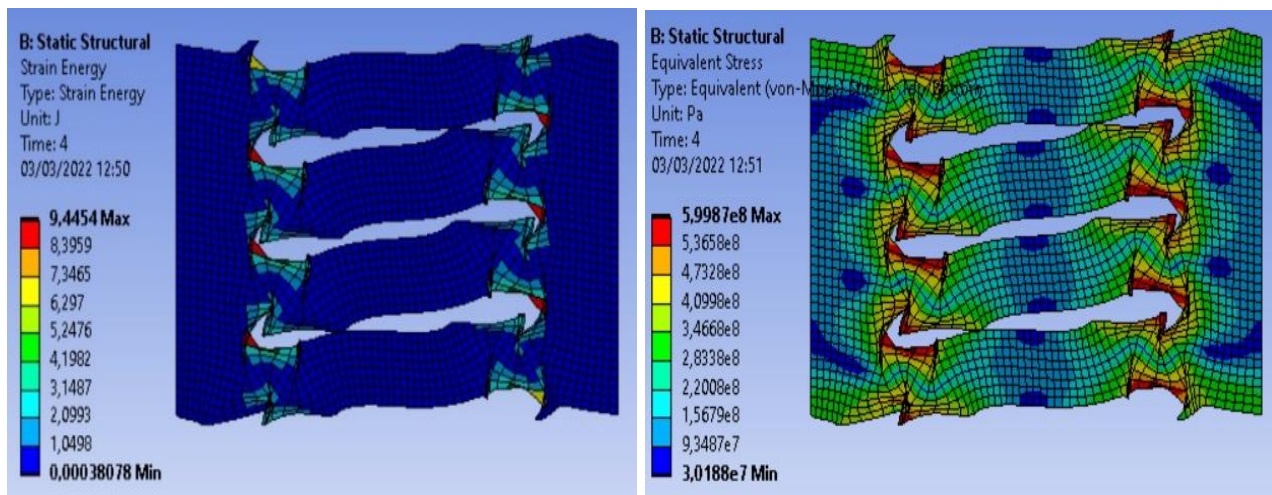
Este modelo está constituido por una lámina de acero A36 con espesor de 8 mm, las propiedades para el acero se definieron según lo planteado en el estudio de Ferrer y Villalba

(2017). De acuerdo con las características descritas en la investigación, el módulo de elasticidad, el coeficiente de Poisson y la densidad de la placa de acero son iguales a 201100 MPa, 0,30 y 7850 kg/m³ respectivamente.

Para realizar el proceso de modelado se definió una malla creada con un elemento de 5 mm de tamaño. Al obtener los resultados de la primera simulación se evidencia que no se generan errores referentes a la malla creada, razón por la cual se varía el tamaño de esta. Luego de realizar el proceso de simulación en varias ocasiones se decide usar el elemento de 2 mm para la creación de la malla.

A continuación, en la **Figura 6** se muestran los resultados obtenidos del proceso de validación para el modelo, analizando la tensión equivalente y la energía de deformación disipada por el dispositivo.

Figura 6 Resultados de la validación.



Fuente: Elaboración propia usando el Software de análisis estructural, *Ansys Workbench* (2020)

El modelo validado se simuló usando las mismas condiciones de carga y propiedades del material implementadas por Ferrer y Villalba (2017): esfuerzo de fluencia de 316,5 MPa y módulo de elasticidad de 201,1 kN/mm². El ciclo de carga fue

aplicado en dirección horizontal desplazando 10 mm para un lado, aplicando 20 mm en dirección opuesta y regresando 10 mm hasta llegar a su posición inicial. La energía disipada fue de 1109,3 J que comparada con los 1017 J calculada en el estudio de Ferrer y Villalba (2017) muestra una discrepancia entre los resultados de 9% lo que se considera aceptable para la investigación teniendo en cuenta que los software utilizados no fueron los mismos.

4.2 Simulación en *Ansys Workbench*

Una vez realizada la validación del modelo tomado como base para el estudio, se procedió con el diseño de los modelos propuestos para el estudio paramétrico. Para lograr la simulación en *Ansys Workbench* (Ansys Workbench, 2020), se inició con el reconocimiento del tipo de material apropiado para esta investigación considerando las características que se definieron para el estudio y análisis del comportamiento del disipador.

El material de acero involucrado en esta simulación de análisis no lineal bajo el método de elementos finitos adoptó un modelo de endurecimiento cinemático bilineal que relaciona los criterios de rendimiento de Von-Mises. La elección de un modelo de material constitutivo apropiado es otro paso importante para la predicción del comportamiento del material. Después de realizar la revisión literaria de acuerdo con (Chaboche y Rousselier, 1983), se logra concluir que el endurecimiento cinemático es esencial para modelar las inversiones de carga y descarga, además que predice la plasticidad asociada a la carga cíclica. Otros estudios realizados por Resapu y Perumahanthi, (2021) y Schilli et al. (2022) concluyen que, para la teoría de la plasticidad los conceptos principales de criterio de rendimiento aumento en el límite elástico de tracción, conduce a la disminución del límite elástico en compresión debido al efecto

Bauschinger, según esto consideran al endurecimiento cinemático como el modelo que puede describir este fenómeno y descartan al modelo isotrópico dado que este no logra describir dicho efecto. Del estudio realizado por Krolo et al. (2016) se define el efecto Bauschinger como la reducción del límite elástico debido a la inversión de la carga. A partir de esto para este estudio se toma como referencia los modelos de Von Mises, dado que se utilizan cuando se va a cargar un material elástico más allá del límite elástico del material buscando deformaciones plásticas.

4.2.1 Propiedades del acero

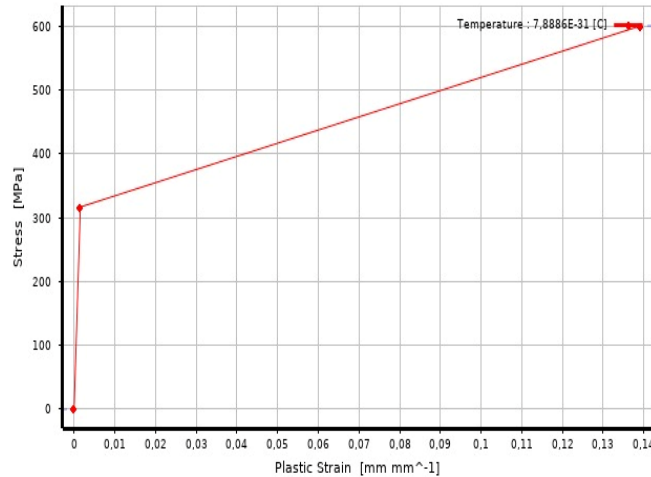
Para los dispositivos en estudio se modeló el tipo de material usando las propiedades del acero A36. Para las propiedades elásticas del material se emplean los mismos valores del modelo validado los cuales se describen en la **Tabla 2**.

Tabla 2 Propiedades del acero estructural para el estudio

ACERO ESTRUCTURAL	
Densidad	7850 (kg/m ³)
Coefficiente De Expansión Térmica	1.2x10 ⁻⁵ (c-1)
Coefficiente De Poisson	0.3
Módulo De Young	2x10 ⁵ (Mpa)
Módulo De Volumen	1.6667x10 ¹¹ (Pa)
Módulo De Corte	7.6923x10 ¹⁰ (Pa)

Fuente: elaboración propia.

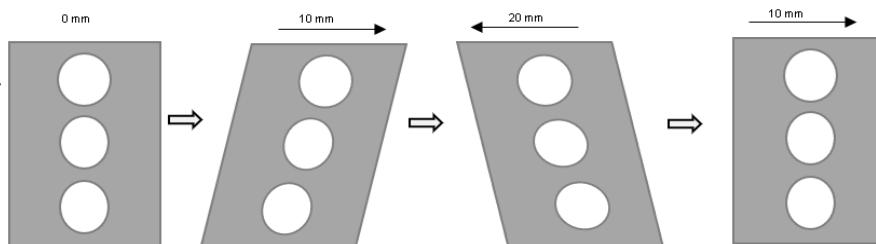
A continuación, en la **Gráfica 1** Propiedades del acero estructural para el estudio. se consolidan los datos del modelo cinemático bilineal empleado en el estudio.

Gráfica 1 Propiedades del acero estructural para el estudio.

Fuente: Elaboración propia usando el Software de análisis estructural, *Ansys Workbench* (2020).

4.2.2 Protocolo de carga

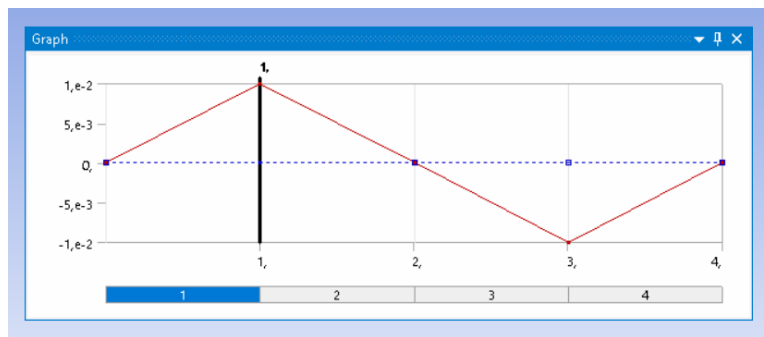
Para determinar la energía de disipación de los nuevos modelos, los dispositivos se someten a un ciclo de desplazamiento dividido en 4 etapas. En la primera, el disipador parte de un estado en reposo, para la segunda se aplica un desplazamiento horizontal de 10mm, luego en la tercera se produce un desplazamiento de 20 mm en dirección opuesta y por último se regresa a la posición inicial a través de un desplazamiento de 10mm. Las amplitudes del protocolo de carga fueron definidas de tal forma que todas las placas soportaron un mismo desplazamiento, esto con el fin de poder hacer la comparación del comportamiento de cada placa. En correspondencia con lo anterior, en la **Figura 7** se observa la representación gráfica del desplazamiento al cual se sometieron los disipadores.

Figura 7 Esquema gráfico del desplazamiento aplicado

Fuente: Elaboración propia

A continuación, en la **Gráfica 2** se muestra el protocolo de carga cíclico implementado en el software en base al desplazamiento descrito en a **Figura 7** y al empleado por Ferrer y Villalba (2017) en su estudio.

Gráfica 2 Ciclo de desplazamiento dividido en 4 etapas

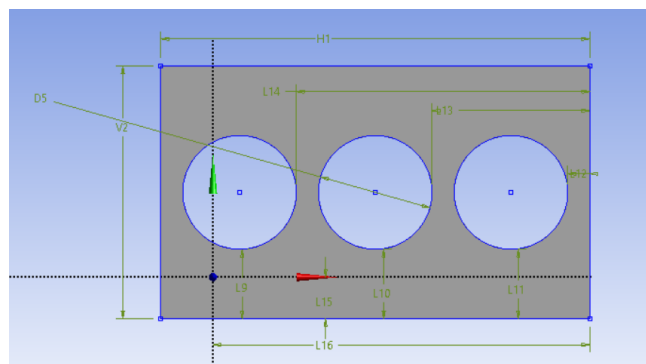


Nota: la gráfica se tomó del reporte proporcionado por el programa *Ansys Workbench* (Ansys Workbench, 2020) las introducir el protocolo de carga para el estudio del disipador.

4.3 Estudio paramétrico

Aunque existen diferentes estudios sobre disipadores de placas con ranuras circulares como el de Ferrer y Villalba (2017), son escasos los documentos en los que se indique el comportamiento de los dispositivos al variar la cantidad y distribución geométrica de las ranuras. A continuación, en la **Figura 8** se observa el modelo de disipador analizado en el estudio paramétrico.

Figura 8 Modelo de disipador de ranuras circulares.



Fuente: Elaboración propia usando el Software de análisis estructural, *Ansys Workbench* (2020)

Para el análisis del comportamiento histerético de los disipadores metálicos con ranuras circulares, se definen tres parámetros variables los cuales son: localización, diámetro de la ranura y relación de aspecto de la placa. Para conservar un criterio de comparación de resultados, todos los dispositivos se modelaron teniendo la misma cantidad de material. Considerados los parámetros mencionados anteriormente, se hizo uso del software *Minitab* (Minitab, 2021) para realizar el análisis de experimento factorial. Para ello, se establecieron tres variables con tres niveles descritos así: para el tamaño de las ranuras (pequeño, mediano y grande), para la relación de aspecto de la placa (bajo, medio y alto) y para la localización de los orificios (h1, h2 y h3) lo que originó un experimento factorial bajo las características de un modelo completo 3^3 . La información obtenida de este estudio se consignada en la **Tabla 3**

Tabla 3 Diseño del experimento factorial 3^3

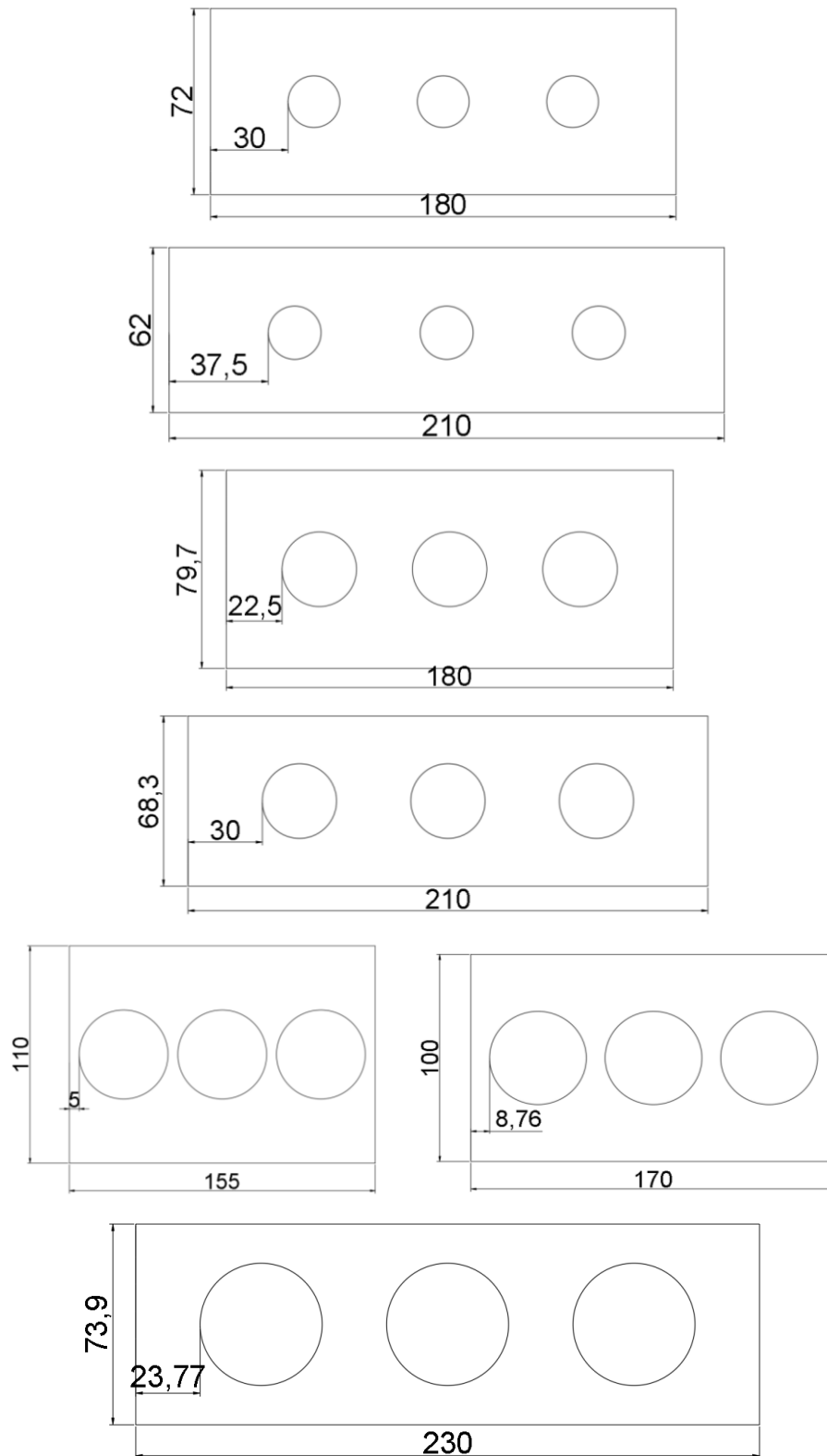
Resumen del diseño	
Factores	3
Réplicas	1
Corridas base	27
Total de corridas	27
Bloques base	1
Total de bloque	1

Fuente: elaboración propia

4.4 Modelos para analizar

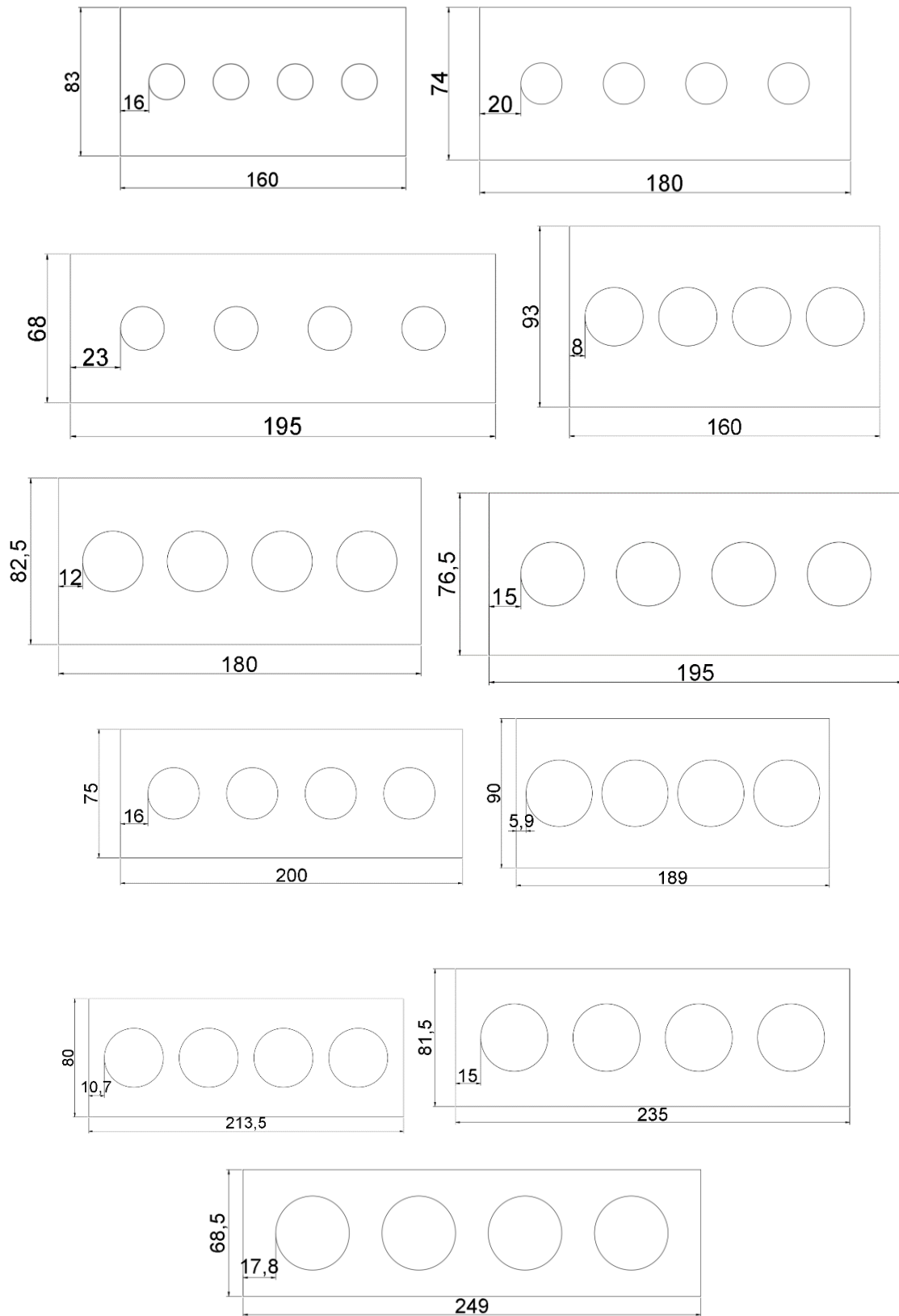
Con base en la información obtenida el experimento factorial, a continuación, en las **Figura 9**, **Figura 10** y **Figura 11** se establecen los 27 dispositivos y sus respectivas dimensiones.

Figura 9 Configuraciones de los disipadores en estudio con 3 ranuras, dimensiones en mm.



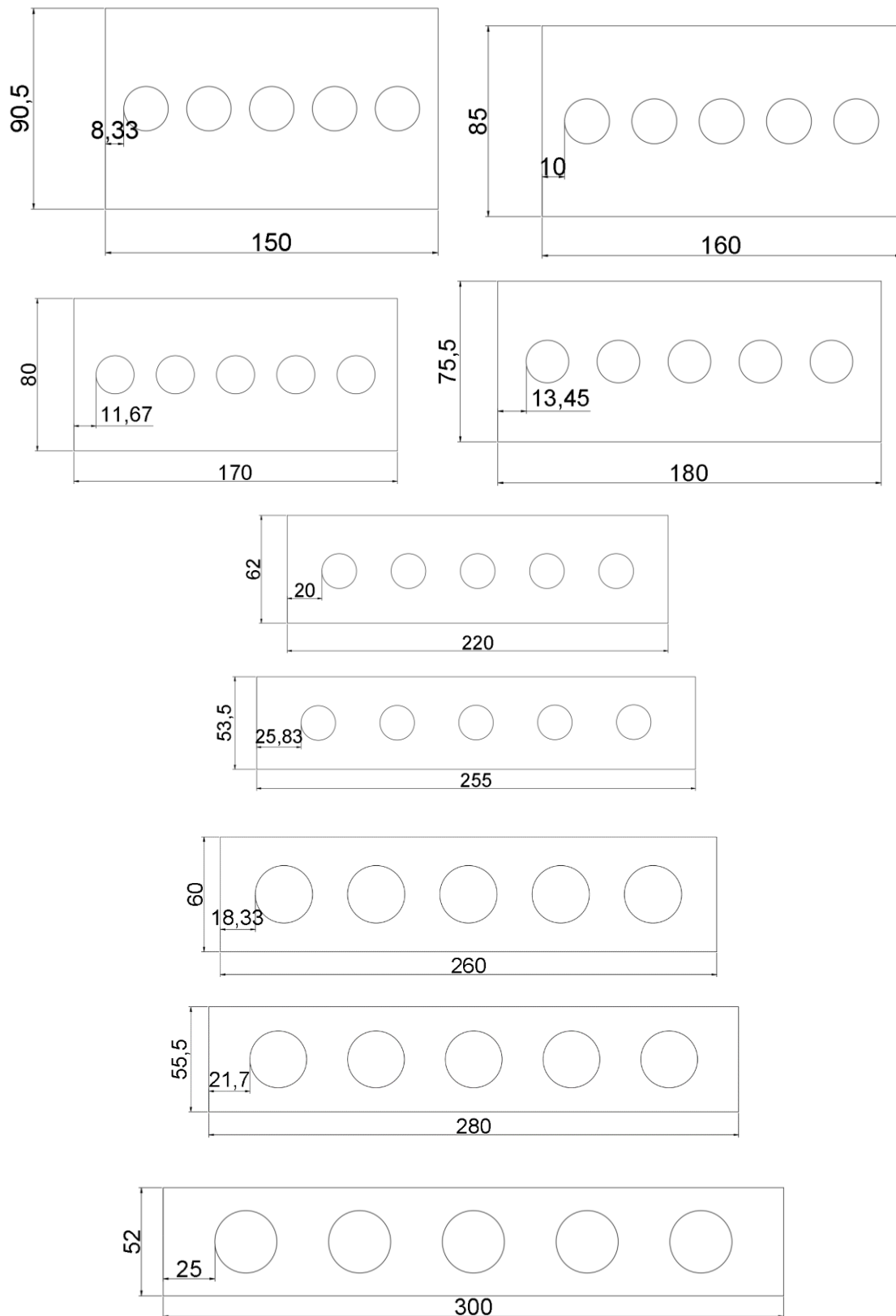
Fuente: elaboración propia.

Figura 10 Configuraciones de los disipadores en estudio con 4 ranuras, dimensiones en mm.



Fuente: elaboración propia.

Figura 11 Configuraciones de los disipadores en estudio con 5 ranuras, dimensiones en mm.

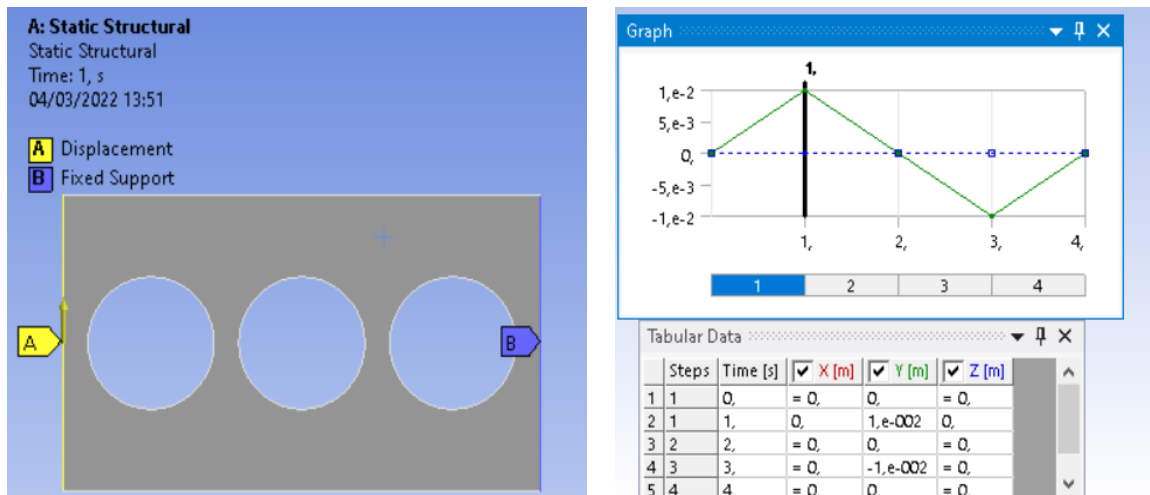


Fuente: elaboración propia.

5. Análisis de resultados

Los prototipos fueron sometidos a un único ciclo de carga y descarga siguiendo el patrón de desplazamiento de acuerdo con el esquema presentado en la **Figura 7**; a continuación, en la **Figura 12**, se muestra la configuración simulada en el software, indicando las condiciones de soporte y carga que se introdujeron para llevar a cabo el estudio de los disipadores.

Figura 12 Modelo de disipador de ranuras circulares y protocolo de carga utilizado para la simulación.



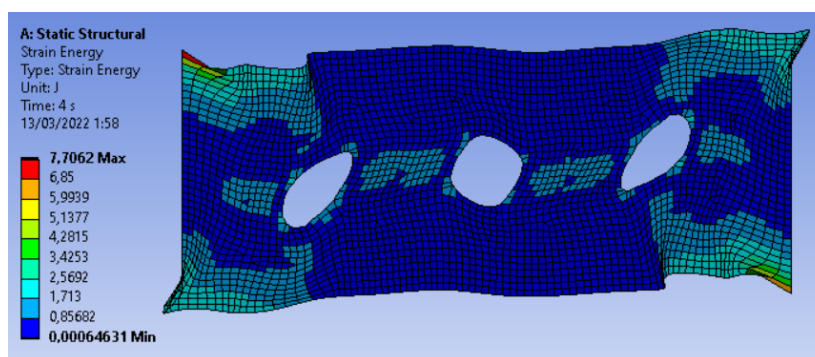
Fuente: Elaboración propia Interfaz de simulación geométrica del software *Ansys Workbench* (2020).

Registrando las variaciones en los parámetros establecidos en el alcance del proyecto y con base en la información obtenida del experimento factorial, en las **Tabla 4**, **Tabla 5** y **Tabla 6** se establecen los 27 dispositivos con sus respectivas dimensiones y, además, se registran los resultados obtenidos en el estudio.

Tabla 4 Resultados obtenidos para disipadores con 3 ranuras circulares

N°	Ancho (mm)	Alto (mm)	Relación de aspecto	Ranuras		Energía Disipada (J)
				Número de ranuras	Radio de la ranura (mm)	
1	180	72	2,50	3	10	1871,9
2	210	62	3,39	3	10	1143,9
3	180	79,7	2,26	3	15	1833,1
4	210	68,3	3,07	3	15	1201,2
5	155	110	1,41	3	22,5	1582
6	170	100	1,70	3	22,5	1412,9
7	230	73,9	3,11	3	22,5	851,54

Fuente: Elaboración propia.

Figura 13 Disipador analizado en el estudio para 3 ranuras circulares con mayor energía disipada (1871,9 J)

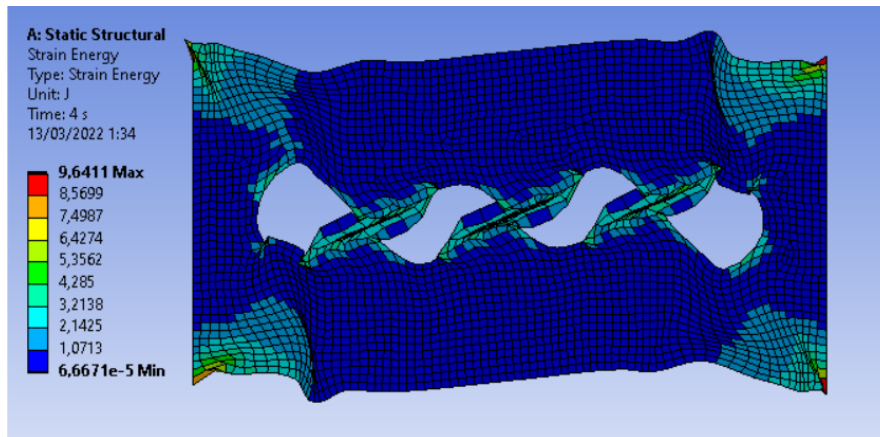
Fuente: Ansys Workbench (2020)

Tabla 5 Resultados obtenidos para disipadores con 4 ranuras circulares

N°	Ancho (mm)	Alto (mm)	Relación de aspecto	Ranuras		Energía Disipada (J)
				Número de ranuras	Radio de la ranura (mm)	
8	160	83	1,93	4	10	2456,1
9	180	74	2,43	4	10	1846,9
10	195	68	2,87	4	10	1455,3
11	160	93	1,72	4	15	1834,6
12	180	82,5	2,18	4	15	1557,3
13	195	76,5	2,55	4	15	1376
14	200	75	2,67	4	15	1320,3
15	189	90	2,10	4	20	900,79
16	213,5	80	2,67	4	20	915,61
17	235	81,5	2,88	4	20	1028,9
18	249	68,5	3,64	4	20	680,74

Fuente: Elaboración propia.

Figura 14 Disipador analizado en el estudio para 4 ranuras circulares con mayor energía disipada (2456,1 J)



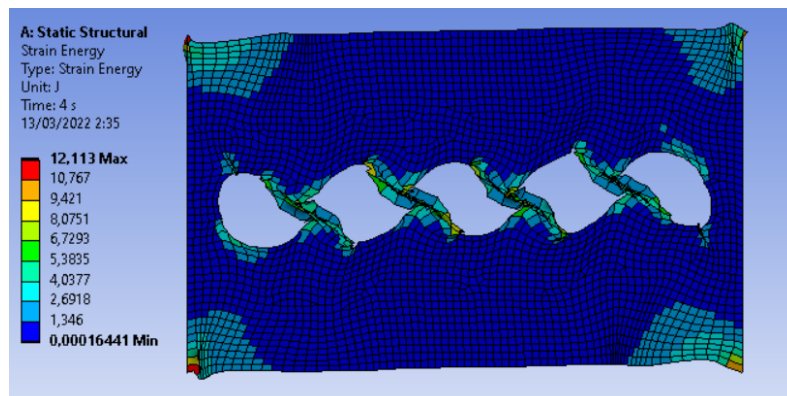
Fuente: Ansys Workbench (2020)

Tabla 6 Resultados obtenidos para disipadores con 5 ranuras circulares

N°	Ancho (mm)	Alto (mm)	Relación de aspecto	Ranuras		Energía Disipada (J)
				Número de ranuras	Radio de la ranura (mm)	
19	150	90,5	1,66	5	10	2483,8
20	160	85	1,88	5	10	2215,1
21	170	80	2,13	5	10	1971,1
22	180	75,5	2,38	5	10	1742,7
23	220	62	3,55	5	10	995,42
24	255	53,5	4,77	5	10	574,57
25	260	60	4,33	5	15	590,95
26	280	55,5	5,05	5	15	436,57
27	300	52	5,76	5	15	330,11

Fuente: Elaboración propia.

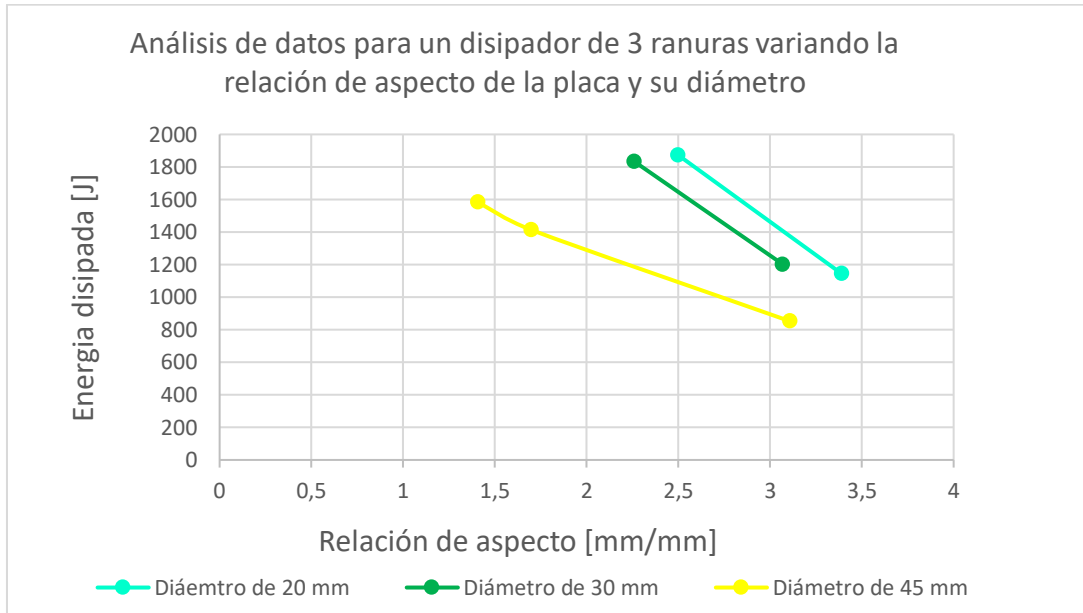
Figura 15 Disipador analizado en el estudio para 5 ranuras circulares con mayor energía disipada (2483,8 J)



Fuente: Ansys Workbench (2020)

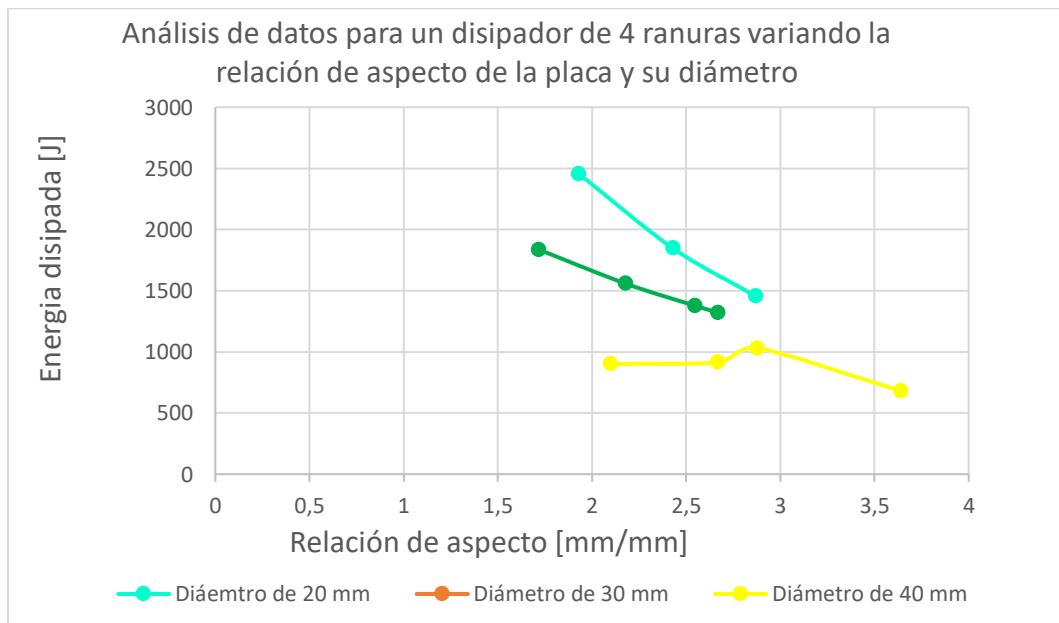
Luego de presentar los resultados del estudio numérico, estos se revisan, comparan y analizan generando las siguientes observaciones:

Gráfica 3 Análisis de datos para un disipador de 3 ranuras variando la relación de aspecto de la placa y su diámetro



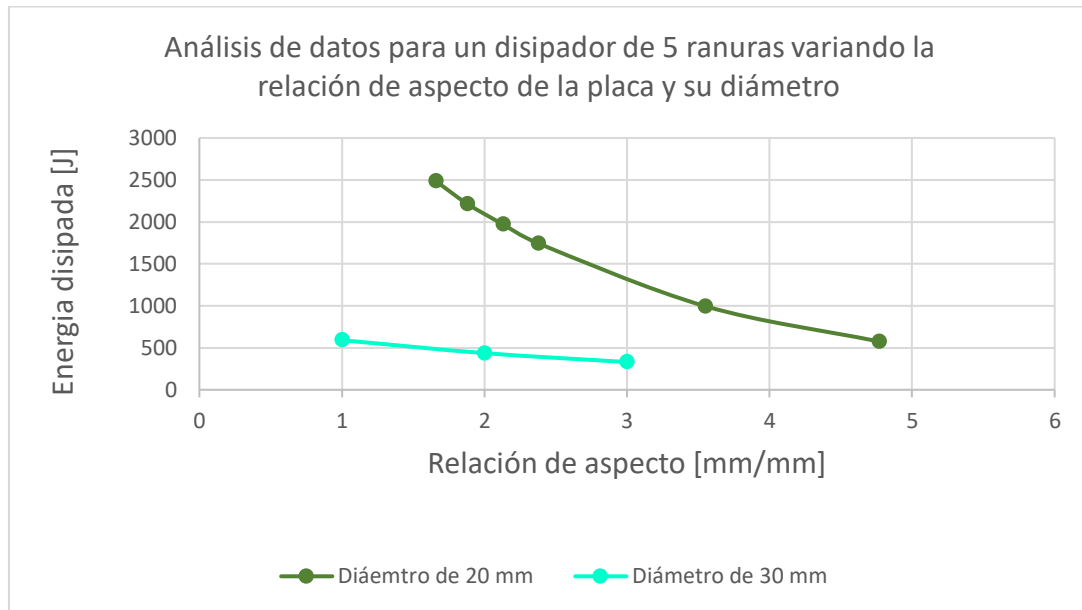
Fuente: Elaboración Propia.

Gráfica 4 Análisis de datos para un disipador de 4 ranuras variando la relación de aspecto de la placa y su diámetro



Fuente: Elaboración Propia.

Gráfica 5 Análisis de datos para un disipador de 5 ranuras variando la relación de aspecto de la placa y su diámetro



Fuente: Elaboración Propia.

En las **Gráfica 3**, **Gráfica 4** y **Gráfica 5** se evidencia la relación entre la energía disipada por cada uno de los dispositivos y la relación de aspecto de la placa.

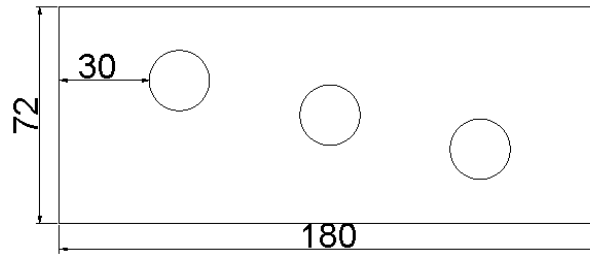
Profundizando más el comportamiento en los disipadores propuestos en el estudio, se modificó la distribución de las ranuras para los tres disipadores con mayor capacidad de disipación de energía siendo estos los N°1, N°8 y N°19 obteniendo los resultados que se muestran en la **Tabla 7**:

Tabla 7 Resultados obtenidos modificando la distribución de ranuras

N°	Ancho (mm)	Alto (mm)	Relación de aspecto	Ranuras		Energía Disipada (J)
				Número de ranuras	Radio de la ranura (mm)	
1	180	72	2,50	3	10	1871,9
	180	72	2,50	3	10	1887,5
	180	72	2,50	3	10	1897,1
8	160	83	1,93	4	10	2456,1
	160	83	1,93	4	10	2559,8
19	150	90,5	1,66	5	10	2483,8

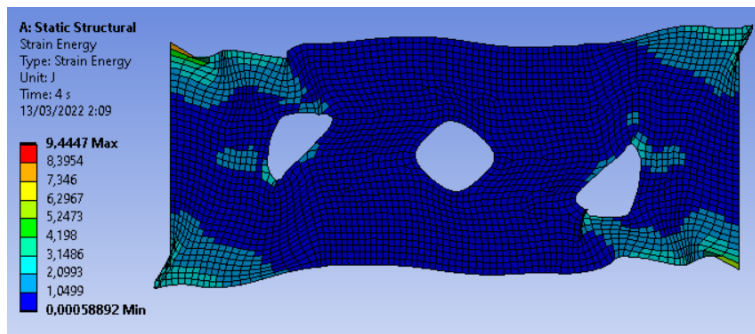
Fuente: Elaboración propia.

Figura 16 Configuración del dispositivo con mayor disipación de energía con 3 ranuras variando la ubicación de los orificios en forma oblicua, dimensiones en mm.



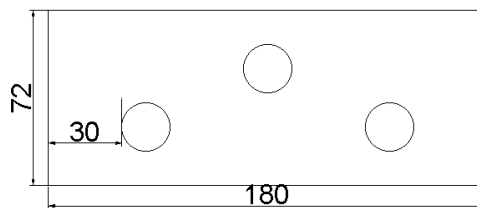
Fuente: elaboración propia.

Figura 17 Disipador analizado en el estudio para 3 ranuras circulares variando la ubicación de los orificios en forma oblicua. Energía disipada (1887,5 J)



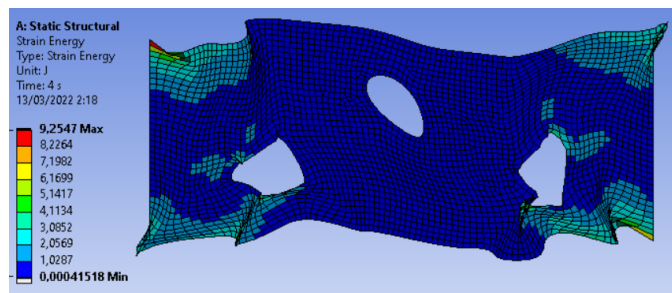
Fuente: Ansys Workbench (2020)

Figura 18 Configuración del dispositivo con mayor disipación de energía con 3 ranuras variando la ubicación de los orificios, dimensiones en mm.



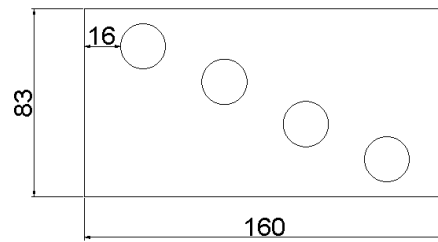
Fuente: elaboración propia.

Figura 19 Disipador analizado en el estudio para 3 ranuras circulares variando la ubicación de los orificios. Energía disipada (1897,1 J)



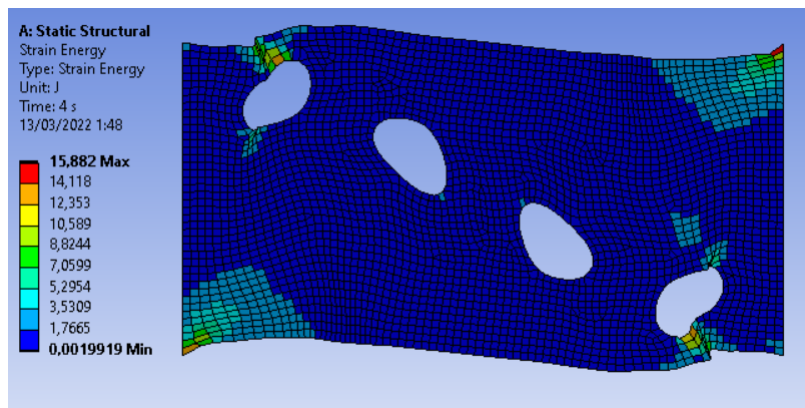
Fuente: Ansys Workbench (2020)

Figura 20 Configuración del dispositivo con mayor disipación de energía con 4 ranuras variando la ubicación de los orificios en forma oblicua, dimensiones en mm.



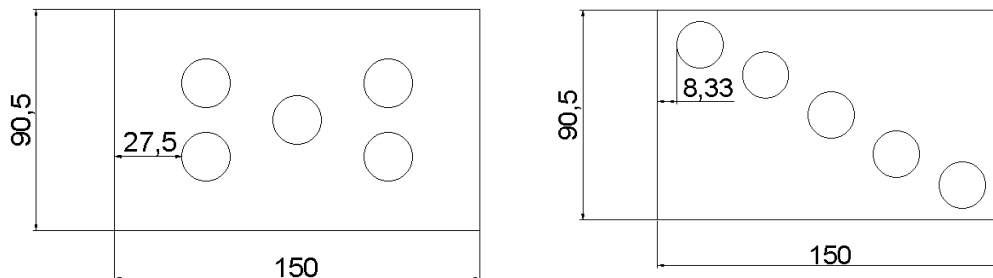
Fuente: elaboración propia.

Figura 21 Disipador analizado en el estudio para 4 ranuras circulares variando la ubicación de los orificios en forma oblicua. Energía disipada (2559,8 J)



Fuente: Ansys Workbench (2020)

Figura 22 Configuración del dispositivo con mayor disipación de energía con 5 ranuras variando la ubicación de los orificios, dimensiones en mm.



Fuente: elaboración propia.

Para la comparación de los dispositivos de 5 ranuras, la concentración de esfuerzos entre los orificios dispuestos en la placa es muy alta y el sistema se vuelve inestable.

Conclusiones

De acuerdo con lo desarrollado a lo largo de todo el trabajo de investigación, se puede concluir lo siguiente:

Fue posible desarrollar los 27 modelos calculados a partir del análisis factorial realizado, algunos de los disipadores propuestos inicialmente fueron sustituidos por dispositivos que se ajustaron al modelamiento requerido por *Ansys Workbench* ya que los primeros mostraron sistemas de inestabilidad impidiendo su modelamiento.

La capacidad de disipación de energía de los disipadores histeréticos metálicos con ranuras circulares presentan una disminución al aumentar la relación de aspecto de la placa de los dispositivos estudiados tal como se observa en las **Gráfica 3**, **Gráfica 4** y **Gráfica 5**. Los dispositivos que tenían una dimensión de la base mayor al 60% en comparación con la altura ofrecieron menor capacidad de disipación de energía ya que no permitían que el dispositivo realizará grandes desplazamientos. Al analizar las variaciones en las dimensiones de las ranuras de los disipadores se observó que estos presentaban una relación inversa ya que, a menor radio, mayor fue la energía disipada por el dispositivo. Y en cuanto a la cantidad de orificios, en las ranuras con diámetro pequeño, la relación que presentaron los disipadores fue directa ya que al aumentar la cantidad de ranuras la capacidad de disipación también lo hacía.

Las variables establecidas en la investigación fueron parametrizadas para realizar el estudio y se evaluaron dentro de los siguientes rangos, para el radio de la ranura se trabajó con valores entre 10 mm y 22,5 mm y, para la relación de aspecto de la placa se estableció un mínimo de 1,41 y un máximo de 5,76. El factor de la relación de aspecto fue ajustado

para lograr mantener un volumen en los dispositivos cumpliendo con el alcance de la investigación.

Se evidencia que la forma geométrica de la ranura influye en la capacidad de disipación de energía. Dado esto, se considera a las ranuras circulares como aquellas que logran tener mayor capacidad de disipación; ahora bien, al comparar los resultados numéricos obtenidos en esta investigación con los de Ferrer y Villalba (2017), de los dispositivos modelados y evaluados en este análisis, se obtiene que la mayor disipación de energía está en relación con el modelo de 5 ranuras circulares con un diámetro de 20 mm disipando 2483,8 J mientras que el estudiado por Ferrer y Villalba (2017) caracterizado por 12 ranuras de 14,6 mm de diámetro logró disipar 2910 J.

En relación con la distribución de las ranuras, no es conveniente poner todos los orificios sobre una sola fila ya que los esfuerzos se concentran en el material entre ranuras. Con los resultados obtenidos para los disipadores con 5 orificios, se evidencia la disminución de energía disipada en comparación con los disipadores de 4 ranuras. Además, al analizar la redistribución de las ranuras propuestas para los dispositivos con mayor capacidad de disipación de energía inicial tal como se muestra en la **Tabla 7** concluimos que la localización mejoro el comportamiento de los dispositivos ya que en los disipadores de tres ranuras el aumento fue de 15,6 J y 25,2 J y para el dispositivo de 4 ranuras el aumento fue de 103,7 J en la capacidad de disipación de energía.

A partir de los resultados obtenidos en la investigación y evaluando el comportamiento que tuvieron los dispositivos en concordancia con algunas variables, se concluye que el parámetro que mayor incidencia ejerce en la capacidad de disipación de

ESTUDIO PARAMÉTRICO DEL COMPORTAMIENTO DE DISIPADORES

energía de los disipadores histeréticos metálicos con ranuras circulares es la relación de aspecto de la placa.

Referencias bibliográficas

- Ahmadie Amiri, H., Najafabadi, E. P., & Estekanchi, H. E. (2018). Experimental and analytical study of Block Slit Damper. *Journal of Constructional Steel Research*, 141, 167–178. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr>
- Ansys Workbench (2020 R1). (2020). [Software de Modelamiento Estructural]. Ansys. <https://www.ansys.com/products/release-highlights>
- Arcila, M. García, J., Montejo, J., Eraso, J., Valcarcel, J., Mora, M., Viganò, D., Pagani, M. y Díaz, F. (2020). Modelo nacional de amenaza sísmica para Colombia. Bogotá: Servicio Geológico Colombiano y Fundación Global Earthquake Model. <https://doi.org/10.32685/9789585279469>
- Askariani, S. S., & Garivani, S. (2020). Introducing and numerical study of a new brace-type slit damper. *Structures*, 27, 702-717. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.06.019>
- ATC (2007). Interim Testing Protocols for Determining the Seismic Performance Characteristics of Structural and Nonstructural Components, FEMA-461, Prepared by the Applied Technology Council 201 Redwood Shores Parkway, Suite 240 Redwood City, California 94065 www.ATCCouncil.org.
- CAP. (2010). Comisión Asesora Permanente para el Régimen de Construcciones Sismo Resistentes, Reglamento Colombiano de construcción Sismo Resistente NSR-10: Título A requisitos generales de diseño y construcción sismo resistente. Bogotá: AIS, 2010
- Chaboche, J. (1989) Constitutive equations for cyclic plasticity and cyclic viscoplasticity. *International Journal of Plasticity*, Vol 5 N°3, pp. 247–302, [https://doi.org/10.1016/0749-6419\(89\)90015-6](https://doi.org/10.1016/0749-6419(89)90015-6)

- Chan, R. W. K., & Albermani, F. (2008). Experimental study of steel slit damper for passive energy dissipation. *Engineering Structures*, 30(4), 1058-1066. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2007.07.005>
- Chan, R. W. K., Albermani, F., & Kitipornchai, S. (2013). Experimental study of perforated yielding shear panel device for passive energy dissipation. *Journal of Constructional Steel Research*, 91, 14-25. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2013.08.013>
- Chan, R. W. K., Albermani, F., & Williams, M. S. (2006), Yielding shear panel device for passive energy dissipation, 19th Australasian Conference on the Mechanics of Structures and Materials At: Christchurch.
- Chan, R. W. K., Albermani, F., & Williams, M. S. (2009). Evaluation of yielding shear panel device for passive energy dissipation. *Journal of Constructional Steel Research*, 65(2), 260-268. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2008.03.017>
- Chile estableció la NCH 2745 “Análisis y Diseño de Edificios con Aislación sísmica” y México propuso la Norma Técnica Complementaria para Diseño por Sismo avalada por la SMIE.
- Colunga, A. T., y Contreras, A. G. (2017). Determinación De Parámetros De Diseño Sísmico Para Marcos Dúctiles De Concreto Reforzado Con Disipadores De Energía Histeréticos. *Revista Sul-americana de Engenharia Estrutural*, 14(1), 36-58. <https://doi.org/10.5335/rsae.v14i1.6496>
- Estudio General de Amenaza Sísmica de Colombia 2009, Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica–AIS, (2009). Comité AIS-300, 2010.
- Ferrer, S., y Villalba, J. (2017). Influencia de la forma de disipadores de placas ranuradas en su capacidad de disipación de energía, VIII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica

organizado por la Universidad del Norte y la Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica. Congreso llevado a cabo en Barranquilla, Colombia.

Ghabraie, K., Chan, R., Huang, X., & Xie, Y. M. (2010). Shape optimization of metallic yielding devices for passive mitigation of seismic energy. *Engineering Structures*, 32(8), 2258-2267. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2010.03.028>

Kunisue, A., Koshika, N., Kurokawa, Y., Suzuki, N., Agami, J., & Sakamoto, M. (Eds.). (2000). *Retrofitting Method Of Existing Reinforced Concrete Buildings Using Elasto-Plastic Steel Dampers (Vol. 2)*. New Zealand Society for Earthquake Engineering.

Lee, C. H., Ju, Y. K., Min, J. K., Lho, S. H., & Kim, S. D. (2015). Non-uniform steel strip dampers subjected to cyclic loadings. *Engineering Structures*, 99, 192–204. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2015.04.052>

López, A., Navarro, D., y Rosado., E (2014). Análisis De Estructuras De Concreto Reforzado Considerando Fatiga De Bajos Ciclos, XIX Congreso Nacional de Ingeniería Estructural, organizado por la Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural Congreso llevado a cabo en Puerto Vallarta, México.

Ma, X., et al., (2010) Design and behavior of steel shear plates with openings as energy-dissipating fuses. John A. Blume Earthquake Engineering Center Technical Report, (173).

Mendoza, A., y Tirado, K. (2018). *Determinación Numérica Del Comportamiento Histerético De Disipadores De Placas Ranuradas (Tesis de pregrado)*. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga.

México. Departamento del Distrito Federal. 2004 Reglamento de construcciones para el Distrito Federal y sus Norma Técnica Complementaria NTC, (2004) para Diseño por sismo, Diseño Sísmico de Edificios.

Minitab, LLC (2021). (Software estadístico). <https://www.minitab.com>

Naeem, A., & Kim, J. (2019). Seismic performance evaluation of a multi-slit damper. *Engineering Structures*, 189, 332-346. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.03.107>

NCh2745 (2003) Norma chilena 2745 “Análisis y diseño de edificios con aislación sísmica”

Oh, S.-H., Kim, Y.-J., & Ryu, H.-S. (2009). Seismic performance of steel structures with slit dampers. *Engineering Structures*, 31(9), 1997-2008. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2009.03.003>

Oviedo, J., y Duque, M. (2006). Sistemas De Control De Respuesta Sísmica En Edificaciones. *Revista EIA*, 6, 105-120. <https://www.researchgate.net/journal/Revista-EIA-1794-1237>

Oviedo, J., y Duque, M. (2009a). Disipadores Histeréticos Metálicos Como Técnica De Control De Respuesta Sísmica En Edificaciones Colombianas. *Escuela de Ingeniería de Antioquia, EIA*, 11, 51-63. <https://www.researchgate.net/journal/Revista-EIA-1794-1237>

Oviedo, J., y Duque, M. (2009b). Situación De Las Técnicas De Control De Respuesta Sísmica En Colombia. *Revista Escuela de Ingeniería de Antioquia, EIA*, 12, 113-125. <https://www.researchgate.net/journal/Revista-EIA-1794-1237>

Pimiento, J., Salas, A., y Ruiz, D. (2014). Desempeño sísmico de un pórtico con disipadores de energía pasivos de placas ranuradas de acero. *Revista ingeniería de construcción*, 29(3), 283-298. <https://doi.org/10.4067/s0718-50732014000300005>

- Resapu, R. R., & Perumahanthi, L. R. (2021). Numerical study of bilinear isotropic & kinematic elastic–plastic response under cyclic loading. *Materials Today: Proceedings*, Vol 39, pp.1647–1654, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.05.812>
- Saffari, H., Hedayat, A. A., & Nejad, M. P. (2013). Post-Northridge connections with slit dampers to enhance strength and ductility. *Journal of Constructional Steel Research*, 80, 138-152. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2012.09.023>
- Sánchez Badillo, A., y Terán Gilmore, A. (2008). Diseño Por Desempeño De Estructuras Dúctiles De Concreto Reforzado Ubicadas En La Zona Del Lago Del Distrito Federal: Ejemplo De Aplicación. *Revista de Ingeniería Sísmica*, 78, 47. <https://doi.org/10.18867/ris.78.23>
- Schilli, S., Seifert, T., Kreins, M., & Krupp, U. (2022) Bauschinger effect and latent hardening under cyclic micro-bending of Ni-base Alloy 718 single crystals: Part II. Single crystal plasticity modeling with latent kinematic hardening. *Materials Science and Engineering*: Vol 830, 142030, <https://doi.org/10.1016/j.msea.2021.142030>
- Teoria 3: Solicitaciones mecánicas de los materiales*. (2013, 26 octubre). Ruben G. Frade. <https://fradeblogs.wordpress.com/2013/10/30/teoria-3-solicitaciones-mecanicas-de-los-materiales/>
- Wang, W., Song, J. L., Su, S. Q., Cai, H. L., & Zhang, R. F. (2021). Experimental and numerical studies of an axial tension-compression corrugated steel plate damper. *Thin-Walled Structures*, 163, 107498. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2021.107498>
- Zengah, S., Aid, A., & Benguediab, M. (2013). *Comparative Study of Fatigue Damage Models Using Different Number of Classes Combined with the Rainflow Method*. *Engineering, Technology & Applied Science Research*, 3(3), 446-451. <https://doi.org/10.48084/etasr.325>