

# UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO



## FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL Y MECÁNICA

### MAESTRIA EN INGENIERIA CIVIL

---

**Tema:** “Análisis de amortiguadores híbridos utilizados en estructuras metálicas de edificaciones de mediana altura para mejorar su respuesta a cargas sísmicas”

---

Trabajo de titulación previo a la obtención del grado académico de Magister en Ingeniería Civil con Mención en Estructuras Metálicas

**Modalidad del Trabajo:** Proyecto de titulación con componentes de Investigación Aplicada y/o de Desarrollo

**Autor:** Ing. Mario Hernán Jaya Guanoluisa

**Director:** Ing. César Hernán Arroba Arroba, Mg.

Ambato – Ecuador

2023

A la unidad Académica de Titulación de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica.

El Tribunal receptor de la Defensa del Trabajo de Titulación presidido por Ing. Wilson Santiago Medina Robalino, Mg., e integrado por los señores: Ing. Wladimir José Ramírez Cabrera, Mg. e Ing. José Luis Yunapanta Velastegui, Mg., designados por la Unidad Académica de Titulación de la Universidad Técnica de Ambato, para receptor el Trabajo de Titulación con el tema: “ANÁLISIS DE AMORTIGUADORES HÍBRIDOS UTILIZADOS EN ESTRUCTURAS METÁLICAS DE EDIFICACIONES DE MEDIANA ALTURA PARA MEJORAR SU RESPUESTA A CARGAS SÍSMICAS”, elaborado y presentado por el señor, Ing. Mario Hernán Jaya Guanoluisa, para optar por el Título de cuarto nivel de Magister en Ingeniería Civil con Mención en Estructuras Metálicas; una vez escuchada la defensa oral del Trabajo de Titulación el Tribunal aprueba y remite el trabajo para uso y custodia en las bibliotecas de la UTA.



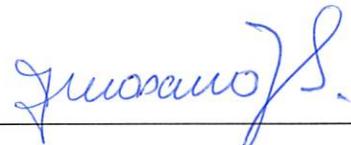
---

Ing. Wilson Santiago Medina Robalino, Mg.  
Presidente y Miembro del Tribunal



---

Ing. Wladimir José Ramírez Cabrera, Mg.  
Miembro del Tribunal



---

Ing. José Luis Yunapanta Velastegui, Mg.  
Miembro del Tribunal

## AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

La responsabilidad de las opiniones, comentarios y críticas emitidas en el Trabajo de Titulación, presentado con el tema: ANÁLISIS DE AMORTIGUADORES HÍBRIDOS UTILIZADOS EN ESTRUCTURAS METÁLICAS DE EDIFICACIONES DE MEDIANA ALTURA PARA MEJORAR SU RESPUESTA A CARGAS SÍSMICAS, le corresponde exclusivamente a: Ing. Mario Hernán Jaya Guanoluisa, Autor bajo la Dirección del Ing. César Hernán Arroba Arroba, Mg. Director del Trabajo de Titulación, y el patrimonio intelectual a la Universidad Técnica de Ambato.



Ing. Mario Hernán Jaya Guanoluisa

c.c.: 0502560915

**AUTOR**



Ing. César Hernán Arroba Arroba, Mg.

c.c.: 1803011277

**DIRECTOR**

## **DERECHOS DE AUTOR**

Autorizo a la Universidad Técnica de Ambato, para que el Trabajo de Titulación, sirva como un documento disponible para su lectura, consulta y procesos de investigación, según las normas de la Institución.

Cedo los Derechos de mi trabajo, con fines de difusión pública, además apruebo la reproducción de este, dentro de las regulaciones de la Universidad Técnica de Ambato.



Ing. Mario Hernán Jaya Guanoluisa

c.c.: 0502560915

**AUTOR**

## ÍNDICE GENERAL

PORTADA.....	i
A la unidad Académica de Titulación de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica. .....	ii
AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN .....	iii
DERECHOS DE AUTOR .....	iv
ÍNDICE GENERAL .....	v
ÍNDICE DE TABLAS .....	viii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	x
DEDICATORIA .....	xii
AGRADECIMIENTO .....	xiii
RESUMEN EJECUTIVO .....	xiv
EXECUTIVE SUMMARY.....	xvi
CAPÍTULO I.....	1
EL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN.....	1
1.1.    Introducción.....	1
1.2.    Justificación.....	1
1.3.    Objetivos .....	3
1.3.1.    Objetivo General.....	3
1.3.2.    Objetivos Específicos .....	3
CAPÍTULO II .....	4
ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS .....	4
CAPÍTULO III.....	17
MARCO METODOLÓGICO .....	17
3.1.    Ubicación.....	17
3.2.    Equipos y materiales.....	17

3.2.1.	Equipos para el análisis computacional.....	17
3.3.	Tipo de investigación .....	17
3.4.	Población o muestra: .....	18
3.4.1.	Identificación de los modelos de amortiguadores .....	19
3.5.	Hipótesis - pregunta científica – idea a defender .....	20
3.5.1.	Operacionalización de variables .....	20
3.6.	Recolección de información:.....	22
3.7.	Procesamiento de la información y análisis estadístico .....	22
3.7.1.	Curvas de histéresis .....	22
3.7.2.	Estadístico T-Student.....	23
3.7.3.	Modelo de elementos finitos.....	24
3.7.4.	Materiales .....	24
3.7.4.1.	Materiales asignados en la simulación.....	25
3.7.5.	Configuración del edificio de mediana altura – carga reactiva .....	28
3.7.6.	Modelamiento de superficies en contacto.....	34
3.8.	Variables respuesta o resultados esperados.....	35
CAPÍTULO IV.....		36
RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....		36
4.1.	Configuraciones de amortiguadores híbridos.....	36
4.2.	Evaluación del desempeño de los amortiguadores híbridos.....	40
4.2.1.	Amortiguador de rendija de placas interconectadas. ....	41
4.2.1.1.	Esfuerzo equivalente de Von Mises.....	41
4.2.1.2.	Deformaciones. ....	43
4.2.1.3.	Datos de histéresis para el amortiguador de placas interconectadas....	46
4.2.1.4.	Curva de histéresis del amortiguador de placas interconectadas .....	47
4.2.2.	Amortiguador de placa con rendija y brazos de soporte.....	48

4.2.2.1.	Esfuerzo equivalente de Von Mises.....	48
4.2.2.2.	Deformaciones .....	51
4.2.2.3.	Datos de histéresis del amortiguador. ....	53
4.2.2.4.	Curva histerética del amortiguador de placa con rendija y brazo de soporte. 54	
4.2.3.	Amortiguador hibrido de placas y superficie de fricción. ....	55
4.2.3.1.	Esfuerzo equivalente de Von Mises.....	55
4.2.3.2.	Deformaciones .....	58
4.2.3.3.	Datos de histéresis del amortiguador de placas paralelas con superficies de fricción. ....	60
4.2.3.4.	Curva histerética del amortiguador de placas paralelas con superficies de fricción 61	
4.3.	Selección del modelo para la propuesta .....	62
4.3.1.	Resultados del modelo optimizado para la propuesta AMH_04 .....	63
4.3.2.	Deformaciones.....	64
4.3.3.	Curva histerética del amortiguador propuesto.....	65
4.4.	Verificación de la hipótesis .....	65
4.4.1.	Hipótesis .....	65
4.4.2.	Variable dependiente. ....	65
4.4.3.	Variable Independiente.....	66
4.4.4.	Hipótesis nula $H_0$ : .....	66
4.3.4.	Hipótesis alterna $H_a$ : .....	66
4.3.5.	Modelo matemático: .....	66
CAPÍTULO V .....		69
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....		69
5.1.	Conclusiones .....	69
5.2.	Recomendaciones.....	70

REFERENCIAS .....	71
ANEXOS .....	74

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3- 1: Identificación de los modelos para el análisis .....	19
Tabla 3- 2: Operacionalización de la variable dependiente .....	20
Tabla 3- 3: Operacionalización de la variable independiente .....	21
Tabla 3- 4: Propiedades del acero estructural ASTM A36 .....	25
Tabla 3- 5: Datos ingresados para configurar el modelo de endurecimiento isotrópico multilíneal. ....	26
Tabla 3- 6: Propiedades de los pernos estructurales ASTM A325 para el modelado considerando la bilinealidad del material [25].....	27
Tabla 3- 7: Determinación del período y espectro de respuesta sísmica .....	30
Tabla 4- 1: Descripción de los elementos modelados.....	36
Tabla 4- 2: Secuencia de pasos para realizar el análisis.....	37
Tabla 4- 3. Resultados de esfuerzos obtenidos para el Amortiguador de placas interconectadas AMH-01 .....	41
Tabla 4- 4. Datos de esfuerzo por carga obtenidos para el primer modelo de amortiguador. ....	42
Tabla 4- 5. Deformaciones totales obtenidas para el amortiguador de rendija de placas interconectadas.....	43
Tabla 4- 6. Resultados de deformación obtenidos para el amortiguador de placas interconectadas.....	44
Tabla 4- 7. Datos de histéresis para el amortiguador de placas interconectadas .....	46
Tabla 4- 8. Resultados de esfuerzo obtenidos con el análisis de elementos finitos en el amortiguador de placa con rendija y brazo de soporte AMH-02.....	48

Tabla 4- 9. Esfuerzos promedio y máximos obtenidos en el segundo modelo de amortiguador híbrido.....	49
Tabla 4- 10. Resultados de deformación obtenidos para el amortiguador de placa con rendija y brazo de soporte AMH-02. ....	51
Tabla 4- 11. Deformación por ciclos de carga para el amortiguador AMH_02. ....	52
Tabla 4- 12. Datos obtenidos de desplazamiento y reacciones para obtener la curva de histéresis del amortiguador AMH_02 .....	53
Tabla 4- 13. Resultados de esfuerzo obtenidos con el análisis de elementos finitos en el amortiguador de placas y superficie de fricción AMH-03 .....	55
Tabla 4- 13. Resultados de esfuerzo obtenidos con el análisis de elementos finitos en el amortiguador de placas y superficie de fricción AMH-03 ( <i>continuación</i> ) .....	56
Tabla 4- 14. Esfuerzos promedio y máximos obtenidos en el tercer modelo de amortiguador híbrido.....	56
Tabla 4- 16. Resultados de deformación obtenidos para el amortiguador híbrido de placas y fricción AMH-03.....	58
Tabla 4- 17. Deformación por ciclos de carga para el tercer modelo de amortiguador .....	59
Tabla 4- 18. Datos de desplazamiento y reacciones obtenidas para trazar la curva histerética del amortiguador 3.....	60
Tabla 4- 19. Datos de esfuerzos y deformaciones del amortiguador propuesto. ....	63
Tabla 4- 20. Valores estadísticos de los resultados para la distribución calculada....	67
Tabla 4- 20. Valores estadísticos de los resultados para la distribución calculada ( <i>continuación</i> ) .....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
Tabla 4- 22. Distribución t student tabulada. ....	68

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3- 1: Población de estudio y selección de la muestra .....	18
Figura 3- 2: Curva de tensión-deformación para cargas cíclicas .....	23
Figura 3- 3: Curva de deformación plástica para análisis no lineales del acero ASTM A36 .....	26
Figura 3- 4: Curva de esfuerzo – deformación bilineal de los pernos ASTM A325 .	27
Figura 3- 5: Curva de esfuerzo – deformación bilineal de los pernos ASTM A325	28
Figura 3- 6: Configuración de la edificación .....	29
Figura 3- 7: Diagrama de momentos y cortante.....	32
Figura 3- 8: Resultados de fuerza cortante y momento en la viga principal.....	<b>¡Error!</b>
<b>Marcador no definido.</b>	
Figura 3- 9: Comportamiento del contacto de tipo bonded que no permite la separación entre superficies. ....	34
Figura 3- 10: Comportamiento del contacto de tipo friccional entre dos superficies en contacto. ....	35
Figura 4- 1. Carga cíclica por intervalos de tiempo aplicada a todos los modelos de amortiguador. ....	40
Figura 4- 2. Comportamiento de los esfuerzos obtenidos en base a la carga aplicada. ....	43
Figura 4- 3. Comportamiento de las deformaciones por ciclo de carga del amortiguador. ....	45
Figura 4- 4. Curva histerética del amortiguador de placas interconectadas.....	47
Figura 4- 5. Esfuerzos por ciclos de carga del amortiguador de placa con rendija y brazo de soporte .....	50
Figura 4- 6. Deformación por ciclos de carga para el amortiguador híbrido AMH_02 .....	52
Figura 4- 7. Curva histerética del tercer modelo de amortiguador. ....	54

Figura 4- 8. Esfuerzos por ciclos de carga del amortiguador de fricción de placas AMH-03 .....	57
Figura 4- 9. Deformación por ciclos de carga para el amortiguador híbrido AMH-03 .....	60
Figura 4- 10. Curva histerética del tercer modelo de amortiguador. ....	61
Figura 4- 11. Modelo planteado como propuesta de amortiguador híbrido para edificios de mediana altura. ....	62
Figura 4- 12. Esfuerzo equivalente del modelo planteado como propuesta de amortiguador híbrido para edificios de mediana altura.....	63
Figura 4- 14. Esfuerzo equivalente del modelo planteado como propuesta de amortiguador híbrido para edificios de mediana altura.....	64
Figura 4- 14. Curva histerética del amortiguador de placas paralelas propuesto.....	65

## **DEDICATORIA**

*El presente trabajo dedico de manera especial a mi familia, mi esposa y mis hijos Natalia, Darío y Gabrielito por haber sido el pilar fundamental para alcanzar una meta más en mi vida.*

*A mis Padres, hermanos y sobrinos que siempre estuvieron apoyándome incondicionalmente.*

## AGRADECIMIENTO

*Primeramente, quiero agradecer a Dios por darme la salud y fortaleza para alcanzar una meta más en mí vida y permitir seguir siendo partícipe de este y muchos logros más.*

*A mi esposa e hijos Natalia, Darío y Gabrielito, por ser mi fortaleza y mi razón de vivir y continuar luchando día tras día.*

*A mis Padres, hermanos y sobrinos por haber sido el apoyo fundamental en mi vida.*

*A mi Tutor Ing. Hernán Arroba Mg. Por su asesoría y conocimientos brindados durante el desarrollo del Trabajo de Titulación.*

*A la Universidad Técnica de Ambato, Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica por haber facilitado los conocimientos académicos a través de todo su personal docente de esta Maestría.*

**UNIVERSIDAD TECNICA DE AMBATO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA**

**MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL CON MENCIÓN EN ESTRUCTURAS  
METÁLICAS**

**TEMA:**

ANÁLISIS DE AMORTIGUADORES HÍBRIDOS UTILIZADOS EN ESTRUCTURAS METÁLICAS DE EDIFICACIONES DE MEDIANA ALTURA PARA MEJORAR SU RESPUESTA A CARGAS SÍSMICAS.

**MODALIDAD DE TITULACIÓN:** Proyecto de titulación con componentes de Investigación Aplicada y/o de Desarrollo

**AUTOR:** Ing. Mario Hernán Jaya Guanoluisa

**DIRECTOR:** Ing. César Hernán Arroba Arroba Mg.

**FECHA:** veinte y dos de febrero del 2023

**RESUMEN EJECUTIVO**

La presente investigación se centró en identificar diferentes configuraciones de amortiguadores híbridos que sean aplicables a edificios de mediana altura mediante la revisión de investigaciones, estos dispositivos fueron evaluados con herramientas computacionales, mediante el método de elementos finitos, que permitieron conocer el comportamiento estructural de este tipo de sistemas con modelos matemáticos confiables. Se identificaron tres tipos de amortiguadores que utilizan elementos fusibles como rendijas y placas débiles para disipar la energía por medio de deformaciones y superficies de contacto que disipan energía a través de la fricción, los amortiguadores analizados se componen especialmente de placas de acero y superficies de materiales rugosos unidos por pernos formando un solo conjunto, estos dispositivos luego se adaptan con juntas soldadas o apernadas a las estructuras especialmente en la zona central de las vigas, de este modo se previene el daño del elemento estructural y se da paso a formar rótulas y deformaciones en los elementos fusibles. Luego del análisis se identificó el amortiguador que presentó el

comportamiento más estable para proponer una propuesta que mejore el desempeño sísmico y disipe mejor la energía de las cargas sísmicas

**Descriptor:** AMORTIGUADOR DE FRICCIÓN, AMORTIGUADOR DE HENDIDURA, CURVA DE HISTÉRESIS, DISIPACIÓN DE ENERGÍA, ELEMENTOS FINITOS, ESFUERZO DE VON MISES.

**UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA**  
**MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL CON MENCIÓN EN ESTRUCTURAS**  
**METÁLICAS**

**THEME:**

TOPIC: ANALYSIS OF HYBRID DAMPERS USED IN STEEL STRUCTURES OF MEDIUM-RISE BUILDINGS TO IMPROVE THEIR RESPONSE TO SEISMIC LOADING

**DEGREE TYPE:** Degree Project with applied research and/or development

**AUTHOR:** Ing. Mario Hernán Jaya Guanoluisa

**DIRECTOR:** Ing. César Hernán Arroba Arroba, Mg.

**DATE:** February 22, 2023

**EXECUTIVE SUMMARY**

The present research focused on identifying different configurations of hybrid dampers that are applicable to mid-rise buildings through the review of research, these devices were evaluated with computational tools, using the finite element method, which allowed to know the structural behavior of this type of systems with reliable mathematical models. Three types of dampers were identified that use fusible elements such as slits and weak plates to dissipate energy through deformations and contact surfaces that dissipate energy through friction, the analyzed dampers are composed especially of steel plates and surfaces of rough materials joined by bolts forming a single assembly, These devices are then adapted with welded or bolted joints to the structures, especially in the central zone of the beams, thus preventing damage to the structural element and giving way to the formation of ball joints and deformations in the fusible elements. After the analysis, the damper with the most stable behavior was identified in order to propose a proposal to improve the seismic performance and better dissipate the energy of the seismic loads.

**Keywords:** FRICTION DAMPER, SLOT DAMPER, HYSTERESIS CURVE, ENERGY DISSIPATION, FINITE ELEMENTS, VON MISES STRESS.

# CAPÍTULO I

## EL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

### 1.1.Introducción.

Los amortiguadores de fricción disipan la energía estructural mediante un mecanismo de deslizamiento entre dos elementos y el nivel de fuerza de deslizamiento puede ajustarse fácilmente controlando la fuerza de sujeción. El amortiguador de fricción es un dispositivo instalado en la junta de cruce de riostras y en las vigas, este dispositivo ayuda a disminuir el daño en los elementos estructurales causado por las cargas sísmicas puesto que disipan mucha energía en comparación con otros que poseen la misma fuerza máxima; este comportamiento se debe a que generan bucles de histéresis rectangulares [1].

Por otro lado, los amortiguadores pasivos en general utilizan un solo material para conseguir el mecanismo de disipación de energía y la capacidad del material determina el rendimiento del amortiguador. El amortiguador metálico o de fricción no muestra ningún mecanismo de disipación de energía antes de ceder o deslizarse. En consecuencia, el amortiguador metálico o de fricción es casi inútil para cargas pequeñas que no excitan la estructura por encima de un nivel de carga específico, provocando la elasticidad o el deslizamiento de los amortiguadores.

Tanto el modelo de amortiguadores pasivos como los de fricción tienen sus ventajas y desventajas, en el presente trabajo se busca analizar dispositivos de amortiguamiento que combinan estos dos mecanismos de disipación de energía y conocer su comportamiento estructural e histerético.

### 1.2.Justificación

En el mercado existen diferentes tipos de amortiguadores que brindan soluciones eficientes en cuanto a la disipación de energía. Con relación a esto, el tipo de amortiguamiento que se le aportará al sistema estructural es lo que marca la diferencia entre uno u otro modelo, por ejemplo, en los amortiguadores por fricción la energía es disipada por medio del rozamiento entre superficies. Otro medio de disipación es el uso de dispositivos más sofisticados como pistones con medio de amortiguamiento viscoso, entre otros. Implementar sistemas de disipación de energía constituye una inversión significativa, por ese motivo es importante realizar una adecuada selección

del tipo de amortiguador a utilizarse y evaluar su comportamiento frente a cargas sísmicas de diferentes magnitudes.

Dentro de la evaluación de desempeño de los amortiguadores existen diferentes metodologías aplicables; sin embargo, los métodos computacionales permiten reducir el tiempo y costo dentro de la investigación [2]. Con la presente investigación se busca evaluar el comportamiento de amortiguadores híbridos en edificaciones de mediana altura. Para ello se empleará el dibujo asistido por computadora CAD y el análisis por elementos finitos usando el programa ANSYS RESEARCH. El trabajo consiste en determinar la efectividad de los amortiguadores híbridos bajo cargas sísmicas de baja, mediana y alta intensidad y proponer un modelo en el que se presente un mayor desempeño y efectividad.

Las investigaciones que abordan este tema con el uso de amortiguadores híbridos proporcionan resultados favorables en cuanto a la reducción de daños [3], [4]. En este caso, se emplea el término “híbridos” para definir a los amortiguadores de fricción que funcionan de forma combinada con elementos que se comportan como fusibles y se activan de acuerdo con el tipo de carga sísmica. Con la investigación propuesta se desea indagar más en cuanto al desempeño del amortiguador y determinar las condiciones que les proporcionan un mejor rendimiento.

El uso de amortiguadores híbridos permite implementar soluciones eficientes y económicas para mejorar el desempeño sísmico de las edificaciones, con relación a otros sistemas de amortiguamiento, estos sistemas permiten reducir costos y presentan un mejor rendimiento que los amortiguadores que únicamente se basan en el principio de disipación por fricción [5].

Encontrar esta información será útil puesto que, se puede proponer un disipador sísmico que sea menos costoso que aquellos que usan medios viscosos para cumplir el mismo fin. Generalmente, la implementación de disipadores sísmicos en las edificaciones es costosa [6], con la propuesta del disipador sísmico híbrido por fricción se desea integrar en la comunidad opciones más económicas y eficientes, se puede mejorar la metodología de diseño en sistemas estructurales e implementar soluciones que reduzcan los daños en las edificaciones.

En esta investigación se analizaron amortiguadores híbridos utilizados en estructuras metálicas de edificaciones de mediana altura para mejorar la respuesta a cargas sísmicas aplicando herramientas de simulación computacional.

### **1.3.Objetivos**

#### **1.3.1. Objetivo General**

Analizar amortiguadores híbridos utilizados en estructuras metálicas de edificaciones de mediana altura para mejorar la respuesta a cargas sísmicas aplicando herramientas de simulación computacional.

#### **1.3.2. Objetivos Específicos**

- Identificar diferentes configuraciones de amortiguadores híbridos que sean aplicables a edificios de mediana altura mediante revisión bibliográfica
- Evaluar el desempeño de diferentes amortiguadores híbridos utilizados en edificaciones de mediana altura solicitados a diferentes cargas sísmicas mediante simulación computacional.
- Proponer una configuración de amortiguador híbrido que tenga mayor efectividad en edificios de mediana altura solicitado a cargas sísmicas

## CAPÍTULO II

### ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS

Los medios de disipación de energía pasivos son eficientes porque brindan un buen comportamiento sísmico a un bajo costo, comparado con otros sistemas, los amortiguadores por fricción presentan un gran desempeño puesto que la energía de disipación por ciclo es superior. Sin embargo, el comportamiento de los amortiguadores metálicos no es insignificante puesto que brinda grandes ventajas en el control de desplazamientos laterales, por esta razón, se han estudiado los amortiguadores híbridos que se componen de una parte metálica que actúa como fusible y de una parte friccionalante [7].

Con la finalidad de mitigar las cargas sísmicas, a lo largo de las últimas décadas se han realizado diferentes investigaciones acerca del uso de amortiguadores, así mismo se han presentado diferentes aplicaciones, por ejemplo, en pórticos flexibles, como elementos de conexión entre pórticos y torres rígidas, pórticos resistentes a momentos y como parte del sistema de arriostramientos. Del mismo modo, dentro de la tipología de amortiguadores a fricción híbridos, se han planteado diferentes geometrías. Las configuraciones de los amortiguadores pueden ser modificadas para lograr los requisitos de diseño y mitigar el efecto de las cargas dinámicas [8].

Los amortiguadores de “amortiguación y rigidez” – (ADAS, siglas en inglés) se recomiendan para su uso en pórticos resistentes a momentos, y en sistemas de arriostramiento, específicamente en el sistema de conexión Chevron. Otra zona ideal para la ubicación de los amortiguadores es en conexiones viga-columna ya que proporcionan grandes aberturas en los vanos de la estructura como se presenta en la Figura 2-1. En la Figura 2-2 se presenta el esquema gráfico del amortiguador ADAS, consiste en placas de acero en forma de X conectadas en paralelo a la placa base mediante pernos, con esto se añade amortiguación y rigidez a la estructura [8].



Figura 2- 1: Configuración geométrica de las placas de acero del amortiguador ADAS [8]

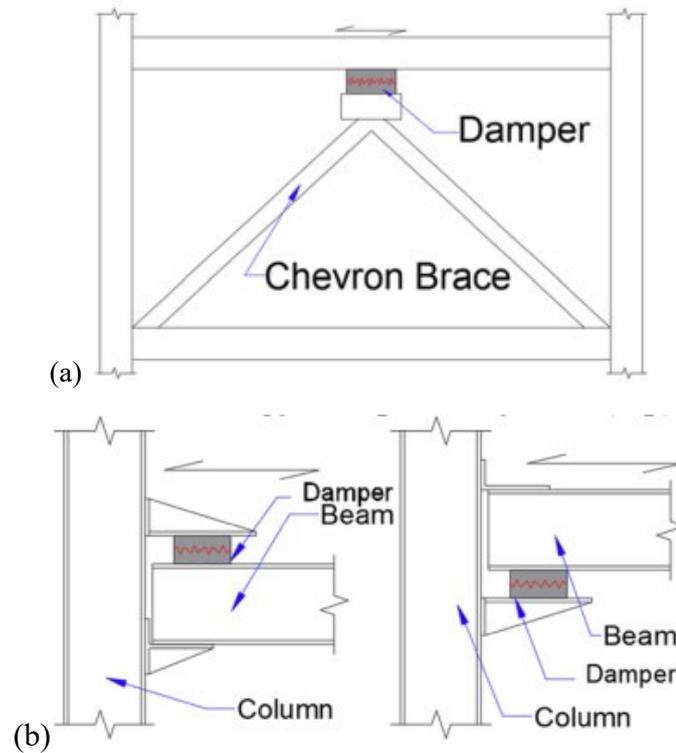


Figura 2- 2: Zonas de conexión con mejor desempeño para los amortiguadores [8].

En otro tipo de configuraciones de amortiguadores se presenta un dispositivo que tiene comportamiento axial, en este caso el medio de amortiguamiento son barras de acero estructural y de Nitinol de 8 mm de diámetro, junto con placas gruesas rígidas en cada extremo. Sin embargo, para evitar el pandeo de las barras, el dispositivo es relleno con mortero; en la Figura 2-3 se presenta el esquema gráfico del amortiguador [9].

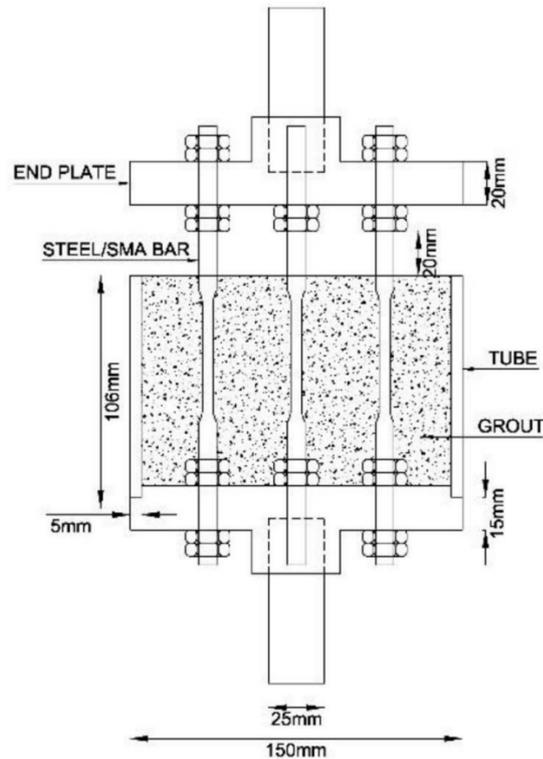


Figura 2- 3: Amortiguador axial de barras [9].

En el análisis de desempeño de los amortiguadores evidenció que el acero estructural brinda un buen mecanismo de disipación de energía, a mayor proporción de acero, aumenta la capacidad de disipación, pese a que las barras de aleaciones con memoria de forma presentan un buen desempeño, al estar presentes en este dispositivo de amortiguamiento, el acero juega un papel principal [9].

Para este diseño, los autores también realizaron un modelo computacional de elementos finitos empleando elementos sólidos de 8 nodos. Los resultados del análisis indicaron que el dispositivo tiene una alta disipación de energía y recuperación de tensión. Pese a que utilizar acero estructural brinda una mayor capacidad de disipación, el uso del Nitinol también presenta ventajas como evitar fracturas repentinas, sin embargo, debe existir una cantidad adecuada de los dos materiales para que no se pierda la capacidad de disipación [9].

Otras opciones utilizadas para aumentar la ductilidad en los pórticos puede ser el uso de elementos circulares, por ejemplo, el sistema de arriostramiento descentrado con una excentricidad óptima – (OBS-C-O, siglas en inglés) posee estas características y, adicionalmente, proporcionan un medio de protección sísmica [1]. En la Figura 2-4 se presenta un pórtico OBS-C-O analizado por elementos finitos, ahí se verifica su

comportamiento de tensión por deformación mínimo y la ubicación óptima del elemento circular.

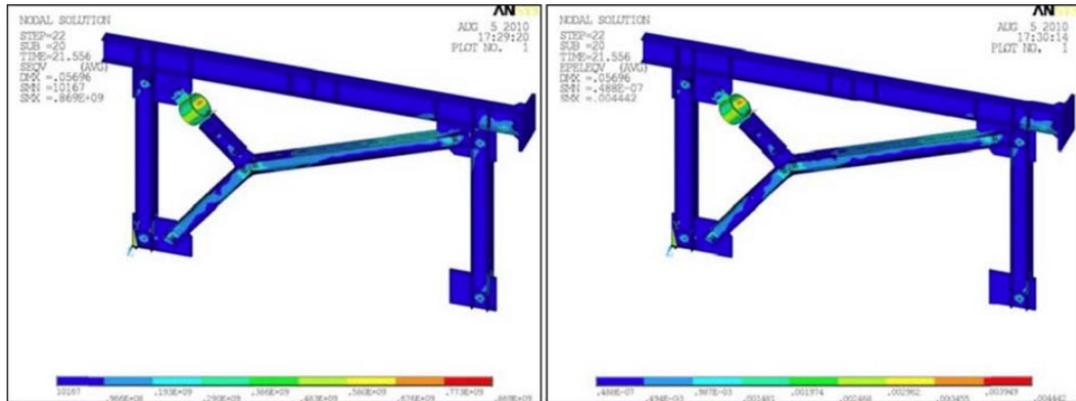


Figura 2- 4: Sistema OBS-C-O esfuerzo por deformación Von Mises [1].

En sistemas de arriostramiento también se suelen aplicar todo tipo de amortiguadores, en el estudio presentado por [10], se arman pórticos arriostrados en X para equiparlos con un amortiguador por fricción, en la zona de unión del arriostramiento localizó un anillo circular con una rigidez específica para garantizar su deformación no lineal. El sistema fue diseñado para que el daño se localice en únicamente en el anillo y que pueda ser reemplazado.

En la Figura 2-5 se presenta el análisis estático no lineal realizado por los autores en donde se verifica el esfuerzo de Von Mises tanto en el anillo como en el pórtico completo. Las tensiones se mantienen concentradas en el anillo, mientras que los elementos principales del pórtico permanecen sin afectaciones. Luego del análisis se verificó la eficacia del sistema incluso bajo la influencia de sismos de gran magnitud, por lo que su aplicación se extiende en el reforzamiento de edificaciones existentes como un medio de disipación de energía [10].

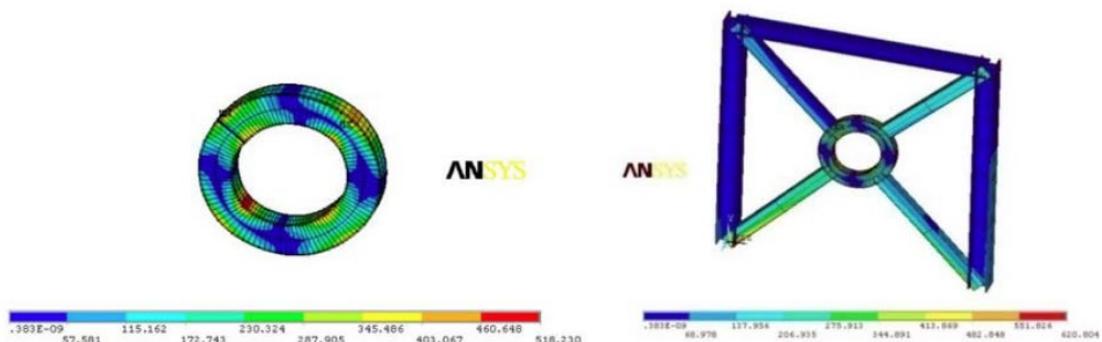


Figura 2- 5: Sistema de arriostramiento con amortiguador de anillo de fricción [10].

En desarrollo de sistemas de amortiguamiento estructural para mitigar los efectos de los sismos en los edificios ha sido creciente en las últimas décadas, en su desarrollo han sido empleados métodos numéricos y modelos matemáticos que han ayudado a predecir su desempeño. En este sentido se han concebido diseños de amortiguadores híbridos como el propuesto por [11] en donde se desarrolló un nuevo dispositivo híbrido de disipación de energía combinando un amortiguador de hendidura de acero y amortiguadores de fricción rotacionales en paralelo, la aplicación de este modelo propuesto para el autor radicó en la adaptación sísmica de estructuras. El autor destaca comparaciones con los amortiguadores de hendidura tradicionales que tienen el mismo límite elástico, los resultados mostraron que el dispositivo híbrido tiene la ventaja de que únicamente se activan los amortiguadores de fricción en caso de pequeños terremotos o vientos considerables, y que tanto el amortiguador de fricción como el de hendidura trabajan simultáneamente en caso de terremotos fuertes.

Para la validación de estos sistemas fue necesario realizar ensayos de carga cíclicos, para evaluar su capacidad de disipación de energía sísmica, se destaca también la importancia de un análisis de elemento finito cotejado con modelos experimentales. En los resultados obtenidos por los autores se observa que los amortiguadores son eficaces para contener el rendimiento del edificio dentro de un nivel de rendimiento deseado. El análisis de vulnerabilidad de la estructura objetivo de este estudio mostró que las probabilidades de alcanzar los estados límite disminuyen significativamente después de la adaptación de los amortiguadores a la estructura disminuyendo probabilidad de alcanzar el estado de daño completo [11].

Algunas ventajas de estos amortiguadores híbridos es que proporcionan un buen comportamiento sísmico y son de menor tamaño. En la Figura 2-6 se visualiza la configuración del amortiguador y su desempeño mediante análisis por elementos finitos, se aprecia su buen desempeño puesto que al final de las cargas los elementos que presentan hendiduras son los que fallan, mientras que el resto del amortiguador se mantiene estable, es decir que se mantiene un buen mecanismo de disipación de energía, así mismo, el estudio indica que las derivas cuando se emplea este mecanismo, no llegan al 2% de la edificación [11].

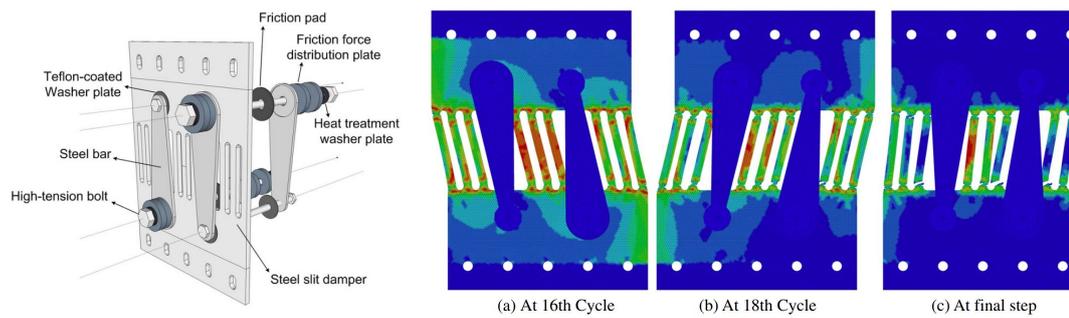


Figura 2- 6: Amortiguador híbrido de fricción y hendiduras [11].

En los ensayos realizados para verificar su comportamiento frente a cargas cíclicas, los autores encontraron que este dispositivo es eficiente para soportar terremotos de gran magnitud, así como también representa un buen medio para disipar vibraciones por cargas de viento [11].

Otro tipo de amortiguadores híbridos aplicables a estructuras metálicas son los autocentrantes (SCHD) por sus siglas en inglés, estos sistemas son útiles para mejorar la resistencia sísmica de las estructuras, en la investigación de [12] se planteó un modelo de amortiguador SCHD compuesto de un muelle de fricción precomprimido y un mecanismo de líquido viscoso. Los resultados de este trabajo demuestran que la parte del muelle de fricción precomprimido proporciona una resistencia moderada, una capacidad de disipación de energía y una capacidad de recesión favorable, mientras que la parte del fluido viscoso implementa una capacidad de disipación de energía adicional que mejora el desempeño estructural de los edificios. En este sistema el mecanismo híbrido de disipación de energía se deriva de la combinación de fuerzas de fricción y viscosas. Del mismo modo que en el primer modelo de amortiguador híbrido [12] desarrollo el diseño usando el método de elementos finitos.

En el mismo contexto *Mohammad Nasab* y *Jinkoo Kim* han abordado en otras investigaciones el análisis de otro tipo de amortiguadores híbridos, como es el caso de los de acero viscoelástico (HSVD) que mejoran el comportamiento sísmico de las estructuras. [13] Desarrolló un modelo analítico basado en los modelos Kelvin-Voigt y Bouc-Wen-Baber-Noori para modelar el comportamiento viscoelástico de estos sistemas. Se obtuvieron resultados concluyentes que demuestran que la adición de una parte viscoelástica al amortiguador de hendidura de acero mejora con éxito su rendimiento, también el autor destaca que el uso del procedimiento del diagrama de capacidad y demanda es eficaz en el diseño preliminar de los amortiguadores híbridos

para alcanzar un objetivo de rendimiento deseado, el procedimiento seguido en esta investigación consistió en evaluar varios índices de comportamiento sísmico utilizando una estructura resistente a momentos de tres pisos antes y después de la adaptación sísmica de los amortiguadores de hendidura de acero y los HSVD [13].

Otros estudios se enfocaron en el análisis de amortiguadores de fricción para mejorar el desempeño sísmico de estructuras híbridas de madera y acero, que se han propuesto como solución estructural alternativa para edificios de varias plantas. Es el caso de [14] que en su investigación incluyó amortiguadores de fricción como conectores entre columnas y muros en un marco de acero resistente al momento y un muro de corte de madera ligera de relleno, para analizar este sistema el autor llevó a cabo pruebas de carga pseudoestática en tres subconjuntos híbridos de madera y acero resistentes a la carga lateral, los resultados de las pruebas realizadas mostraron que los amortiguadores de fricción son muy eficaces en la disipación de la energía de entrada del terremoto y, en consecuencia, se observaron muchos menos daños en los miembros estructurales principales.

También se encontraron análisis de amortiguadores híbridos histeréticos-viscosos (HVH) por sus siglas en inglés, para edificios altos sometidos a movimientos del suelo de tipo pulso de largo período y amplitudes extremadamente grandes. [15] introdujo el sistema HVH para un sistema de un solo grado de libertad en su investigación y demostró su eficacia en edificios altos a través de un análisis de la respuesta en el tiempo para un doble impulso crítico de amplitud modulada y un análisis de pushover de doble impulso con esto se demostró que el sistema HVH es eficaz para aumentar gradualmente el doble impulso crítico y también tiene un buen rendimiento para un movimiento del suelo registrado de amplitud extremadamente grande, el registro sísmico usado en esta investigación fue el de Kumamoto del año 2016 [15].

Otros estudios más avanzados acerca del uso de amortiguadores híbridos es el que se presenta en [2]. En este análisis se desarrolló un dispositivo de rendijas múltiples - (MSD, siglas en inglés) que consta de una parte débil y otra parte fuerte que se conectan en serie. Tanto la parte débil como la fuerte consta de rigideces y límites elásticos diferentes, el propósito de realizar esta combinación fue proporcionar a la estructura un amortiguador que funcione de manera eficiente en terremotos de baja y media y alta intensidad. En el primer caso, se activa la rendija débil, cuando existen terremotos de media intensidad entra en funcionamiento la rendija fuerte y finalmente,

en terremotos graves, los dos componentes del amortiguador trabajan de manera conjunta para disipar energía. En el estudio se comprobó su factibilidad en un marco de una edificación de cinco pisos mediante un diseño de elementos finitos y de forma experimental.

En la Figura 2-7 se presenta el diseño del amortiguador que está compuesto por placas de acero unidas con pernos de alta resistencia. El conjunto de placas funciona como un muro de corte y las ranuras localizadas entre placas permiten que se active la fase débil o la fase fuerte, dependiendo de la magnitud del sismo, el diseño está pensado en evitar fracturas que impidan el trabajo conjunto de los elementos [2].

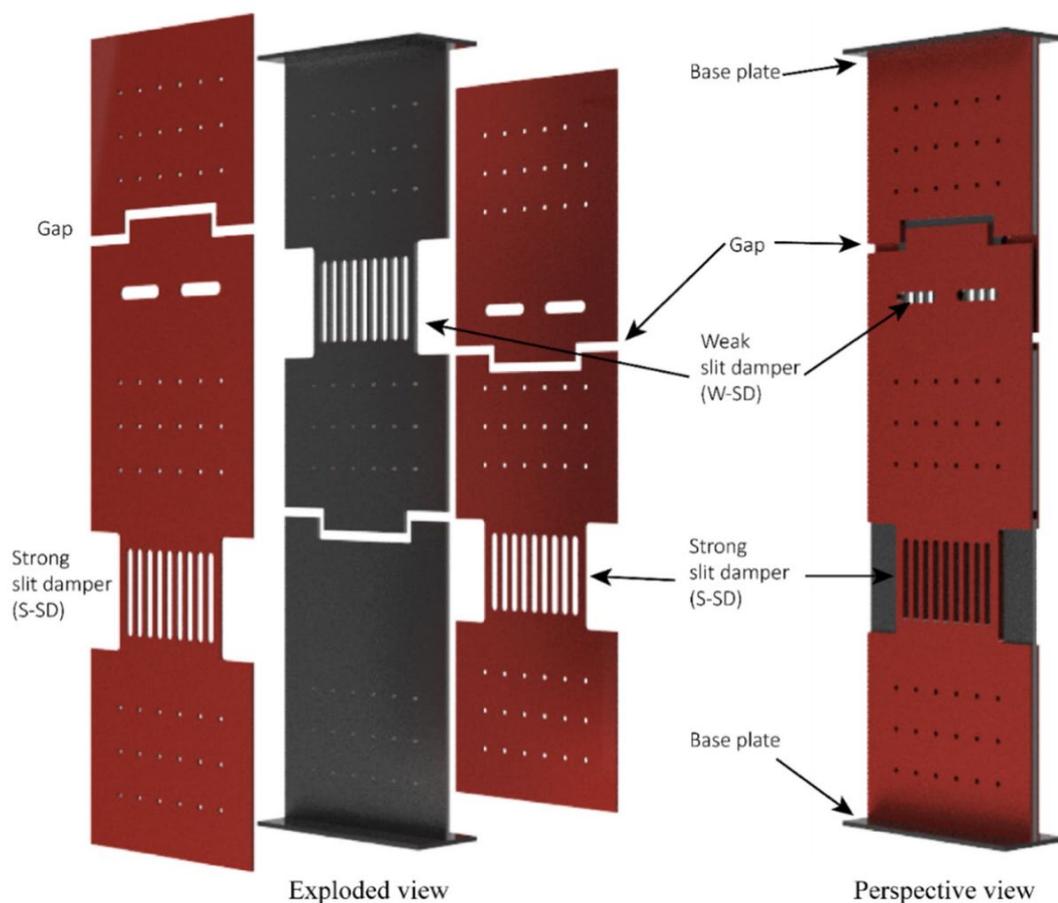


Figura 2- 7: Amortiguador de rendijas múltiples [2].

En la fase de análisis por elementos finitos del amortiguador de rendijas múltiples se utilizó un modelamiento y mallado basado en elemento sólido hexaedro de 8 nodos con tamaño de 10 mm. Los resultados que se obtuvieron en esta investigación fueron positivos puesto que además de resultar iguales a los de las pruebas experimentales, el análisis dinámico no lineal indicó que la deriva entre pisos y el desplazamiento

máximo eran hasta un 47% menores que en el caso de amortiguadores convencionales [2].

Otro diseño de amortiguadores en el que se emplean elementos de rendijas es el que se presenta en [16], los autores plantean un amortiguador combinado de cuatro placas de rendijas en forma de caja, como se presenta en la Figura 2-8, sin embargo, este diseño está propuesto para rehabilitación de estructuras que han sufrido fallas por cargas sísmicas.

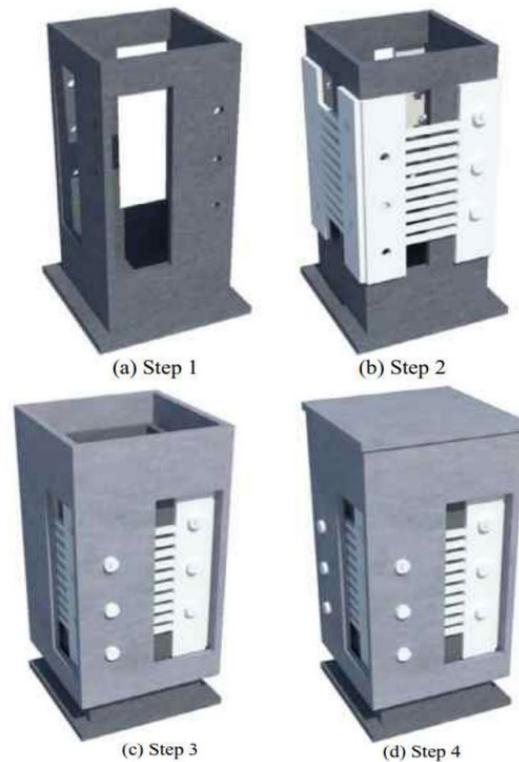


Figura 2- 8: Amortiguador de rendijas tipo caja [16].

Otro amortiguador híbrido novedoso es presentado por [5] es el amortiguador combinado de fricción y amortiguador Tadas de doble rendimiento - (FD-Tadas, nomenclatura en inglés) incluye dos partes: el diseño del amortiguador auxiliar (parte de fricción) y el diseño del amortiguador principal (amortiguador). Debido a su comportamiento estable, los amortiguadores de fricción son más apropiados para terremotos moderados con mayor probabilidad de ocurrencia. En la Figura 2-9 se presenta el esquema de la configuración del amortiguador FD-Tadas en el que se visualiza la zona de fricción y la zona de amortiguamiento que funciona como un fusible.

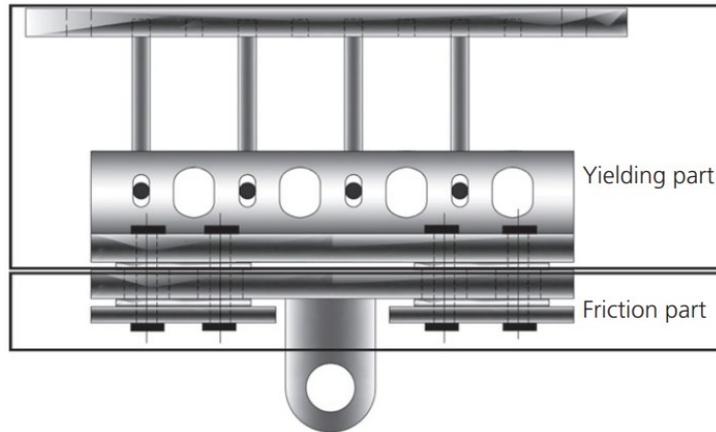


Figura 2- 9: Configuración del amortiguador FD-Tadas [5].

En este caso también se validó la investigación con una fase experimental y con el análisis del modelo por elementos finitos, los resultados que presentan los autores validaron la hipótesis del rendimiento esperado. El fusible principal mantuvo su eficacia bajo una fuerte acción sísmica y también mostró la capacidad de disipación de energía bajo terremotos moderados. En estos amortiguadores se alcanzó una ductilidad del 40% [5].

Los autores *Gang Li* y *Hong-Nan Li* presentan otra terminología para los amortiguadores híbridos en el que se los denomina amortiguadores de fluencia – (MYFD, siglas en inglés). En este caso, desarrollaron un dispositivo de disipación de energía acoplado con el mecanismo de fricción y la parte flexible de acero, en la zona de fricción se mantiene una placa fija que se une a la zona de cedencia. Entre ellas se coloca una placa de cobre y se une a través con pernos, como se presenta en la Figura 2-10. En este análisis los resultados fueron favorables y se validó el hecho de que la parte friccionante actúa en sismos de menor magnitud, mientras que, cuando trabaja el amortiguador completo, se logran disipar sismos de gran magnitud.

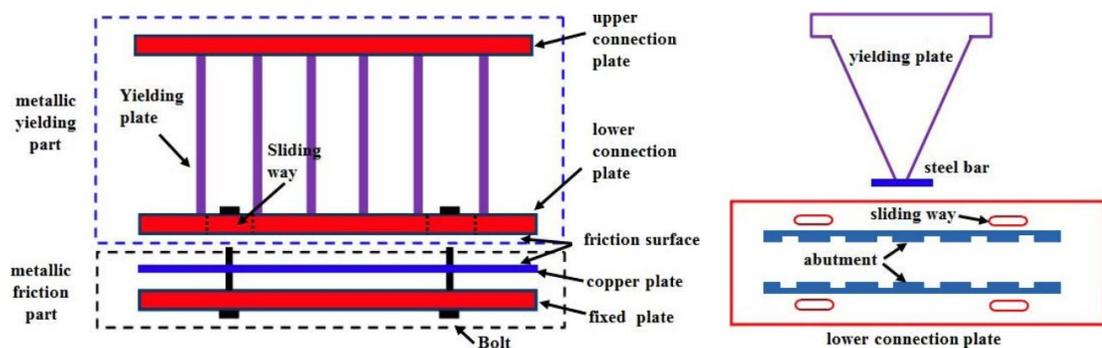


Figura 2- 10: Esquema del amortiguador de fluencia [17].

Otro parámetro muy importante dentro del diseño de amortiguadores es una correcta distribución dentro de la edificación y, el uso de almohadillas para que la zona friccionante. *Mohamed Eldin, Jaegoo Kim y Jinkoo Kim*, señalan estas variables en el diseño de un amortiguador híbrido con hendiduras metálicas en donde se realizó una simplificación del modelo para establecer la distribución óptima de estos dispositivos. Los resultados del análisis indicaron que aplicar correctamente estos parámetros pueden presentar reducciones significativas de costo que alcanzarían hasta un 89% incluyendo el costo de instalación de amortiguadores y reparaciones que deberían realizarse después de un terremoto. El nivel de reducción de costos es más eficiente incluso que si únicamente se instalaran los sistemas de disipación de energía, es decir, que una buena distribución es clave para optimizar de forma eficiente los recursos.

Por otro lado, también es importante el control de la respuesta sísmica de un edificio mediante su conexión con otro edificio adyacente. Los edificios acoplados han demostrado ser un método atractivo para mitigar las respuestas dinámicas excesivas. El trabajo de *Pérez, Avila y Doz*, estudia el comportamiento de dos estructuras conectadas por medio de amortiguadores pasivos considerando también sistemas locales de control por retroalimentación instalados en cada estructura que se considera como una estrategia de amortiguación híbrida. Estos sistemas de control de retroalimentación se diseñan y operan de forma independiente utilizando dispositivos activos con capacidad de actuación limitada como los actuadores de fuerza.

El método de análisis consiste en ecuaciones diferenciales que expresan el movimiento del sistema acoplado se derivan y se resuelven para el desplazamiento relativo. Los resultados reflejan que los valores altos del coeficiente de amortiguación pueden amplificar el desempeño sísmico de la estructura [18].

Nuevas investigaciones como la desarrollada por [19] plantea amortiguadores metálicos híbridos de fricción de pistón - (PHFMD, siglas en inglés), equipados con almohadillas de fricción y tiras de acero de ancho variable como piezas de disipación de energía. Estas piezas se colocan en el montaje final del amortiguador con la ayuda de conectores y piezas rígidas, en la Figura 2-11 se presenta el esquema del amortiguador, en el que se aprovecha de la geometría de los elementos metálicos para aportar un mejor desempeño frente a cargas sísmicas. El autor caracteriza los parámetros del amortiguador PHFMD determinado a partir de experimentos exhaustivos desarrollados con modelos matemáticos computacionales y

experimentales, este sistema trabaja en dos fases, la capacidad de la primera fase se activará en caso de viento o de excitaciones sísmicas leves o moderadas, en caso de terremotos graves, se movilizará toda la capacidad del amortiguador bifásico para mitigar el impacto del terremoto en la estructura.

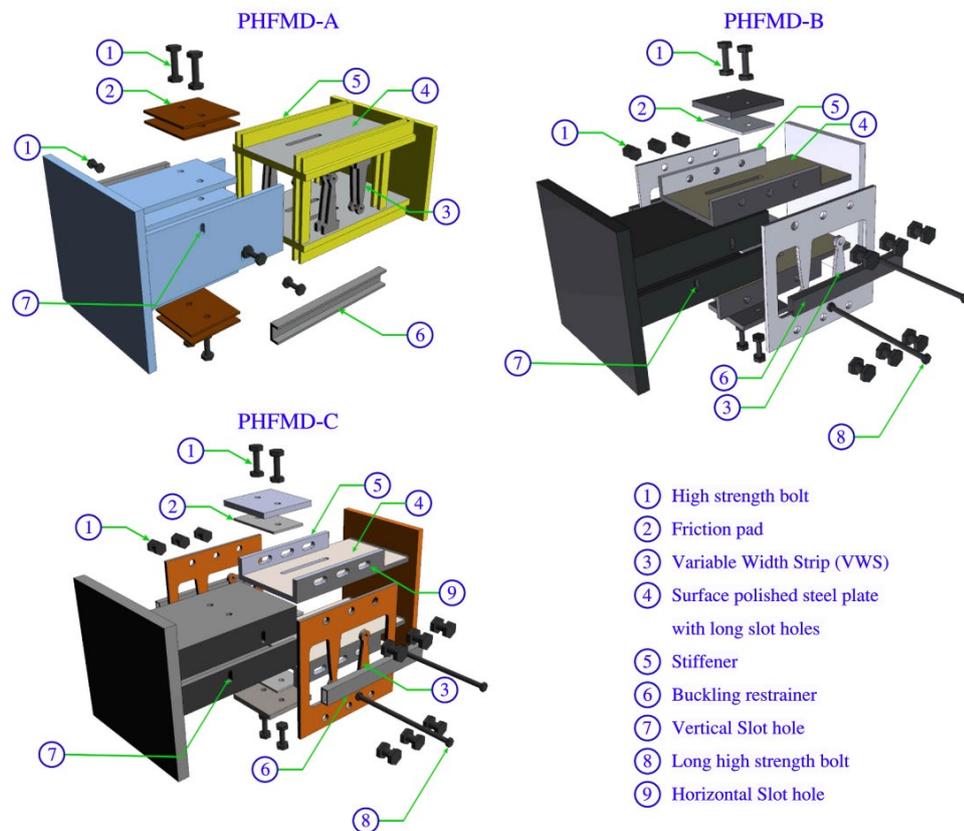


Figura 2- 11: Sistemas de amortiguamiento híbrido PHFMD [19].

El autor obtuvo parámetros de rendimiento que incluyen el desplazamiento acumulado alcanzable, la energía disipada y la relación efectiva de amortiguación viscosa equivalente. Los resultados demuestran que los especímenes ensayados en dicha investigación han soportado un desplazamiento acumulado de más de 2000 mm y han disipado una cantidad significativa de energía [19], cumpliendo su objetivo de prevenir los daños estructurales de los edificios.

Finalmente es de relevancia destacar la investigación de [20] en la que se desarrolló un amortiguador híbrido combinando el amortiguador de fricción (FD) y el amortiguador metálico en forma de X (XMD) para mejorar el rendimiento de un edificio bajo excitaciones sísmicas con diferentes aceleraciones máximas del terreno, Según los resultados del análisis dinámico no lineal realizado en esta investigación, cuando se instala una estructura de cuatro plantas con los amortiguadores XMD, FD e

híbridos, el porcentaje de reducción de la media de las derivas máximas entre plantas es de 63, 67 y 74 mm, respectivamente.

Cuando se instala una estructura de doce plantas con los amortiguadores XMD, FD e híbridos, el porcentaje de reducción de la media de las derivas máximas entre plantas es de 59, 64 y 71 mm. Lo que demuestra que los amortiguadores híbridos ofrecen un mayor desempeño que los de fricción además ofrecen un menor costo y tiempo de reparación [20].

## CAPÍTULO III

### MARCO METODOLÓGICO

#### 3.1. Ubicación

La investigación se realizó en la Universidad Técnica de Ambato, en el campus Huachi, puesto que es una investigación de análisis computacional, se emplearon los recursos que proporciona la institución educativa, como es el caso de las tutorías con el docente y de los programas computacionales para el desarrollo de la investigación.

#### 3.2. Equipos y materiales

##### 3.2.1. Equipos para el análisis computacional

- Para el análisis computacional se empleó un equipo con las siguientes características:

Procesador: AMD Ryzen 7

Tarjeta gráfica: NVIDIA Geforce RTX 6 GB

Memoria RAM: 32 GB

Memoria del disco duro: 1 TB

Sistema operativo: Windows 10 – 64 bits

- Programa computacional empleado:

Programa de análisis por elementos finitos

Paquete Office para la redacción y presentación de resultados

#### 3.3. Tipo de investigación

**Cuantitativa:** se emplearon parámetros definidos como las propiedades de los materiales, configuraciones geométricas de los amortiguadores híbridos, condiciones de frontera, cargas o fuerzas, también los resultados fueron de este tipo puesto que se conocieron parámetros como deformaciones y esfuerzos.

**No experimental:** fue no experimental puesto que no se presentaron ítems de ensayo, el alcance del proyecto finalizó con la propuesta del amortiguador híbrido que presenta el máximo rendimiento en el análisis computacional.

**Bibliográfica:** se emplearon artículos científicos como base para el análisis, de esta información recolectada se seleccionaron los modelos de sistemas de amortiguamiento que han resultado efectivos con la aplicación de ensayos.

**Simulación:** la investigación fue de simulación puesto que se modelaron los amortiguadores con todas las condiciones de trabajo para establecer su funcionamiento con las condiciones como lo harían en la realidad.

**Descriptiva:** fue de tipo descriptiva puesto que se detalló el comportamiento de los amortiguadores híbridos frente a la aplicación de cargas dinámicas, para este análisis se emplearon los resultados del programa computacional.

### 3.4. Población o muestra:

En la Figura 3-1 se presenta un esquema de la selección de la muestra y población estudiada para el análisis de los amortiguadores híbridos por fricción.

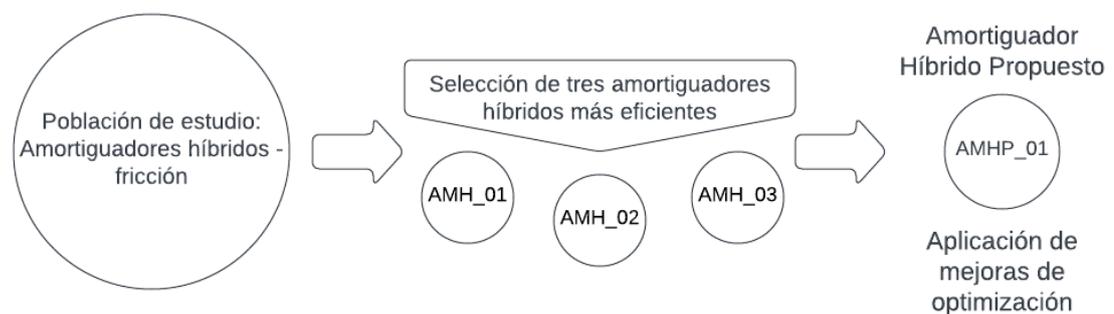


Figura 3- 1: Población de estudio y selección de la muestra

La población para estudiarse fue de los amortiguadores híbridos que se componen de elementos que se someten a fricción como medio de disipación de energía y elementos metálicos que cumplen con la función de fusibles.

La muestra se compone de la evaluación de tres diferentes tipos de amortiguadores híbridos obtenidos de la investigación bibliográfica.

Para la propuesta se presentó el amortiguador híbrido más eficiente de tres tipos de modificaciones en términos de geometría y materiales a partir del amortiguador con mejor desempeño de la muestra evaluada.

Para la evaluación del comportamiento de los amortiguadores se realizó una modelación detallada de los elementos bajo los requerimientos de la norma ASCE 7 – 16.



### 3.5.Hipótesis - pregunta científica – idea a defender

El amortiguador híbrido propuesto disipa mayor cantidad de energía.

**Variable dependiente:** Disipación de energía

**Variable independiente:** Modelos de amortiguador y los rangos de carga aplicados

#### 3.5.1. Operacionalización de variables

Tabla 3- 2: Operacionalización de la variable dependiente

Variable dependiente	Categoría	Indicador	Ítems	Técnicas e instrumentos
La disipación de energía es la capacidad de pérdida de energía de un sistema, en este caso, se realiza a través de la fricción y de la deformación intencional de los elementos que cumplen la función de fusibles en el amortiguador. Con este mecanismo se desea evitar el daño en los elementos principales del sistema estructural cuando se someten a cargas sísmicas. Los amortiguadores más eficientes deben tener una gran capacidad de disipación de energía y desplazamientos para permitir brindarles a las estructuras una flexibilidad óptima.	Deformaciones	Parámetro medido en [mm], observable en el modelo computacional.	Deformaciones presentes en el modelo general en [mm]. Deformaciones localizadas en la zona directa de afectación en [mm].	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ficha de registro de datos</li> <li>- Programa computacional</li> <li>- Gráficas comparativas</li> </ul>
	Desplazamiento	Parámetro medido en [mm], observable en el modelo computacional.	Desplazamiento general medido por intervalos de aplicación de carga en [mm].	
	Disipación de energía	Parámetro medido en [kJ], observable en el modelo computacional.	Parámetro evaluado por intervalos de aplicación de carga en [kJ].	

Tabla 3- 3: Operacionalización de la variable independiente

Variable independiente	Categoría	Indicador	Ítems	Técnicas e instrumentos
<p>El amortiguador híbrido compuesto por fricción y fusibles es un sistema que cuenta con una geometría y características que pueden ser aprovechables en los sistemas estructurales, están compuestos por placas de acero y elementos friccionantes en los que se acumula la energía para ocasionar un fallo intencional en los elementos que operan como fusibles y así direccionar los efectos de falla hacia ese elemento y no hacia los componentes principales del sistema estructural. El amortiguador está diseñado para cumplir con ese objetivo y su localización permite también se sea reemplazado fácilmente.</p>	Materiales	Propiedades del material configurado para el análisis.	El modelo del material fue definido a través de un modelo multilineal de endurecimiento por plasticidad. Módulo de elasticidad [GPa] Coeficiente de Poisson Deformación plástica [mm <sup>-1</sup> ] Esfuerzo [MPa]	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ficha de registro de datos</li> <li>- Programa computacional</li> <li>- Gráficas comparativas</li> </ul>
	Geometría	Configuración geométrica de los elementos que forman parte del sistema de amortiguamiento.	Dimensiones en [mm] Espesores [mm]	
	Cargas	Parámetro medido en [kN], se aplica de acuerdo con las reacciones de la carga sísmica.	Configuración de la aplicación de carga reactiva en intervalos de 2 kN hasta el fallo del elemento.	
	Condicion es de frontera	Parámetros que son configurados para una idealización adecuada del modelo.	Apoyos Desplazamientos Tipo de contacto entre elementos Elementos de unión Restricciones del modelo	
	Modelo	Tipo de diseño de los amortiguadores, en este caso de evaluaron tres diferentes modelos para diagnosticar el que posee mejor rendimiento, a partir de ese implementar mejoras.		

### **3.6.Recolección de información:**

Se realizó una recolección de información sistemática con enfoque a la evaluación de amortiguadores híbridos, evaluación de propiedades de los materiales, geometría, espesores y dimensiones. Del mismo modo, en el análisis computacional, se tomó en cuenta la convergencia de los resultados para su registro en fichas de resultados junto con las capturas. Para este fin se emplearon técnicas como la recolección documental, la técnica del fichaje para el registro de los resultados de las simulaciones y el uso de imágenes.

### **3.7.Procesamiento de la información y análisis estadístico**

Los resultados fueron analizados mediante curvas de fuerza y desplazamiento, con estas curvas se evaluaron los valores obtenidos luego de la aplicación de intervalos de carga en los modelos, otro parámetro tabulado fue la capacidad de disipación de energía puesto que los amortiguadores deben contar con esa capacidad. Para encontrar las diferencias significativas entre un tipo de amortiguador y otro, se empleó el estadístico T – Student para comparar los resultados.

#### **3.7.1. Curvas de histéresis**

La curva de histéresis representa los ciclos de carga y desplazamiento que se presentan en los elementos que están sometidos a tensiones fluctuantes, en este caso, los elementos de amortiguamiento. El enfoque de análisis basado en la deformación permite identificar el ciclo de vida de los elementos cuando se someten a fatiga, adicionalmente, permiten identificar si se pueden producir grandes desplazamientos en el rango plástico, en la Figura 3-2 se presenta el ejemplo de una curva de histéresis de tensión – deformación para cargas cíclicas [21].



$n_1$ : número de elementos de la muestra 1

$n_2$ : número de elementos de la muestra 2

Luego de realizar el cálculo manual, se compara con el valor de  $t$  tabulado, estos datos vienen dados por tablas, de acuerdo con el número de grados de libertad. Finalmente, se comparan los dos valores y si el valor calculado es menor al tabulado, se acepta la hipótesis nula [22].

### **3.7.3. Modelo de elementos finitos**

Para el modelo por elementos finitos se tomó en cuenta tres etapas fundamentales, el preprocesado, la solución de análisis y el post procesado.

**Preprocesado:** en esta etapa inicial se tomó en cuenta la definición geométrica de cada uno de los modelos, otros parámetros importantes son las condiciones ambientales que se definen como condiciones de borde y, finalmente las condiciones de carga. El modelamiento CAD de los elementos fue realizado en superficies para ser analizado mediante elementos finitos en el programa de análisis computacional, en este programa se realizó un mallado empleando elementos tipo Shell 181, seguido de esto se asignaron los espesores y las propiedades de los materiales.

**Solución del análisis:** en esta etapa se realizan cálculos empleando métodos numéricos que el programa realiza para poder determinar las variables de respuesta.

**Post procesado:** en esta etapa se mostraron los resultados a través de tablas y gráficas, en el entorno del programa se reflejan mediante herramientas visuales con las que se pudo determinar de mejor manera los desplazamientos, deformaciones y esfuerzos en el modelo general y de forma más específica en secciones en las que los cambios fueron mayores.

### **3.7.4. Materiales**

Para el presente estudio se consideró un material cumpla con las condiciones del modelo multilineal de endurecimiento por plasticidad o *Multilinear Plasticity Hardening Model* en inglés. Este modelo permite evaluar las condiciones de fallo de los elementos luego de que las sollicitaciones sobrepasen el límite de elasticidad y el material trabaje en la zona plástica hasta el punto previo al colapso total del material.

De forma más específica, se aplicaron modelos multilineales de los materiales ASTM A 36 y para los pernos A 325, puesto que se requieren dos rigideces diferentes de acero

para cada amortiguador propuesto, con el objetivo de que la menor rigidez esté destinada a la disipación de energía mediante el fallo del elemento.

#### **3.7.4.1. Materiales asignados en la simulación**

Uno de los materiales más utilizados en el desarrollo de sistemas estructurales es el acero ASTM A36 debido a sus propiedades mecánicas. En los sistemas de disipación de energía por medio del mecanismo de fricción, este material resulta práctico puesto que brinda un buen desempeño y es fácil de encontrar en el contexto ecuatoriano. A continuación, se muestran las propiedades del acero.

Tabla 3- 4: Propiedades del acero estructural ASTM A36 [23]

<b>Propiedad</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidades</b>
Módulo de elasticidad	200	GPa
Coefficiente de Poisson	0,26	NA
Límite de fluencia	250	MPa
Resistencia a la tracción	400 - 550	MPa

Adicionalmente a las propiedades del acero que se reflejan en la Tabla 3-4 se debe tomar en cuenta que los sistemas de amortiguación trabajan dentro del rango plástico de los materiales y su análisis debe realizarse con una perspectiva no lineal, para ello se deben conocer los datos de deformaciones plásticas. En la Figura 3-3 se presenta una curva del material con los valores de deformación y esfuerzos, modelo que se usó en los materiales para el análisis computacional.

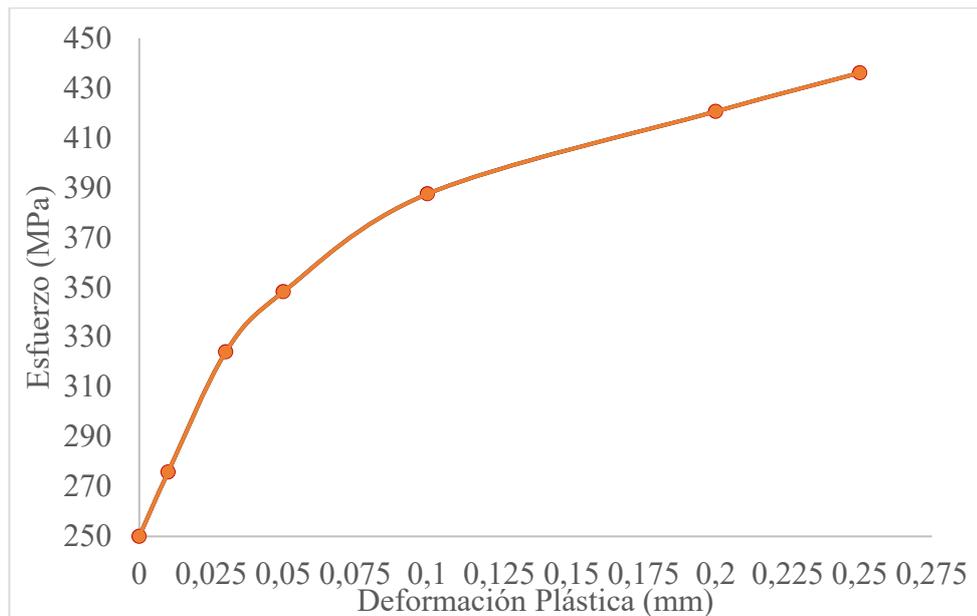


Figura 3- 3: Curva de deformación plástica para análisis no lineales del acero ASTM A36 [24]

Para modelar los diferentes tipos de amortiguadores se utilizaron las propiedades del acero ASTM A36, teniendo en cuenta un modelo de endurecimiento multilíneal isotrópico, esto permitió conocer el comportamiento estructural real de estos dispositivos.

El endurecimiento multilíneal se define mediante una serie de puntos de deformación plástica/esfuerzo de fluencia, el modelo utilizado en el modelamiento por elementos finitos de los amortiguadores se presenta en la Tabla 3-5 con su respectiva gráfica mostrada en la Figura 3-3.

Tabla 3- 5: Datos ingresados para configurar el modelo de endurecimiento isotrópico multilíneal.

<b>Plastic Strain (m m<sup>-1</sup>)</b>	<b>Stress (MPa)</b>
0,00	250,00
0,01	275,80
0,03	324,05
0,05	348,20
0,10	387,49
0,20	420,58
0,25	436,09

Otro material considerado dentro del análisis fue el de los pernos, en estos casos se emplean pernos estructurales por lo que se consideró el material de los pernos

estructurales galvanizados ASTM A325. En la Tabla 3-6 se indican las propiedades del material.

Tabla 3- 6: Propiedades de los pernos estructurales ASTM A325 para el modelado considerando la bilinealidad del material [25]

Propiedad	Valor	Unidades
Módulo de elasticidad	210,00	GPa
Coefficiente de Poisson	0,29	NA
Límite de fluencia	660,00	MPa
Resistencia a la tracción	1630,00	MPa

Al igual que en el caso del material de los componentes que se someten a fricción, se consideró el campo de acción de los pernos, en este caso, también trabajan dentro del rango plástico, sin embargo, en el caso de la configuración del material para el modelamiento, se tomó en cuenta que el nivel de deformación debe ser bajo y que se debe aplicar un modelo de endurecimiento isotrópico bilineal, por ese motivo se tomó en consideración las propiedades de la Tabla 3-5. Otro dato importante del modelo del material corresponde al módulo tangente que se encuentra en la curva de esfuerzo – deformación del material. En la Figura 3-4 se muestra el comportamiento bilineal del material.

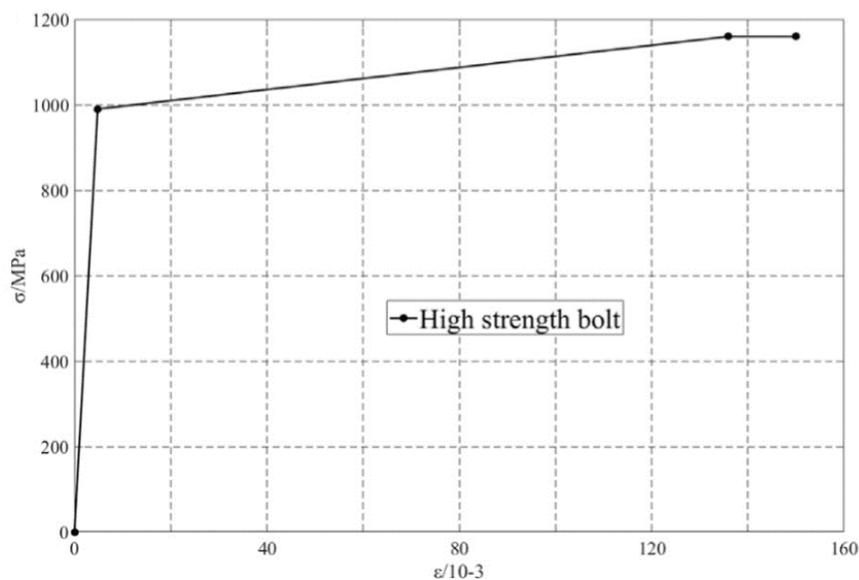


Figura 3- 4: Curva de esfuerzo – deformación bilineal de los pernos ASTM A325[25]

Además del modelo del material, se consideró también la tensión de los pernos, para ello se siguieron las especificaciones de la AISC en donde se recomienda aplicar una pretensión de 40 kip como mínimo. En la Figura 3-5 se relaciona la pretensión con el número de giros de la tuerca, en el caso de ensamblar un sistema real, sin embargo, para el modelamiento se tomó en cuenta ese valor.

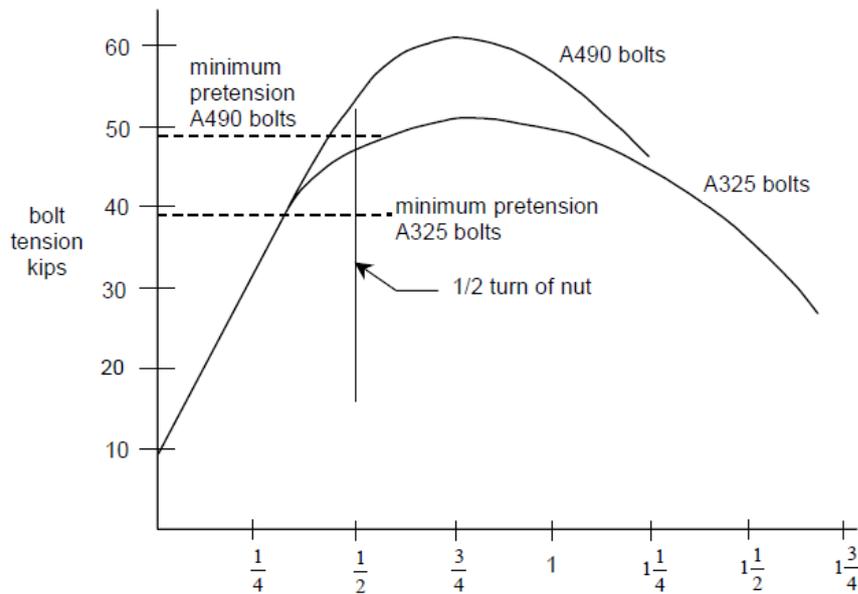


Figura 3- 5: Curva de esfuerzo – deformación bilineal de los pernos ASTM A325 [26]

### 3.7.5. Configuración del edificio de mediana altura – carga reactiva

Para la carga reactiva se planteó una edificación básica de mediana altura con la cual se obtuvo la carga cortante en el pórtico crítico de la planta baja, se empleó la combinación de carga crítica incluyendo fuerzas laterales, con estas cargas se configuraron las reacciones en los diseños de los amortiguadores planteados para el estudio. A continuación, se describen las características de la edificación planteada.

En la Figura 3-6 se presenta la configuración del edificio de mediana altura, el valor de la altura por entrepiso es de 2,80 m con 6 vanos de 4 m en el sentido Y, en el sentido X se plantearon dos vanos de 4 m de longitud. La edificación cuenta con columnas cuadradas de 35x35 cm y vigas tipo I de secciones compactas. A la izquierda se presenta la vista en planta, mientras que las siguientes dos visualizaciones son la elevación en sentido X y en sentido Y.

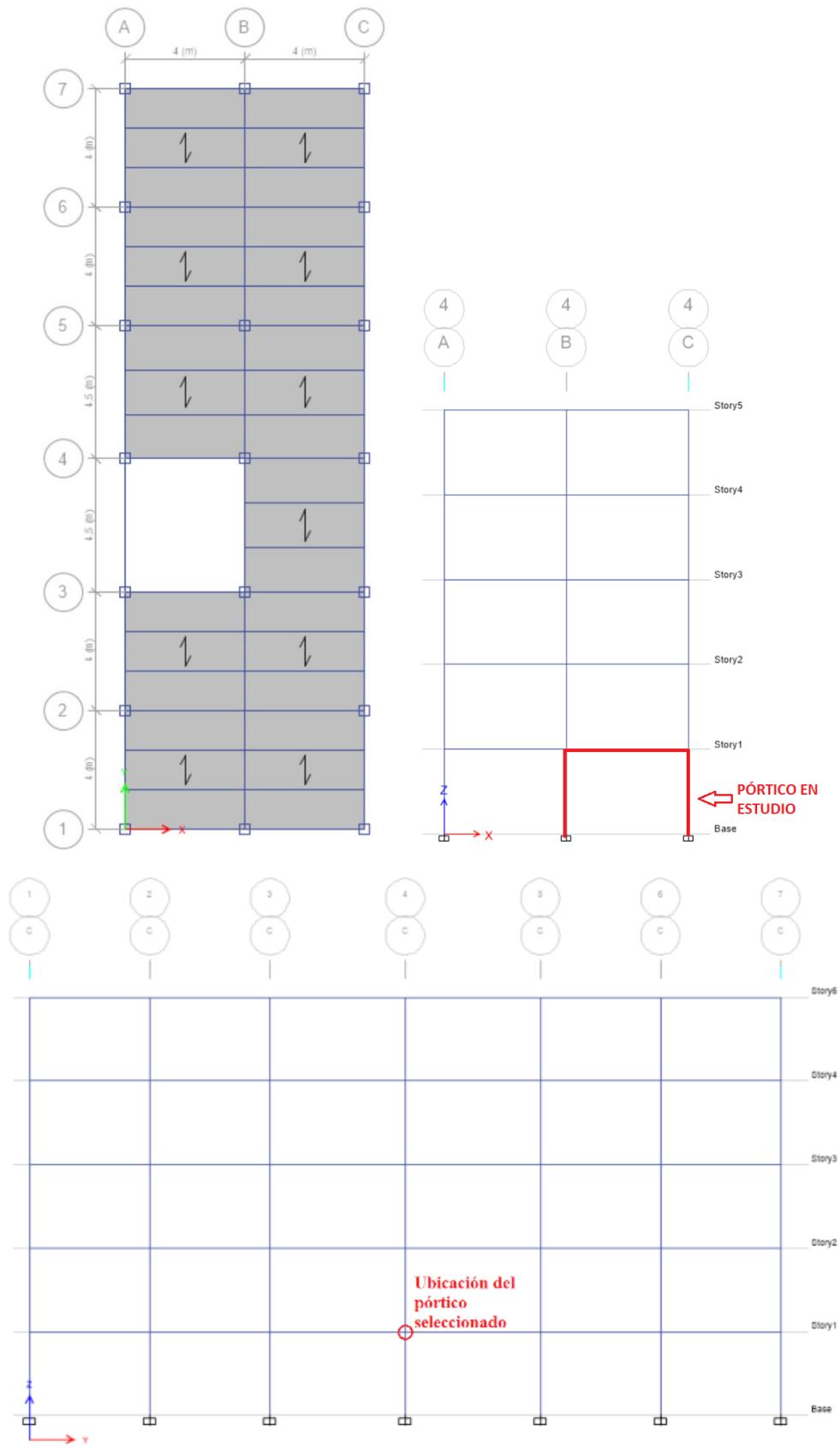


Figura 3- 6: Configuración de la edificación

En los casos de carga se configuraron las solicitadas en la NEC 15 tanto para cargas muertas como para cargas vivas. Para el caso de las cargas sísmicas se realizó una configuración del espectro de la NEC conforme a la zona de estudio y el tipo de edificación que se analizó.

En la Tabla 3-7 se especifican los valores que fueron seleccionados para la obtención del coeficiente de cortante que será empleado para el análisis sísmico en X, Y. El valor calculado fue de 1,19 teniendo en cuenta las condiciones de sitio y configuración de la edificación.

Tabla 3- 7: Determinación del período y espectro de respuesta sísmica

<b>Coefficientes de sitio</b>	
Zona sísmica V - Factor Z	0,40
Tipo de suelo asumido para el análisis	D
Coef. de amplificación del suelo (Fa)	1,20
Coef. de amplif. diseño en roca (Fd)	1,19
Coef. comportamiento no lineal del suelo (Fs)	1,28
Relación de aceleración espectral ( $\eta$ )	2,48
Factor de la ubicación geográfica (r)	1,00
<b>Coefficiente de importancia (I)</b>	<b>1,00</b>
Otras edificaciones	
<b>Regularidad / configuración estructural</b>	
Irregularidad en planta ( $\emptyset_p$ )	1,00
Irregularidad en elevación ( $\emptyset_e$ )	1,00
<b>Determinación del período de vibración (Ta)</b>	<b>0,62 s</b>
Coeficiente del tipo de estructura (Ct)	0,07
$\alpha$	0,80
Altura de la edificación (Hn)	14,80 m
<b>Factor de reducción y resistencia sísmica (R)</b>	<b>1,00</b>
Se aplicó un espectro de diseño sin reducción de carga sísmica puesto que los amortiguadores deben tener la capacidad de disipar energía en gran magnitud, por ese motivo se requiere de la carga sísmica completa.	
<b>Determinación del período límite de vibración elástico (Tc)</b>	<b>0,70 s</b>
<b>Determinación del espectro elástico de aceleraciones (Sa)</b>	<b>1,19 g</b>
<b>Determinación del espectro elástico de aceleraciones (ShC)</b>	<b>1,19</b>

### **3.7.5.1.Fuerzas mínimas requeridas para el diseño**

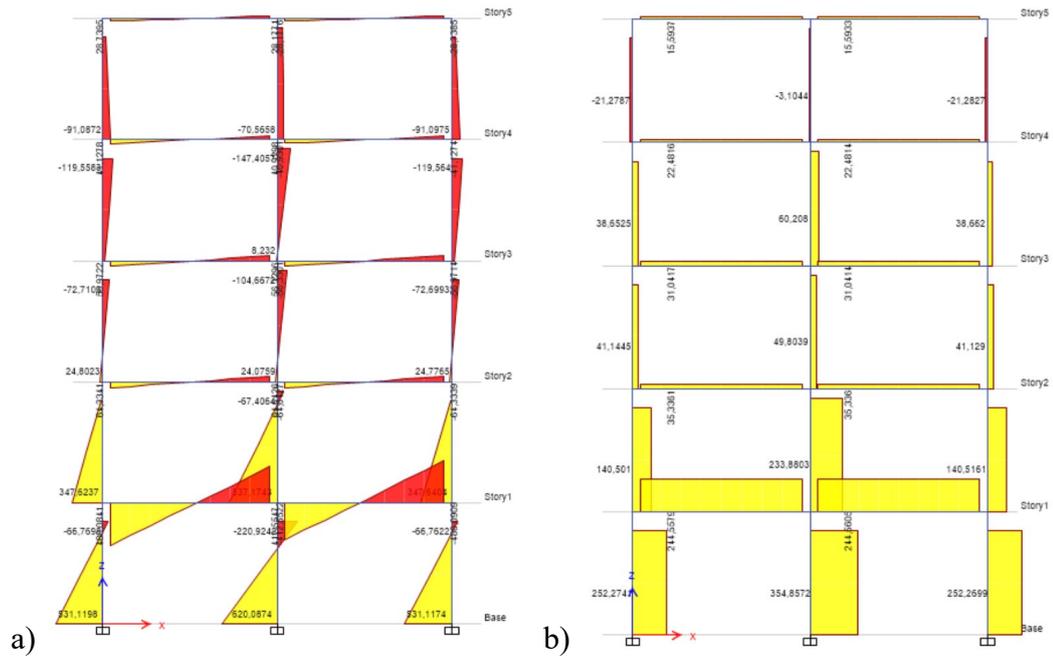
La edificación tomada como referencia para la obtención de las cargas sísmicas se calculó con el espectro de diseño de la NEC tomando en cuenta un factor de importancia de 1 puesto que la edificación no es de uso especial, adicionalmente, se tomó un factor de reducción de carga sísmica de 6 debido a que la edificación predimensionada es de pórticos intermedios a momento.

Sin embargo, para encontrar la carga de diseño del amortiguador se empleó la fuerza cortante paralela a la dirección de la carga sísmica, es decir la fuerza cortante en X. Para esto se tomó en consideración los requisitos de la norma peruana E031 que indica que la estructura por encima del nivel de base debe ser diseñada considerando todos los requisitos para estructuras no aisladas de la que se toma la fuerza de corte sin reducción de fuerzas sísmicas, a menos que se tome en cuenta las siguientes consideraciones [27]:

- Factor de reducción R para fuerzas sísmicas sobre el sistema sísmico calculado como  $3/8$  de R [27].
- Tomar el factor R de reducción en un intervalo no menor que 1 ni mayor que 2 [27].

En la Tabla 3-7 se identifican los parámetros empleados para el cálculo de la fuerza cortante sin reducción de carga sísmica.

En la Figura 3-7 se presentan los pórticos que cuentan con valores fuerza cortante máxima, se visualizó que lo pórticos de la planta baja presentan un comportamiento más crítico por lo que se tomó la fuerza cortante paralela a la dirección de aplicación de la carga sísmica.



deformación con la finalidad de que la energía se disipe en esta zona incluso hasta llegar al fallo, por ese motivo, este tipo de amortiguadores se conecta entre vigas y sistemas de arriostramiento de pórticos, de este modo se puede reemplazar el amortiguador cuando este ha llegado a plastificarse, mientras que elementos estructurales como vigas y columnas se mantienen intactos.

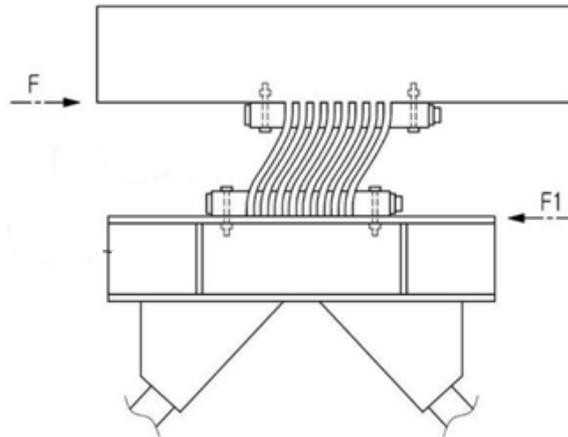


Figura 3- 9: Deformación de las placas débiles del amortiguador

En la Figura 3-10 se indica la forma de conexión del amortiguador en la zona de arriostramiento entre la viga y arriostramiento en V.

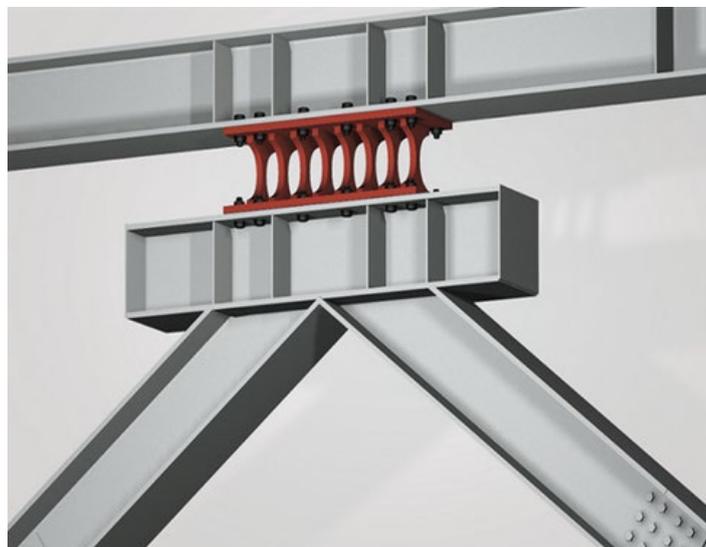


Figura 3- 10: Ejemplo de conexión entre el amortiguador y sistema de arriostramiento

### 3.7.6. Modelamiento de superficies en contacto

#### 3.7.6.1. Contacto tipo bonded

Es un modelo de contacto que hace que las regiones de contacto estén pegadas, no se permite el deslizamiento ni la separación entre caras o aristas. Este tipo de contacto permite una solución lineal, ya que la longitud/área de contacto no cambiará durante la aplicación de la carga. Si se determina el contacto en el modelo matemático, se cerrará cualquier separación y se ignorará cualquier penetración inicial. Este modelo se utilizará en las superficies soldadas ya que unen unos elementos con otros. El comportamiento de este tipo de contacto se muestra detalladamente en la Figura 3-11.

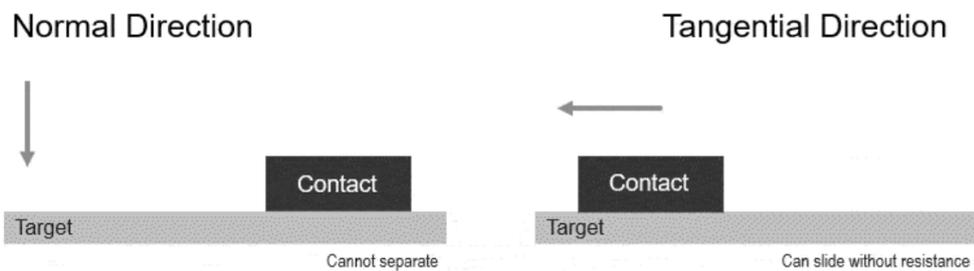


Figura 3- 11: Comportamiento del contacto de tipo bonded que no permite la separación entre superficies.

#### 3.7.6.2. Contacto tipo friccional

En esta situación, las dos geometrías en contacto pueden soportar tensiones de cizallamiento de hasta cierta magnitud a través de su interfaz antes de que empiecen a deslizarse una respecto a la otra. Este estado se conoce como "adherencia". El modelo define una tensión de cizalladura equivalente a la que comienza el deslizamiento sobre la geometría como una fracción de la presión de contacto. Una vez superado el esfuerzo cortante, las dos geometrías se deslizarán una respecto a la otra. El coeficiente de fricción puede ser cualquier valor no negativo.

Este modelo será utilizado en el modelamiento de las superficies de los amortiguadores que trabajan a fricción ya que son las que disipan la energía causada por las cargas sísmicas el comportamiento de este tipo de contacto se presenta en la Figura 3-12.

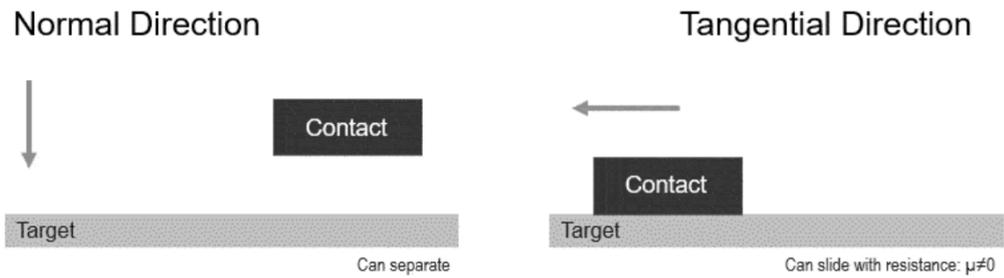


Figura 3- 12: Comportamiento del contacto de tipo friccional entre dos superficies en contacto.

### 3.8. Variables respuesta o resultados esperados

Los resultados de deformación del amortiguador híbrido que se proponga en el trabajo investigativo variarán de forma significativa de los amortiguadores que se estudien de la muestra.

En el amortiguador híbrido propuesto se obtendrá la menor deformación posible dentro de condiciones factibles para el mercado local.

Para determinar la deformación de los elementos que forman parte del amortiguador se tomarán en cuenta los daños en el material y estos parámetros se verificarán en el análisis computacional mediante valores numéricos y la representación gráfica que se desarrolla en el programa computacional.

## CAPÍTULO IV

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 4.1. Configuraciones de amortiguadores híbridos

Se seleccionaron tres diferentes tipos de amortiguadores híbridos para los análisis del comportamiento sísmico en edificaciones de mediana altura. A continuación, se describen los diseños que fueron modelados para el análisis computacional.

Tabla 4- 1: Descripción de los elementos modelados

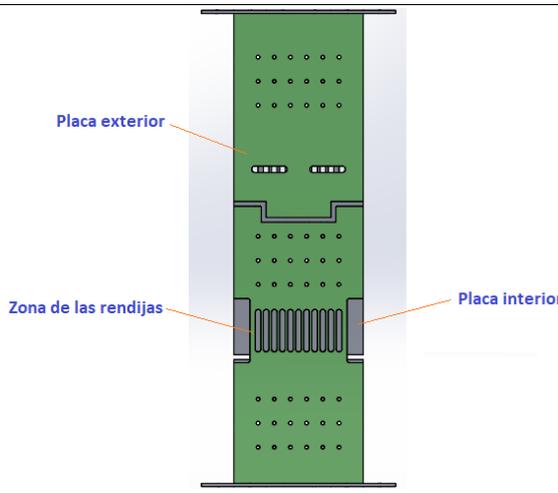
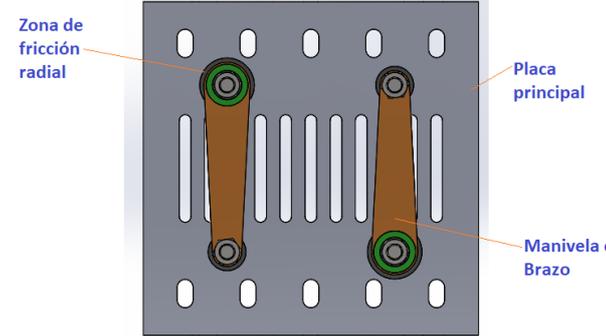
Elemento modelado	Características
 <p style="text-align: center;">AMH_01</p>	<p>Este tipo de amortiguador se aplica para sistemas similares a muros de corte. Las dimensiones generales son: 2,96 m de altura y un ancho de 1,20 m. Se compone de placas que interactúan en fricción, formando una composición en capas, las dos placas exteriores son de 15 mm, mientras que la placa intermedia es de 20 mm. Las rendijas se ubican a la altura de 0,85 m y tiene una dimensión de 35 mm de ancho x 265 mm de alto.</p>
 <p style="text-align: center;">AMH_02</p>	<p>Este tipo de amortiguador se emplea para sistemas de pórticos arriostrados. Las dimensiones generales son: 800 mm x 800 mm, espesor de la placa principal de 20mm. La zona de fricción se compone de manivelas y de la zona de contacto de fricción radial. La dimensión de los agujeros de la rendija es de 260 mm x 28 mm.</p>

Tabla 4-1: Descripción de los elementos modelados (*continuación*)

Elemento modelado	Características
<p style="text-align: center;">AMH_03</p>	<p>Este tipo de amortiguador se emplea para sistemas de pórticos arriostrados. Las dimensiones generales son: 850 mm de longitud x 505 mm de altura y 250 mm de ancho. Las placas tienen 20 mm de espesor</p>

En la Figura 4-2 se presenta una tabla con la secuencia de pasos que fueron necesarios para completar el análisis por elementos finitos hasta llegar a los resultados.

Tabla 4- 2: Secuencia de pasos para realizar el análisis

Paso	Descripción																																								
<p>1. Geometría en elementos tipo Shell 181</p>	<p>Modelado de la geometría de los amortiguadores con elementos tipo Shell 181</p>																																								
<p>2. Modelamiento del material no lineal.</p> <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <thead> <tr> <th></th> <th>A</th> <th>B</th> <th>C</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>Temperature (C)</td> <td>Plastic Strain (m m<sup>-1</sup>)</td> <td>Stress (MPa)</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>22</td> <td>0</td> <td>250</td> </tr> <tr> <td>*</td> <td></td> <td>0,01</td> <td>275,8</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td>0,03</td> <td>324,05</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td>0,05</td> <td>348,2</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td>0,1</td> <td>387,49</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td>0,2</td> <td>420,58</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td>0,25</td> <td>436,09</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td>*</td> <td></td> </tr> </tbody> </table>		A	B	C	1	Temperature (C)	Plastic Strain (m m <sup>-1</sup> )	Stress (MPa)	2	22	0	250	*		0,01	275,8			0,03	324,05			0,05	348,2			0,1	387,49			0,2	420,58			0,25	436,09			*		<p>Ingreso de datos de comportamiento plástico del material</p>
	A	B	C																																						
1	Temperature (C)	Plastic Strain (m m <sup>-1</sup> )	Stress (MPa)																																						
2	22	0	250																																						
*		0,01	275,8																																						
		0,03	324,05																																						
		0,05	348,2																																						
		0,1	387,49																																						
		0,2	420,58																																						
		0,25	436,09																																						
		*																																							

Tabla 4-2: Secuencia de pasos para realizar el análisis (*continuación*)

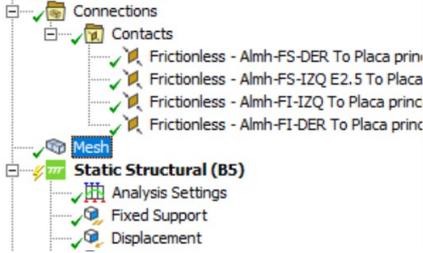
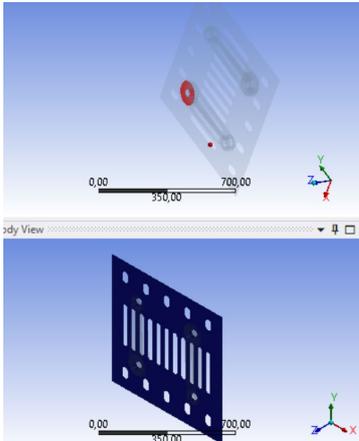
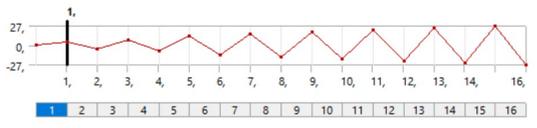
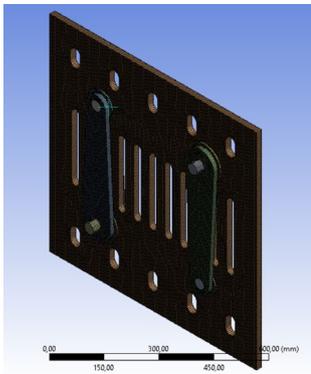
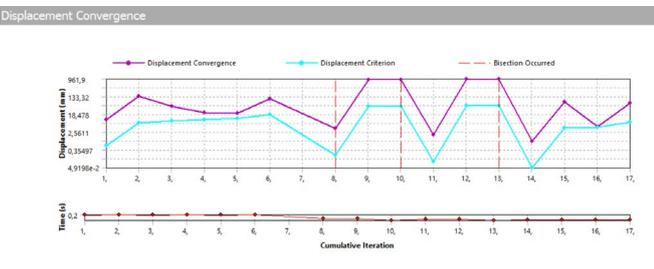
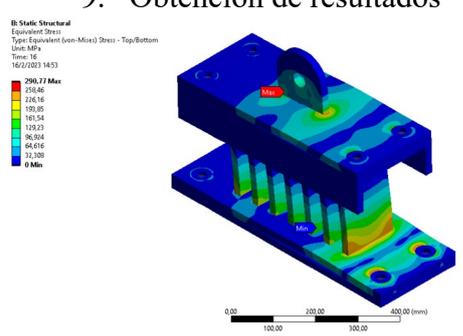
Paso	Descripción
<p>3. Condiciones de frontera</p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Apoyos fijos en la placa base</li> <li>- Pretensión de pernos en las placas</li> </ul>
<p>4. Contacto entre superficies</p> 	<p>Contactos de tipo sin fricción que permiten desplazamiento entre las bridas del octógono superior, inferior y la placa base.</p>
<p>5. Ciclo de carga</p> 	<p>20 intervalos de carga de 12,5 KN</p>
<p>6. Mallado</p> 	<p>Elementos tipo shell</p>

Tabla 4-2: Secuencia de pasos para realizar el análisis (*continuación*)

Paso	Descripción
<p style="text-align: center;"><b>7. Postprocesado</b></p> 	<p>Solución del modelo de elementos finitos, convergencia en desplazamientos</p>
<p style="text-align: center;"><b>8. Solución</b></p> <pre> ----- EQUIL ITER 11 COMPLETED. NEW TRIANG MATRIX. MAX DOF INC= -34.78 DISP CONVERGENCE VALUE = 15.08 CRITERION= 29.45 &lt;&lt;&lt; CONVERGED LINE SEARCH PARAMETER = 0.4335 SCALED MAX DOF INC = -15.08 FORCE CONVERGENCE VALUE = 0.5448E+06 CRITERION= 519.5 MOMENT CONVERGENCE VALUE = 0.7649E+07 CRITERION= 26.00 EQUIL ITER 12 COMPLETED. NEW TRIANG MATRIX. MAX DOF INC= -31.76 DISP CONVERGENCE VALUE = 31.76 CRITERION= 32.12 &lt;&lt;&lt; CONVERGED LINE SEARCH PARAMETER = 1.000 SCALED MAX DOF INC = -31.76 FORCE CONVERGENCE VALUE = 1.615. CRITERION= 530.1 MOMENT CONVERGENCE VALUE = 0.8466E+05 CRITERION= 27.74 EQUIL ITER 13 COMPLETED. NEW TRIANG MATRIX. MAX DOF INC= -26.47                     </pre>	<p>Modelo MEF solucionado en el tiempo establecido</p>
<p style="text-align: center;"><b>9. Obtención de resultados</b></p> 	<p>Obtención de resultados luego de concluir el análisis.</p>

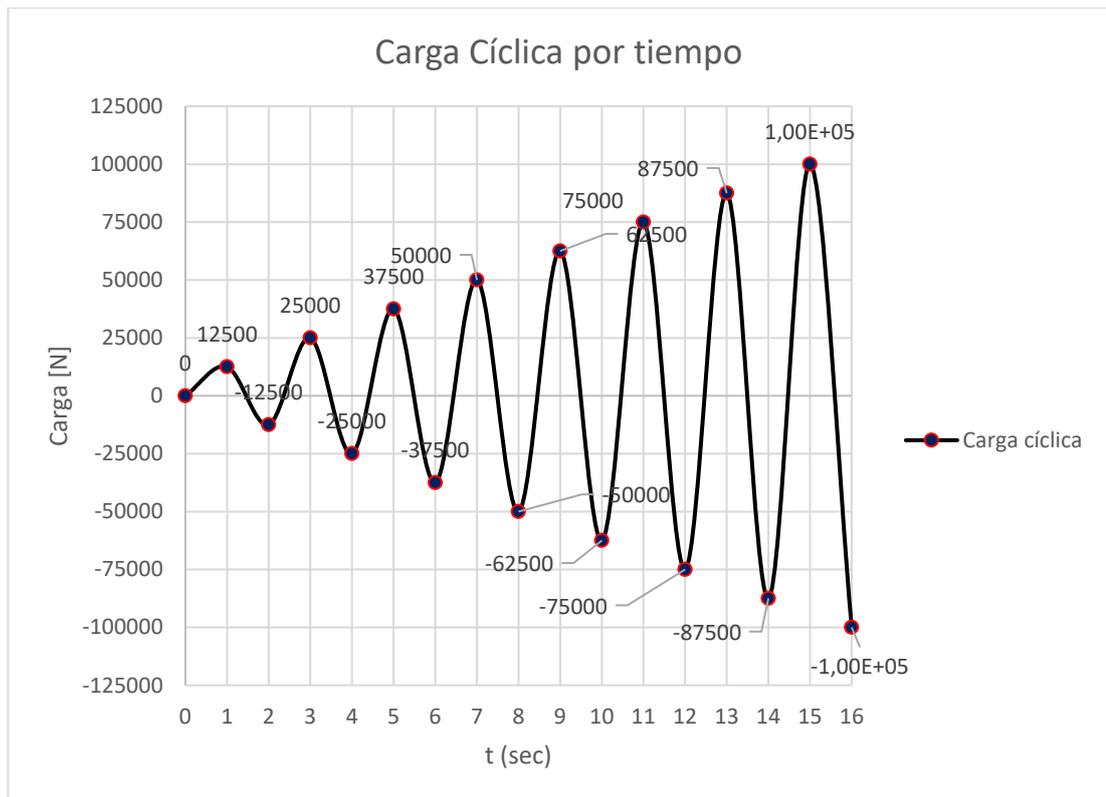


Figura 4- 1. Carga cíclica por intervalos de tiempo aplicada a todos los modelos de amortiguador.

En la Figura 4-1 se presenta el comportamiento de la carga cíclica aplicada en cada uno de los amortiguadores de fricción se observan 16 incrementos de 1 segundo cada uno, para esto se segmentó una carga de 100 kN empezando por un valor de 12,5 kN en partes uniformes hasta llegar al valor máximo, con esto se puede simular la carga sísmica y obtener las reacciones en la base, los esfuerzos y desplazamientos que son datos relevantes para conocer el desempeño del dispositivo.

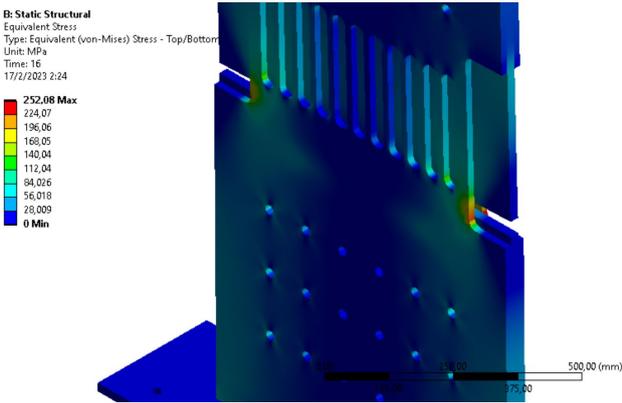
#### 4.2. Evaluación del desempeño de los amortiguadores híbridos

Se determinó los esfuerzos de Von Mises para cada uno de los modelos evaluados AMH\_01, AMH\_02 y AMH\_03. A continuación se obtuvieron los resultados de las deformaciones y se realizaron las curvas comparativas de carga y esfuerzo. Posteriormente se obtuvo las gráficas histeréticas de cada modelo y se determinó el modelo de amortiguador más efectivo en función del número de ciclos reflejado en las tablas y figuras siguientes.

## 4.2.1. Amortiguador de rendija de placas interconectadas.

### 4.2.1.1. Esfuerzo equivalente de Von Mises

Tabla 4- 3. Resultados de esfuerzos obtenidos para el Amortiguador de placas interconectadas AMH-01

	UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA MAESTRIA EN INGENIERÍA CIVIL MENCIÓN ESTRUCTURAS METÁLICAS		
<b>Modelo</b>	AMH 01	<b>Simulación</b>	01
<b>Material</b>	ASTM A36	<b>Pernos</b>	ASTM A325
<b>Características de simulación</b>	<b>Carga aplicada</b>	<b>Cond. Frontera</b>	<b>Tipo de análisis</b>
	Ciclos de carga incremental de 12,5 KN y desplazamientos	Apoyo fijo en la base	Estático no lineal
<b>Software utilizado</b>	ANSYS Módulo Workbench		
<b>Nº de nodos</b>	79536	<b>Tipo de elemento</b>	Shell 181 (superficie)
<b>Nº de elementos</b>	75579	<b>Calidad de malla</b>	0,9947
<b>Características del ordenador</b>	Intel Core i7 CPU 2.60 GHz; 16 núcleos; Tarjeta de video NVIDIA 6GB, 32 GB Memoria RAM;		
<b>Realizado por:</b>	Ing. Mario Jaya	<b>Revisado por:</b>	Ing. César Arroba, Mg.
		<b>Fecha:</b>	02-02-2023
<b>RESULTADOS DE SIMULACIÓN</b>			
<b>Carga [N]</b>	<b>Esfuerzo [MPa]</b>		
0	0		
12500	38,84		
-12500	38,85		
25000	77,67		
-25000	77,70		
37500	97,09		
-37500	46,62		
50000	73,79		
-50000	62,16		
62500	89,32		
-62500	77,70		
75000	104,84		
-75000	93,31		
87500	120,39		
-87500	114,59		
100000	140,37		
-100000	155,87		
100000	252,08	252,08	
<b>Observaciones:</b> Se observa concentración de esfuerzos en la rendija inferior del amortiguador específicamente en la reducción de área de la placa inferior frontal debido al momento generado entre el apoyo fijo y el punto de aplicación de la carga.			

En la Tabla 4-4 se observa los esfuerzos que se generan por cada ciclo de carga se empieza por un valor de 38.83 MPa en el primer ciclo de 12,5 kN y se llega a un máximo de 252,08 MPa en el último ciclo que es un valor ligeramente cercano al límite de fluencia del material.

Tabla 4- 4. Datos de esfuerzo por carga obtenidos para el primer modelo de amortiguador.

Ciclo	Carga [N]	Esfuerzo Eq. Máximo [MPa]	Esfuerzo Eq. Promedio [MPa]
0	0	0	0
1	12500	38,84	2,19
2	-12500	38,85	2,20
3	25000	77,67	4,40
4	-25000	77,70	4,40
5	37500	97,09	5,50
6	-37500	46,62	2,64
7	50000	73,79	4,18
8	-50000	62,16	3,52
9	62500	89,32	5,06
10	-62500	77,70	4,40
11	75000	104,84	5,94
12	-75000	93,31	5,28
13	87500	120,39	6,81
14	-87500	114,59	6,15
15	100000	140,37	7,69
16	-100000	155,87	7,03
16	-100000	252,08	17,58

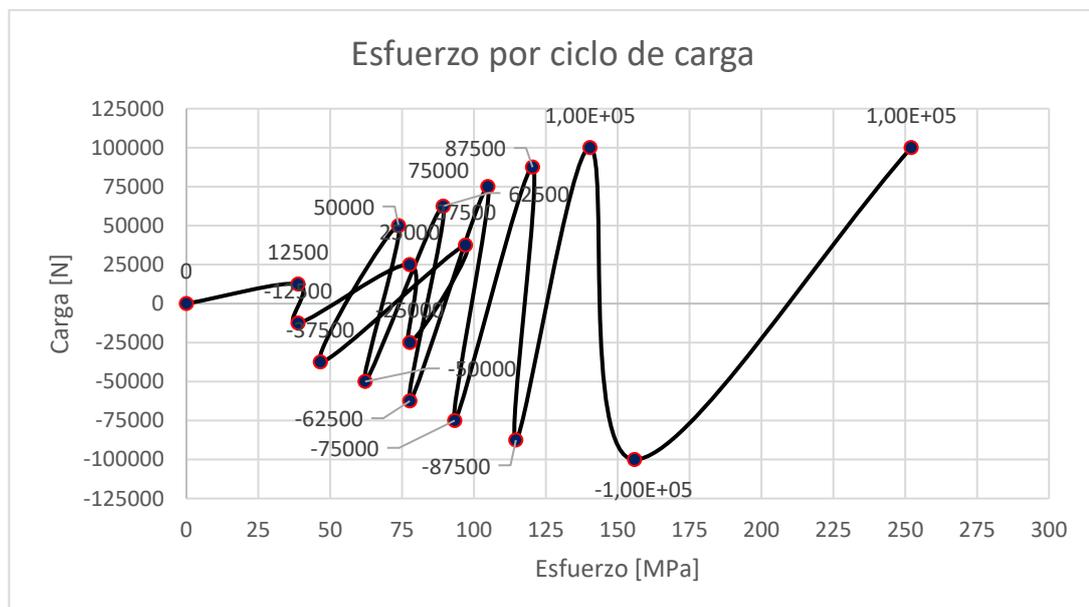


Figura 4- 2. Comportamiento de los esfuerzos obtenidos en base a la carga aplicada. Con los datos de la Tabla 4-4 se trazó la curva que se muestra en la Figura 4-2 se observa que los esfuerzos se incrementan con cada intervalo de carga a excepción de los ciclos intermedios donde decrece esto puede ser por los aspectos no lineales de la geometría y el material.

#### 4.2.1.2. Deformaciones.

Tabla 4- 5. Deformaciones totales obtenidas para el amortiguador de rendija de placas interconectadas.

	UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA MAESTRIA EN INGENIERÍA CIVIL MENCIÓN ESTRUCTURAS METÁLICAS			
<b>Modelo</b>	AMH_01	<b>Simulación</b>		01
<b>Material</b>	ASTM A36	<b>Pernos</b>		ASTM A325
<b>Características de simulación</b>	<b>Carga aplicada</b>	<b>Cond. Frontera</b>	<b>Tipo de análisis</b>	<b>Tiempo de procesamiento</b>
	Ciclos de carga incremental de 12.5 KN y desplazamientos	Apoyo fijo en la base	Estático no lineal	8 horas
<b>Software utilizado</b>	ANSYS Módulo Workbench			
<b>N° de nodos</b>	79536	<b>Tipo de elemento</b>	Shell 181 (superficie)	
<b>N° de elementos</b>	75579	<b>Calidad de malla</b>	0.9947	
<b>Características del ordenador</b>	Intel Core i7 CPU 2.60 GHz; 16 núcleos; Tarjeta de video NVIDIA 6GB, 32 GB Memoria RAM;			
<b>Realizado por:</b>	Ing. Mario Jaya	<b>Revisado por:</b>	Ing. César Arroba, Mg.	
		<b>Fecha:</b>	02-02-2023	

Tabla 4-5. Deformaciones totales obtenidas para el amortiguador de rendija de placas interconectadas (*continuación*)

RESULTADOS DE SIMULACIÓN	
Carga [N]	Deformación [mm]
0	0,00000
12500	0,41131
-12500	0,41131
25000	0,82262
-25000	0,82262
37500	1,02830
-37500	0,49357
50000	0,78149
-50000	0,65810
62500	0,94602
-62500	0,82262
75000	1,11060
-75000	0,98704
87500	1,27500
-87500	1,15120
100000	1,43930
-100000	1,31500
100000	3,29010

**B: Static Structural**  
 Total Deformation  
 Type: Total Deformation  
 Unit: mm  
 Time: 16  
 17/2/2023 2:44

**3,2901 Max**  
 2,9245  
 2,559  
 2,1934  
 1,8278  
 1,4623  
 1,0967  
 0,73113  
 0,36557  
**0 Min**

**Observaciones:** La deformación máxima ocurre en la placa superior del amortiguador que es el punto donde se aplicó la carga, se observa que las disminuciones de sección influyen directamente en aumentar la deformación ya que como se observa en la figura el conjunto empieza a deformarse en la hendidura de las placas inferiores.

En la Tabla 4-6 se presentan los resultados de deformación total máxima obtenida para el amortiguador de rendija, donde se tiene un comportamiento creciente empezando por 0,4113 mm en el primer ciclo y llegando a un máximo de 3,29 mm al aplicarse la carga máxima de 100 kN

Tabla 4- 6. Resultados de deformación obtenidos para el amortiguador de placas interconectadas.

Ciclo	Carga [N]	Deformación [mm]
0	0	0
1	12500	0,41131
2	-12500	0,41131
3	25000	0,82262
4	-25000	0,82262
5	37500	1,02830
6	-37500	0,49357
7	50000	0,78149
8	-50000	0,65810

Tabla 4-6. Resultados de deformación obtenidos para el amortiguador de placas interconectadas (*continuación*)

Ciclo	Carga [N]	Deformación [mm]
9	62500	0,94602
10	-62500	0,82262
11	75000	1,11060
12	-75000	0,98704
13	87500	1,27500
14	-87500	1,15120
15	1,00E+05	1,43930
16	-1,00E+05	1,31500
17	-1,00E+05	3,29010



Figura 4- 3.Comportamiento de las deformaciones por ciclo de carga del amortiguador.

Con los datos de la Tabla 4-6 se trazó la curva de deformaciones de la Figura 4-3 al igual que con los esfuerzos el comportamiento es creciente, sin embargo, se muestra que en los ciclos intermedios hay inestabilidad debido a las características no lineales del material y las superficies en contacto.

#### 4.2.1.3. Datos de histéresis para el amortiguador de placas interconectadas.

Tabla 4- 7. Datos de histéresis para el amortiguador de placas interconectadas

Tiempo [s]	Desplazamiento [mm]	Reacción [N]	Tiempo [s]	Desplazamiento [mm]	Reacción [N]
0,2	8,23E-02	2500	8,2	1,65	50000
0,4	0,16	5000	8,4	0,90	27500
0,7	0,29	-8750	8,7	0,16	-5000
1,0	-0,41	-12500	9,0	-0,95	-28750
1,2	-0,25	-7500	9,2	-2,06	-62500
1,4	-8,23E-02	-2500	9,4	-1,23	-37500
1,7	-0,165	5000	9,7	-0,41	12500
2,0	0,41	12500	10,0	0,82	25000
2,2	0,16	5000	10,2	2,06	62500
2,4	8,23E-02	2500	10,4	1,15	35000
2,7	0,45	-13750	10,7	0,25	-7500
3,0	-0,82	-25000	11,0	-1,11	-33750
3,2	-0,49	-15000	11,2	-2,47	-75000
3,4	-0,16	-5000	11,4	-1,48	-45000
3,7	-0,33	10000	11,7	-0,49	15000
4,0	0,82	25000	12,0	0,99	30000
4,2	0,41	12500	12,2	2,47	75000
4,4	6,27E-07	2,97E-06	12,4	1,40	42500
4,7	0,41	-12500	12,7	0,33	-10000
5,0	-1,0283	-31250	13,0	-1,28	-38750
5,2	-1,23	-37500	13,2	-2,88	-87500
5,4	-0,74	-22500	13,4	-1,73	-52500
5,7	-0,25	7500	13,7	-0,58	17500
6,0	0,49	15000	14,0	1,15	35000
6,2	1,23	37500	14,2	2,88	87500
6,4	0,66	20000	14,4	1,65	50000
6,7	8,23E-02	-2500	14,7	0,41	-12500
7,0	-0,78	-23750	15,0	-1,44	-43750
7,2	-1,65	-50000	15,2	-3,29	100000
7,4	-0,99	-30000	15,4	-1,98	-60000
7,7	-0,33	10000	15,7	-0,66	20000
8,0	0,66	20000	16,0	1,32	40000
8,2	1,65	50000	16,2	3,29	100000

En la Tabla 4-7 se muestran 64 ciclos de desplazamiento con su respectiva reacción medida en la base del amortiguador, con esto se traza la curva histerética mostrada en la Figura 4-4.

#### 4.2.1.4. Curva de histéresis del amortiguador de placas interconectadas

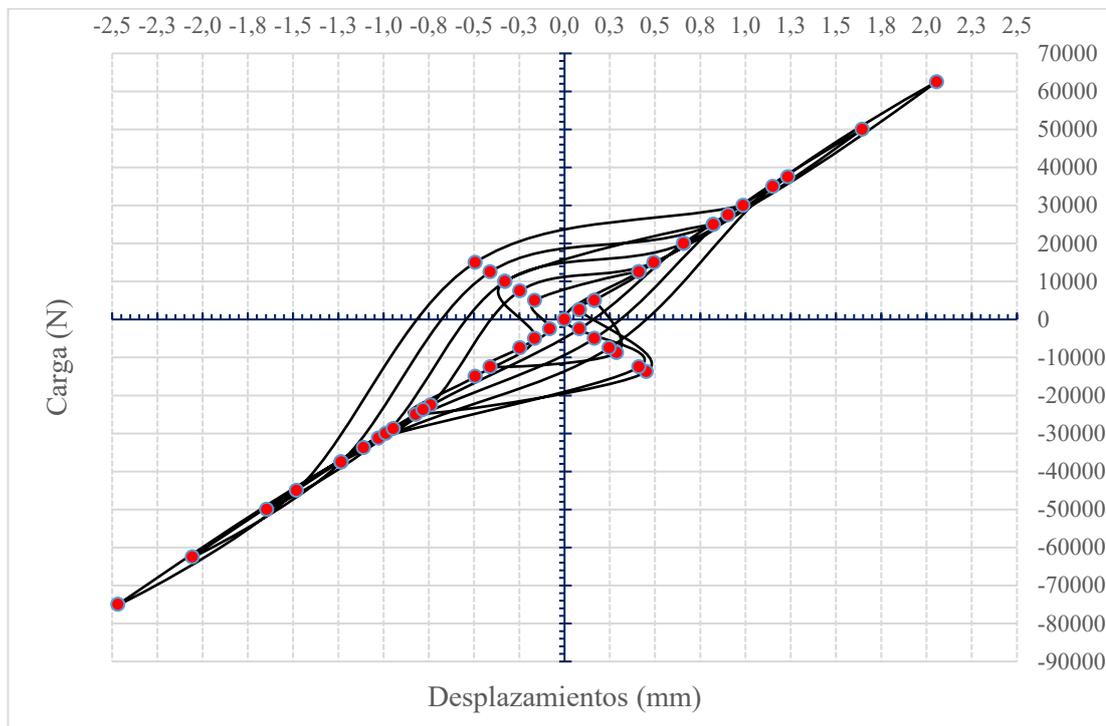


Figura 4- 4. Curva histérica del amortiguador de placas interconectadas.

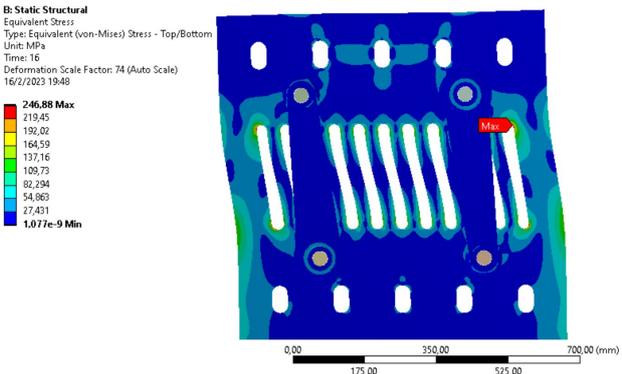
La curva de histéresis del amortiguador de rendija de placas muestra un comportamiento semi uniforme con dos puntos que se disparan excesivamente en los esto indica un comportamiento histérico semi estable, no se supera el límite de fluencia y la deformación máxima ocurre en los puntos anteriormente descritos, el desplazamiento alcanzado con estas cargas indica la deformación del conjunto positiva y negativa.

En este caso el comportamiento del amortiguador es fiable, repetible e independiente de la carga sísmica considerada, sin embargo, existe cierto grado de inestabilidad en los ciclos intermedios de carga por lo que en este rango el comportamiento no es predecible como indican los bucles de histéresis fuerza-desplazamiento. Este dispositivo disipa adecuadamente la energía mediante los elementos fusibles como las rendijas y las superficies en fricción, pero sus dimensiones serían algo inapropiadas para usarse en edificios de mediana altura.

## 4.2.2. Amortiguador de placa con rendija y brazos de soporte.

### 4.2.2.1. Esfuerzo equivalente de Von Mises

Tabla 4- 8. Resultados de esfuerzo obtenidos con el análisis de elementos finitos en el amortiguador de placa con rendija y brazo de soporte AMH-02

	UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA MAESTRIA EN INGENIERÍA CIVIL MENCION ESTRUCTURAS METÁLICAS		
<b>Modelo</b>	AMH_02	<b>Simulación</b>	02
<b>Material</b>	ASTM A36	<b>Pernos</b>	ASTM A325
<b>Características de simulación</b>	<b>Carga aplicada</b>	<b>Cond. Frontera</b>	<b>Tipo de análisis</b>
	Ciclos de carga incremental de 12,5 KN y desplazamientos	Desplazamiento restringido en la base	Estático no lineal
<b>Software utilizado</b>	ANSYS Módulo Workbench		
<b>Nº de nodos</b>	44223	<b>Tipo de elemento</b>	Shell 181
<b>Nº de elementos</b>	43142	<b>Calidad de malla</b>	0.9947
<b>Características del ordenador</b>	Intel Core i7 CPU 2.60 GHz; 16 núcleos; Tarjeta de video NVIDIA 6GB, 32 GB Memoria RAM;		
<b>Realizado por:</b>	Ing. Mario Jaya	<b>Revisado por:</b>	Ing. César Arroba, Mg.
		<b>Fecha:</b>	02-02-2023
<b>RESULTADOS DE SIMULACIÓN</b>			
<b>Carga [N]</b>	<b>Esfuerzo [MPa]</b>		
0	0		
12500	62,33		
-12500	62,26		
25000	72,13		
-25000	71,60		
37500	108,35		
-37500	107,81		
50000	144,93		
-50000	144,43		
62500	181,87		
-62500	181,41		
75000	219,12		
-75000	218,74		
87500	256,67		
-87500	256,36		
100000	246,18		
-100000	246,88		

**Observaciones:** Se observa concentración de esfuerzos en las ranuras intermedias de la placa principal del amortiguador ya que están diseñadas para fallar, las superficies que están en contacto unas con otras también sufren concentración de esfuerzos por el contacto de tipo friccional modelado

En la Tabla 4-9 se presentan los resultados de esfuerzo equivalente máximo obtenidos para cada ciclo de carga, se observa que el valor máximo de 246,88 MPa ocurre al aplicarse una carga de 100 kN, se concentra en las ranuras intermedias de la placa principal del amortiguador, en este caso el amortiguador no alcanzó el punto de fluencia debido al espesor considerable de la placa, los brazos y la cara aplicada lateralmente en el eje fuerte de la placa, en este caso la energía se disipa por los elementos fusibles del medio y las zonas de fricción con los brazos del amortiguador.

Tabla 4- 9. Esfuerzos promedio y máximos obtenidos en el segundo modelo de amortiguador híbrido

<b>Ciclo</b>	<b>Carga [N]</b>	<b>Esfuerzo Eq. Máximo [MPa]</b>	<b>Esfuerzo Eq. Promedio [MPa]</b>
0	0	0	0
1	12500	62,33	6,54
2	-12500	62,26	6,57
3	25000	72,13	11,79
4	-25000	71,60	11,80
5	37500	108,35	17,09
6	-37500	107,81	17,13
7	50000	144,93	22,45
8	-50000	144,43	22,52
9	62500	181,87	27,91
10	-62500	181,41	27,95
11	75000	219,12	33,38
12	-75000	218,74	33,43
13	87500	256,67	38,85
14	-87500	256,36	38,93
15	100000	246,18	44,34
16	-100000	246,88	44,47

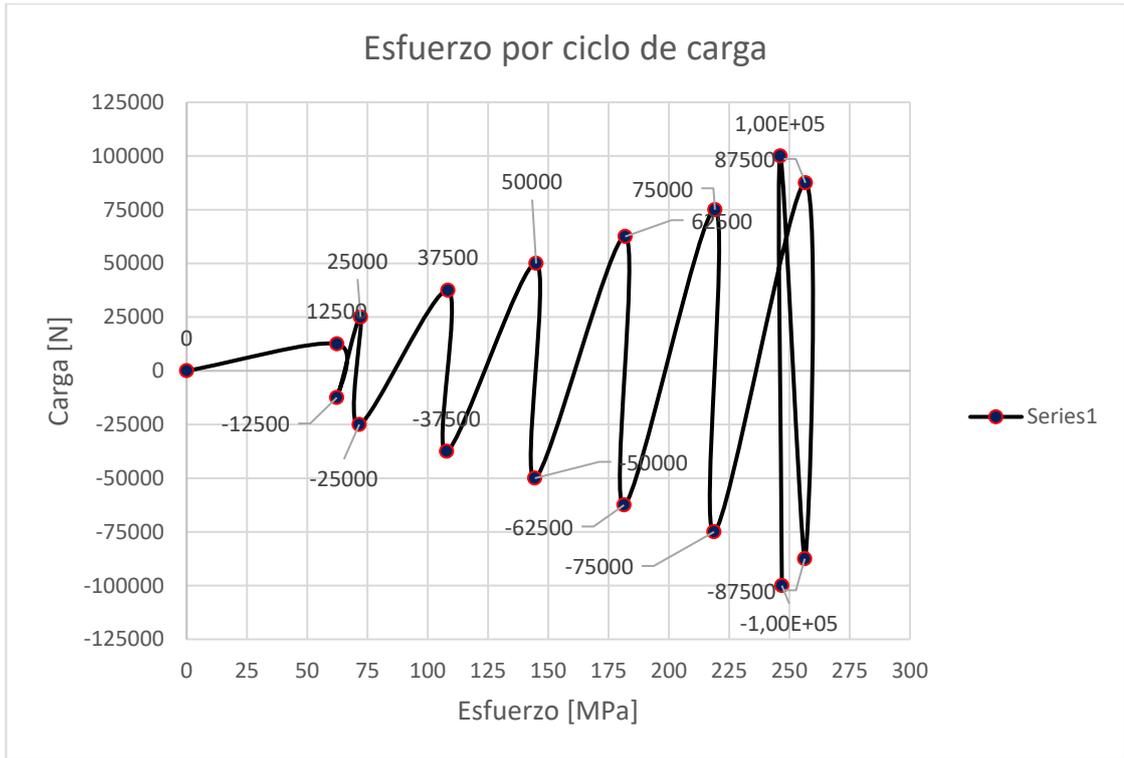
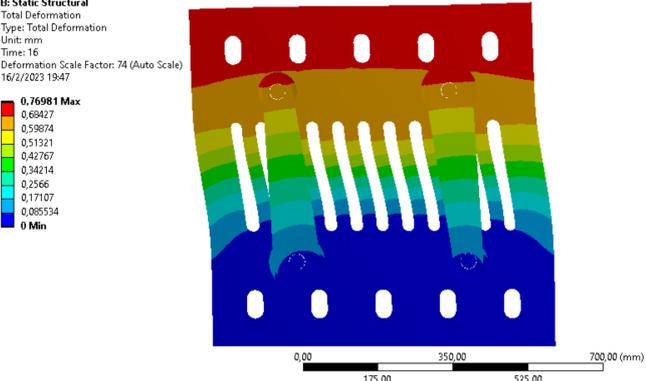


Figura 4- 5. Esfuerzos por ciclos de carga del amortiguador de placa con rendija y brazo de soporte

En la Figura 4-5 se observa que para cada ciclo de carga el esfuerzo se incrementa uniformemente hasta alcanzar su valor máximo a una carga de 50 kN en este caso el amortiguador ofrece la rigidez suficiente como para resistirse a la deformación permanente por la acción de la carga máxima, se observa un valor máximo de 246, 88 MPa.

#### 4.2.2.2. Deformaciones

Tabla 4- 10. Resultados de deformación obtenidos para el amortiguador de placa con rendija y brazo de soporte AMH-02.

	UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA MAESTRIA EN INGENIERÍA CIVIL MENCIÓN ESTRUCTURAS METÁLICAS		
<b>Modelo</b>	AMH 02	<b>Simulación</b>	02
<b>Material</b>	ASTM A36	<b>Pernos</b>	ASTM A325
<b>Características de simulación</b>	<b>Carga aplicada</b>	<b>Cond. Frontera</b>	<b>Tiempo de procesamiento</b>
	Ciclos de carga incremental de 12,5 kN	Apoyo fijo en la base	6 horas
<b>Software utilizado</b>	ANSYS Módulo Workbench		
<b>Nº de nodos</b>	24049	<b>Tipo de elemento</b>	Shell 181 (superficie)
<b>Nº de elementos</b>	22379	<b>Calidad de malla</b>	0.99957
<b>Características del ordenador</b>	Intel Core i7 CPU 2.60 GHz; 16 núcleos; Tarjeta de video NVIDIA 6GB, 32 GB Memoria RAM;		
<b>Realizado por:</b>	Ing. Mario Jaya	<b>Revisado por:</b>	Ing. César Arroba, Mg.
		<b>Fecha:</b>	02-02-2023
<b>RESULTADOS DE SIMULACIÓN</b>			
<b>Carga [N]</b>	<b>Deformación [mm]</b>	 <p>B: Static Structural Total Deformation Type: Total Deformation Unit: mm Time: 16 Deformation Scale Factor: 74 (Auto Scale) 16/2/2023 13:47</p> <p>0.76981 Max 0.68427 0.59874 0.51321 0.42767 0.34214 0.2566 0.17107 0.085534 0 Min</p>	
0	0		
12500	0,11		
-12500	0,11		
25000	0,19		
-25000	0,19		
37500	0,28		
-37500	0,28		
50000	0,38		
-50000	0,38		
62500	0,48		
-62500	0,48		
75000	0,57		
-75000	0,57		
87500	0,67		
-87500	0,67		
10000	0,77		
-100000	0,77		
<b>Observaciones:</b> Se observa que el máximo desplazamiento en el modelo ocurre en la parte superior del sujetador del sistema de placas por encima de las planchas débiles, el valor asciende a 0,77 mm, además ocurre la separación de las placas de fricción superior e inferior.			

En la Tabla 4-11 se presentan los datos de deformación obtenidos para el segundo modelo de amortiguador se observa también la gráfica que indica por colores los diferentes tipos de deformaciones que ocurren, en este caso se nota que la deformación máxima ocurre en la zona fusible del centro de la placa intermedia, se llega a un valor de 0,76981 mm que es un valor minúsculo al aplicarse la carga máxima de 100 kN, por lo que es recomendable optimizar la distribución de ranuras del centro.

Tabla 4- 11. Deformación por ciclos de carga para el amortiguador AMH\_02.

Ciclo	Carga [N]	Deformación [mm]
0	0	0
1	12500	0,11
2	-12500	0,11
3	25000	0,19
4	-25000	0,19
5	37500	0,28
6	-37500	0,28
7	50000	0,38
8	-50000	0,38
9	62500	0,48
10	-62500	0,48
11	75000	0,57
12	-75000	0,57
13	87500	0,67
14	-87500	0,67
15	100000	0,77
16	-100000	0,77

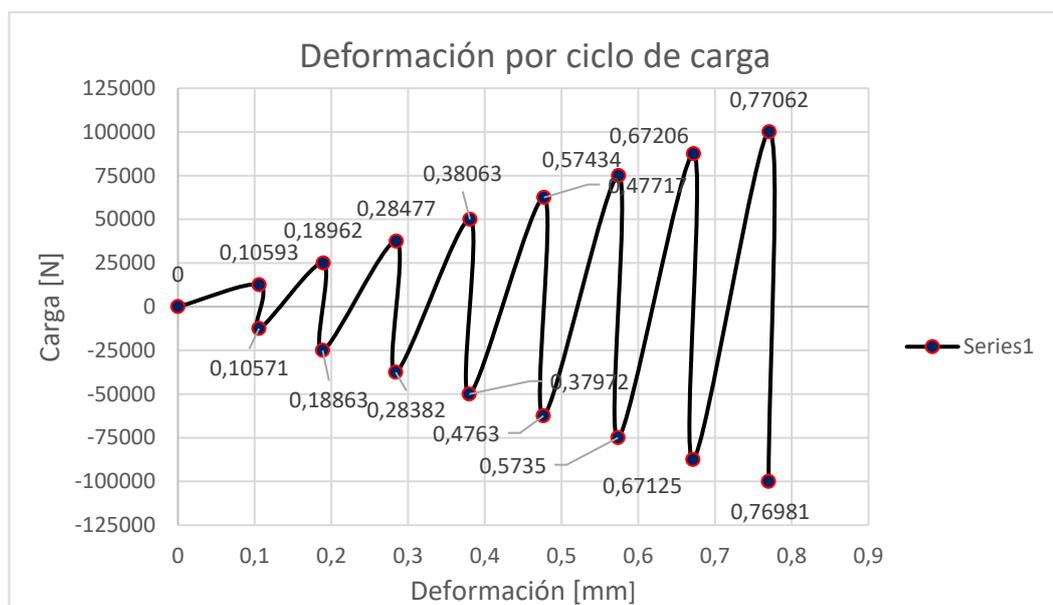


Figura 4- 6. Deformación por ciclos de carga para el amortiguador híbrido AMH\_02

En la Figura 4-6 se presentan los resultados de deformación por ciclo de carga para el segundo modelo de amortiguador se observa un valor máximo de desplazamiento de 0,76 mm que ocurre cuando se aplica una carga de 100 kN en sentido positivo como en sentido negativo, en este caso se nota que es una deformación muy pequeña como para considerarse relevante por lo que el amortiguador en mención sería inapropiado debido a su rigidez.

#### 4.2.2.3. Datos de histéresis del amortiguador.

Tablo 4- 12. Datos obtenidos de desplazamiento y reacciones para obtener la curva de histéresis del amortiguador AMH\_02

Tiempo [s]	Desplazamiento [mm]	Reacción [N]	Tiempo [s]	Desplazamiento [mm]	Reacción [N]
0,2	2,12E-02	2500	8,2	0,20979	27500
0,4	4,24E-02	5000	8,4	0,071024	5000
0,7	7,42E-02	-8750	8,7	0,21754	-28750
1,0	-0,10593	-12500	9,0	-0,47717	-62500
1,2	-7,99E-02	-7500	9,2	-0,28834	-37500
1,4	-6,30E-02	-2500	9,4	-0,11032	-12500
1,7	-6,97E-02	5000	9,7	-0,18711	25000
2,0	0,10571	12500	10,0	0,4763	62500
2,2	6,98E-02	5000,1	10,2	0,26855	35002
2,4	6,29E-02	2500	10,4	0,082822	7500
2,7	0,11318	-13750	10,7	0,25521	-33750
3,0	-0,18962	-25000	11,0	-0,57434	-75000
3,2	-0,12093	-15000	11,2	-0,3477	-45003
3,4	-6,99E-02	-5000	11,4	-0,12772	-15000
3,7	-9,19E-02	10000	11,7	-0,22451	30000
4,0	0,18863	25000	12,0	0,5735	75000
4,2	0,10622	12501	12,2	0,32796	42508
4,4	6,07E-02	1,01E-06	12,4	0,097825	10000
4,7	0,14374	-18750	12,7	0,29293	-38750
5,0	-0,28477	-37500	13,0	-0,67206	-87500
5,2	-0,17158	-22500	13,2	-0,40763	-52510
5,4	-8,06E-02	-7500	13,4	-0,14605	-17500
5,7	-0,12005	15000	13,7	-0,26202	35000
6,0	0,28382	37500	14,0	0,67125	87500
6,2	0,15288	20000	14,2	0,3879	50014
6,4	6,34E-02	2500	14,4	0,1146	12500
6,7	0,17992	-23750	14,7	0,33072	-43750
7,0	-0,38063	-50000	15,0	-0,77062	-100000
7,2	-0,22961	-30000	15,2	-0,46839	-60017
7,4	-9,44E-02	-10000	15,4	-0,16565	-20000
7,7	-0,15066	20000	15,7	-0,29929	40000
8,0	0,37972	50000	16,0	0,76981	100000

En la Tabla 4-12 se presentan los desplazamientos y reacciones obtenidas en el análisis de elementos finitos, se tienen 16 incrementos de tiempo crecientes tanto positiva como negativamente, se observa que cada ciclo tiene valores positivos y negativos lo cual permite trazar la curva cruzando el origen del sistema coordinado los desplazamientos más grandes ocurren cuando se aplica la carga de 100 kN en los últimos incrementos de tiempo.

#### 4.2.2.4. Curva histerética del amortiguador de placa con rendija y brazo de soporte.

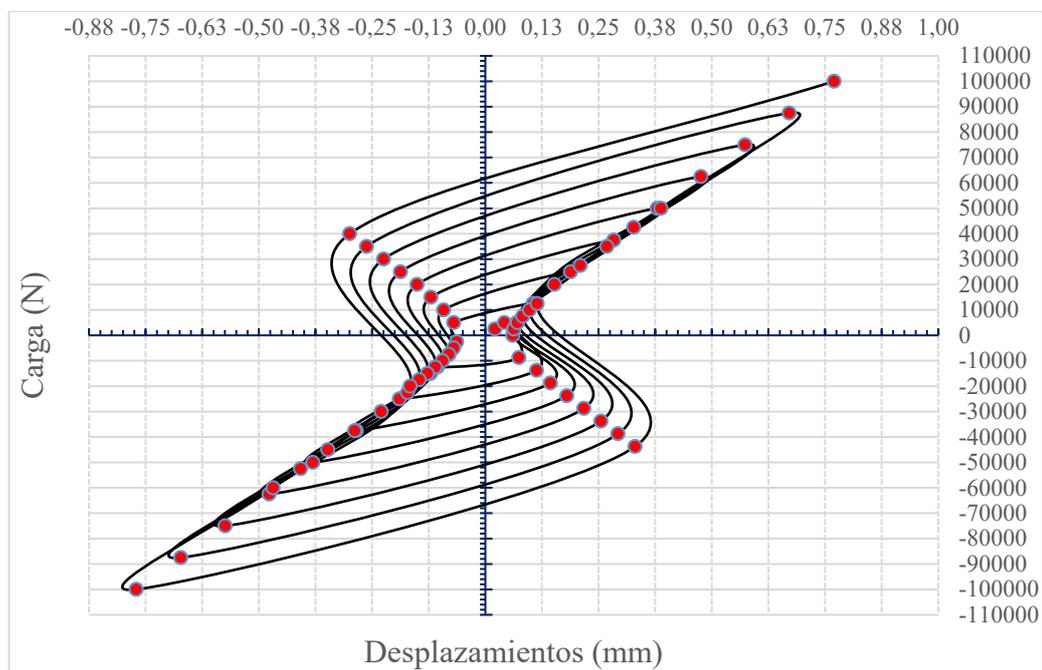


Figura 4- 7. Curva histerética del tercer modelo de amortiguador.

El amortiguador tiene un comportamiento histerético estable sin superar el límite de fluencia de los materiales de los cuales está constituido, sin embargo, los bajos desplazamientos alcanzados durante el análisis muestran que tiene una rigidez excesiva debido a su geometría que permite que la carga se transmita de forma longitudinal por el lado más fuerte.

Aunque los resultados indican que el comportamiento del amortiguador es fiable, repetible y prácticamente independiente de la carga sísmica considerada además de que todas las cargas y descargas intermedias del amortiguador se producen de manera predecible, dentro de la curva de los bucles de histéresis fuerza-desplazamiento. Este

dispositivo no disipa adecuadamente la energía mediante los elementos fusibles por lo cual sería adecuado debilitar la zona intermedia de la placa de modo que existan mayores deformaciones afectando al elemento fusible y no a los miembros donde este estaría conectado.

### 4.2.3. Amortiguador híbrido de placas y superficie de fricción.

#### 4.2.3.1. Esfuerzo equivalente de Von Mises

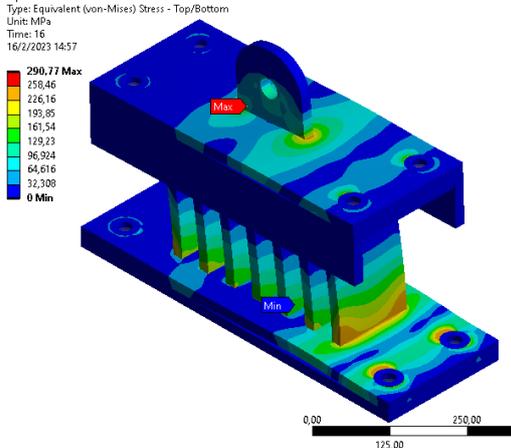
Tabla 4- 13. Resultados de esfuerzo obtenidos con el análisis de elementos finitos en el amortiguador de placas y superficie de fricción AMH-03

	UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA MAESTRIA EN INGENIERÍA CIVIL MENCIÓN ESTRUCTURAS METÁLICAS			
<b>Modelo</b>	AMH 03		<b>Simulación</b>	03
<b>Material</b>	ASTM A36		<b>Pernos</b>	ASTM A325
<b>Características de simulación</b>	<b>Carga aplicada</b>	<b>Cond. Frontera</b>	<b>Tipo de análisis</b>	<b>Tiempo de procesamiento</b>
	Ciclos de carga incremental de 12,5 KN y desplazamientos	Desplazamiento restringido en la base	Estático no lineal	6 horas
<b>Software utilizado</b>	ANSYS Módulo Workbench			
<b>N° de nodos</b>	24049	<b>Tipo de elemento</b>	Shell 181 (superficie)	
<b>N° de elementos</b>	22379	<b>Calidad de malla</b>	0.9947	
<b>Características del ordenador</b>	Intel Core i7 CPU 2.60 GHz; 16 núcleos; Tarjeta de video NVIDIA 6GB, 32 GB Memoria RAM;			
<b>Realizado por:</b>	Ing. Mario Jaya	<b>Revisado por:</b>	Ing. César Arroba, Mg.	
		<b>Fecha:</b>	02-02-2023	

Tabla 4- 1314. Resultados de esfuerzo obtenidos con el análisis de elementos finitos en el amortiguador de placas y superficie de fricción AMH-03 (*continuación*)

RESULTADOS DE SIMULACIÓN	
Carga [N]	Esfuerzo [MPa]
0	0
12500	69,086
-12500	67,543
25000	132,63
-25000	133,31
37500	197,49
-37500	199,9
50000	263,21
-50000	266,05
62500	274,47
-62500	252,45
75000	262,15
-75000	260,19
87500	265,8
-87500	273,18
100000	281,6
-100000	290,77

**B: Static Structural**  
 Equivalent Stress  
 Type: Equivalent (von-Mises) Stress - Top/Bottom  
 Unit: MPa  
 Time: 16  
 16/2/2023 14:57



**Observaciones:** Se observa concentración de esfuerzos en las juntas soldadas en la zona de unión de la placa base con las placas intermedias, en la zona donde se une la placa de sujeción con la placa superior y las zonas en contacto sujetas a fricción, el conjunto presenta separación de las placas inferiores y superiores, el esfuerzo máximo ocurre al cuando se aplica la carga máxima.

En la Tabla 4-14 se presentan los resultados de esfuerzo equivalente máximo obtenidos para cada ciclo de carga, se observa que el valor máximo de 290,77 MPa ocurre al aplicarse una carga de 100 kN, se concentra en las zonas de unión entre placas, especialmente en la junta soldada de la placa de sujeción de la parte superior donde se aplica la carga.

Tabla 4- 15. Esfuerzos promedio y máximos obtenidos en el tercer modelo de amortiguador híbrido.

Ciclo	Carga [N]	Esfuerzo Eq. Máximo [MPa]	Esfuerzo Eq. Promedio [MPa]
0	0	0	0
1	12500	69,09	6,54
2	-12500	67,54	6,57
3	25000	132,63	11,79
4	-25000	133,31	11,80
5	37500	197,49	17,09
6	-37500	199,90	17,13
7	50000	263,21	22,45
8	-50000	266,05	22,52

Tabla 4-14. Esfuerzos promedio y máximos obtenidos en el tercer modelo de amortiguador híbrido (*continuación*)

Ciclo	Carga [N]	Esfuerzo Eq. Máximo [MPa]	Esfuerzo Eq. Promedio [MPa]
9	62500	274,47	27,91
10	-62500	252,45	27,95
11	75000	262,15	33,38
12	-75000	260,19	33,43
13	87500	265,80	38,85
14	-87500	273,18	38,93
15	100000	281,60	44,34
16	-100000	290,77	44,47

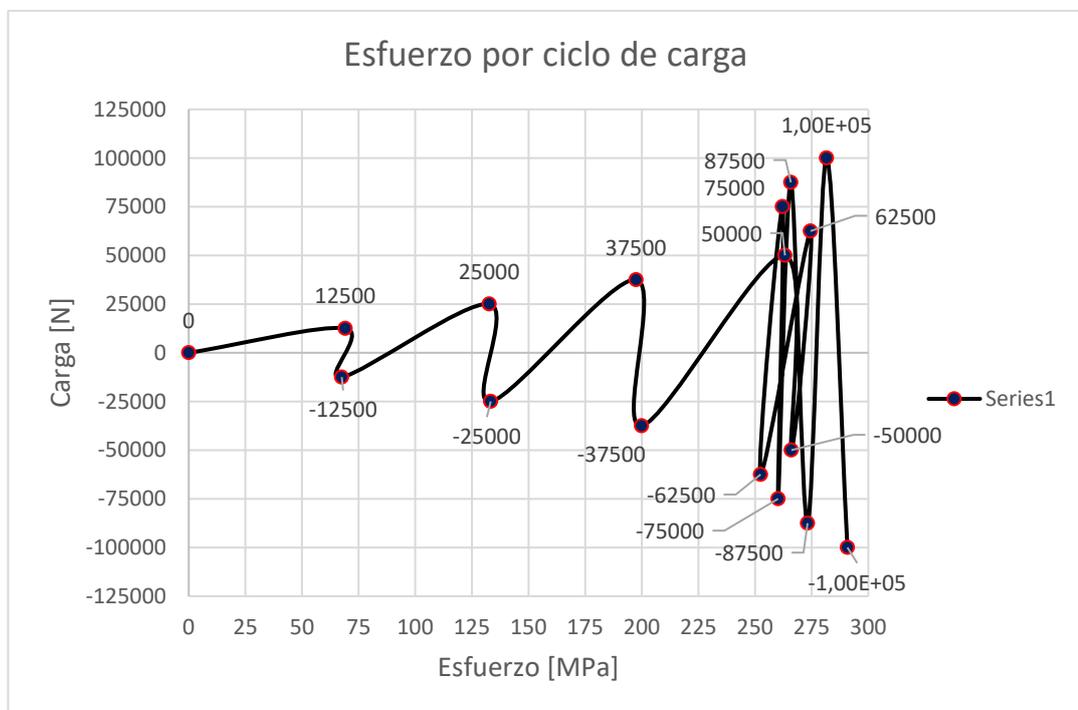
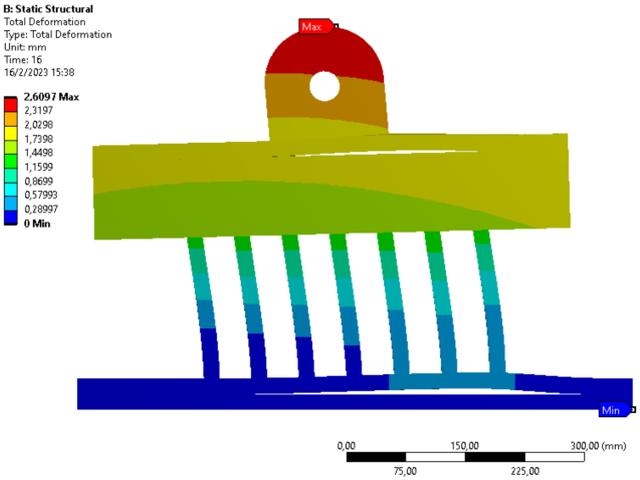


Figura 4- 8. Esfuerzos por ciclos de carga del amortiguador de fricción de placas AMH-03

En la Figura 4-8 se observa que para cada ciclo de carga el esfuerzo se incrementa uniformemente hasta alcanzar un valor de 50 kN donde se supera el límite de fluencia del material a partir de este punto los esfuerzos generados tienden a descender ya que los materiales de los que está constituido el amortiguador ya no ofrecen la resistencia inicial sin embargo el amortiguador sigue trabajando en el rango plástico hasta la carga de 100 kN aplicada por ciclos.

#### 4.2.3.2. Deformaciones

Tabla 4- 16. Resultados de deformación obtenidos para el amortiguador híbrido de placas y fricción AMH-03.

	UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA MAESTRIA EN INGENIERÍA CIVIL MENCIÓN ESTRUCTURAS METÁLICAS		
<b>Modelo</b>	AMH 03	<b>Simulación</b>	03
<b>Material</b>	ASTM A36	<b>Pernos</b>	ASTM A325
<b>Características de simulación</b>	<b>Carga aplicada</b>	<b>Cond. Frontera</b>	<b>Tiempo de procesamiento</b>
	Ciclos de carga incremental de 12,5 kN	Apoyo fijo en la base	
<b>Software utilizado</b>	ANSYS Módulo Workbench		
<b>Nº de nodos</b>	44223	<b>Tipo de elemento</b>	Shell 181 (superficie)
<b>Nº de elementos</b>	43142	<b>Calidad de malla</b>	0.99957
<b>Características del ordenador</b>	Intel Core i7 CPU 2.60 GHz; 16 núcleos; Tarjeta de video NVIDIA 6GB, 32 GB Memoria RAM;		
<b>Realizado por:</b>	Ing. Mario Jaya	<b>Revisado por:</b>	Ing. César Arroba, Mg.
		<b>Fecha:</b>	02-02-2023
<b>RESULTADOS DE SIMULACIÓN</b>			
<b>Carga [N]</b>	<b>Deformación [mm]</b>		
0	0		
12500	0,3027		
-12500	0,3007		
25000	0,6108		
-25000	0,6118		
37500	0,9294		
-37500	0,9318		
50000	1,2544		
-50000	1,2576		
62500	1,5950		
-62500	1,5887		
75000	1,9335		
-75000	1,9267		
87500	2,2734		
-87500	2,266		
1,00E+05	2,6182		
-1,00E+05	2,6097		

**Observaciones:** Se observa que el máximo desplazamiento en el modelo ocurre en la parte superior del sujetador del sistema de placas por encima de las planchas débiles, el valor asciende a 2,6097 mm, además ocurre la separación de las placas de fricción superior e inferior.

En la Tabla 4-17 se presentan los datos de deformación obtenidos para el tercer modelo de amortiguador se observa también la gráfica que indica por colores los diferentes tipos de deformaciones que ocurren, para este caso se observó la separación de las placas de fricción superior e inferior debido a la carga excesiva que soporta el amortiguador en el último ciclo.

Tabla 4- 17. Deformación por ciclos de carga para el tercer modelo de amortiguador

<b>Ciclo</b>	<b>Carga [N]</b>	<b>Deformación [cm]</b>
0	0	0
1	12500	0,3027
2	-12500	0,3007
3	25000	0,6108
4	-25000	0,6118
5	37500	0,9295
6	-37500	0,9318
7	50000	1,2544
8	-50000	1,2576
9	62500	1,5950
10	-62500	1,5887
11	75000	1,9335
12	-75000	1,9267
13	87500	2,2734
14	-87500	2,266
15	100000	2,6182
16	-100000	2,6097



Figura 4- 9. Deformación por ciclos de carga para el amortiguador híbrido AMH-03  
 En la Figura 4-9 se presentan los resultados de deformación por ciclo de carga para el tercer modelo de amortiguador se observa un valor máximo de desplazamiento de 2,61 mm que ocurre cuando se aplica una carga de 100 kN, como el conjunto de placas no ha superado el  $S_{ut}$  del material como se detalló en la tabla de resultados de esfuerzos puede continuar deformándose, sin embargo, las placas no podrían recuperar su forma original dado que en dicho punto trabajan en el rango plástico.

**4.2.3.3. Datos de histéresis del amortiguador de placas paralelas con superficies de fricción.**

Tabla 4- 18. Datos de desplazamiento y reacciones obtenidas para trazar la curva histerética del amortiguador 3.

Tiempo [s]	Desplazamiento [m]	Reacción [N]	Tiempo [s]	Desplazamiento [m]	Reacción [N]
0,2	5,97E-02	2475	8,2	0,69	27381
0,4	0,12	4939	8,4	0,12	7766
0,7	0,21	-8749	8,7	0,69	-29114
1	-0,30	-12500	9,0	-1,60	-61548
1,2	-0,18	-7510	9,2	-0,95	-37336
1,4	-6,37E-02	-2514	9,4	-0,31	-12952
1,7	-0,12	5506	9,7	-0,57	28289
2	0,30	12337	10,0	1,59	61958
2,2	0,12	5070	10,2	0,89	34781
2,4	6,25E-02	2836	10,4	0,19	9568
2,7	0,32	-14979	10,7	0,81	-34175

3	-0,61	-24741	11,0	-1,93	-73945
3,2	-0,37	-14967	11,2	-1,16	-44629
3,4	-0,12	-5057	11,4	-0,39	-15437
3,7	-0,23	10769	11,7	-0,69	34172
4	0,61	24622	12,0	1,93	74534
4,2	0,30	12527	12,2	1,09	42132
4,4	1,61E-02	2087	12,4	0,26	11331
4,7	0,44	-19850	12,7	0,94	-39384
5	-0,93	-37002	13,0	-2,27	-86462
5,2	-0,55	-22441	13,2	-1,37	-52084
5,4	-0,18	-7671	13,4	-0,46	-17840
5,7	-0,35	16673	13,7	-0,80	40320
6	0,93	37014	14,0	2,27	87185
6,2	0,49	19983	14,2	1,30	49438
6,4	6,11E-02	5508	14,4	0,33	13322
6,7	0,57	-23985	14,7	1,06	-44662
7	-1,25	-49171	15,0	-2,62	-99184
7,2	-0,75	-29846	15,2	-1,58	-59421
7,4	-0,25	-10285	15,4	-0,54	-20150
7,7	-0,46	22489	15,7	-0,92	46495
8	1,26	49418	16,0	2,61	99892

#### 4.2.3.4. Curva histerética del amortiguador de placas paralelas con superficies de fricción

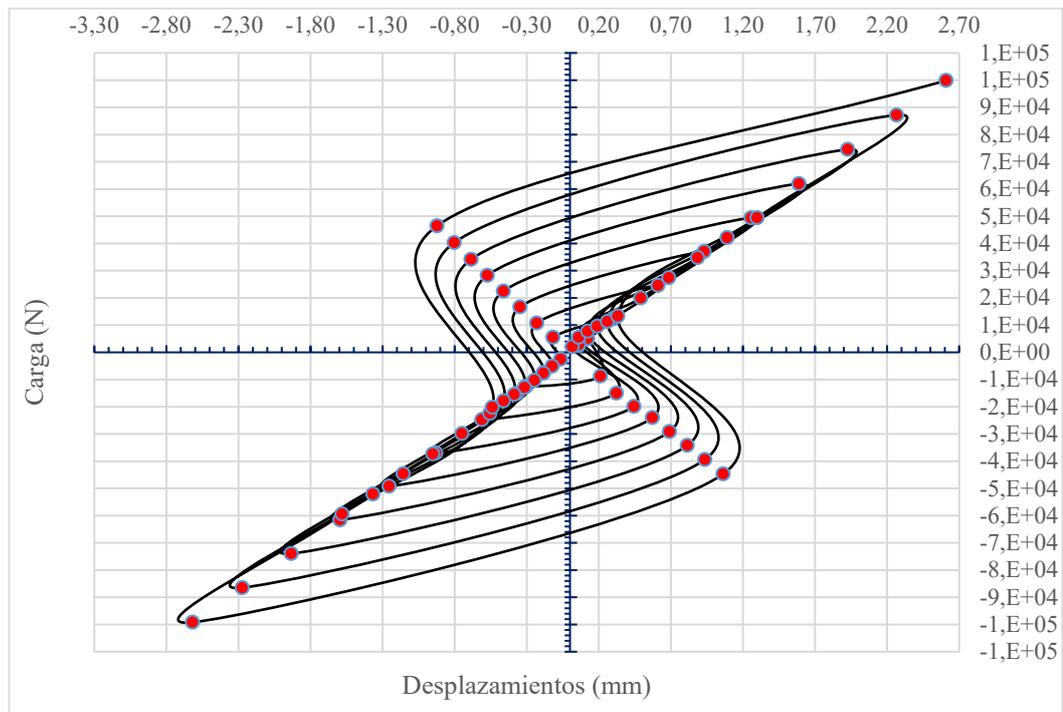


Figura 4- 10. Curva histerética del tercer modelo de amortiguador.

La curva histerética muestra que el amortiguador de placas paralelas tiene un comportamiento estable alcanzando una deformación máxima de aproximadamente 2,70 mm a diferencia de los dos primeros modelos se tiene una disipación de energía superior sin llegar al límite de fluencia, estos datos indican que se puede predecir el comportamiento del conjunto ante una carga sísmica. En este caso se observa que existe mayor desplazamiento por ciclo de carga.

#### 4.3. Selección del modelo para la propuesta

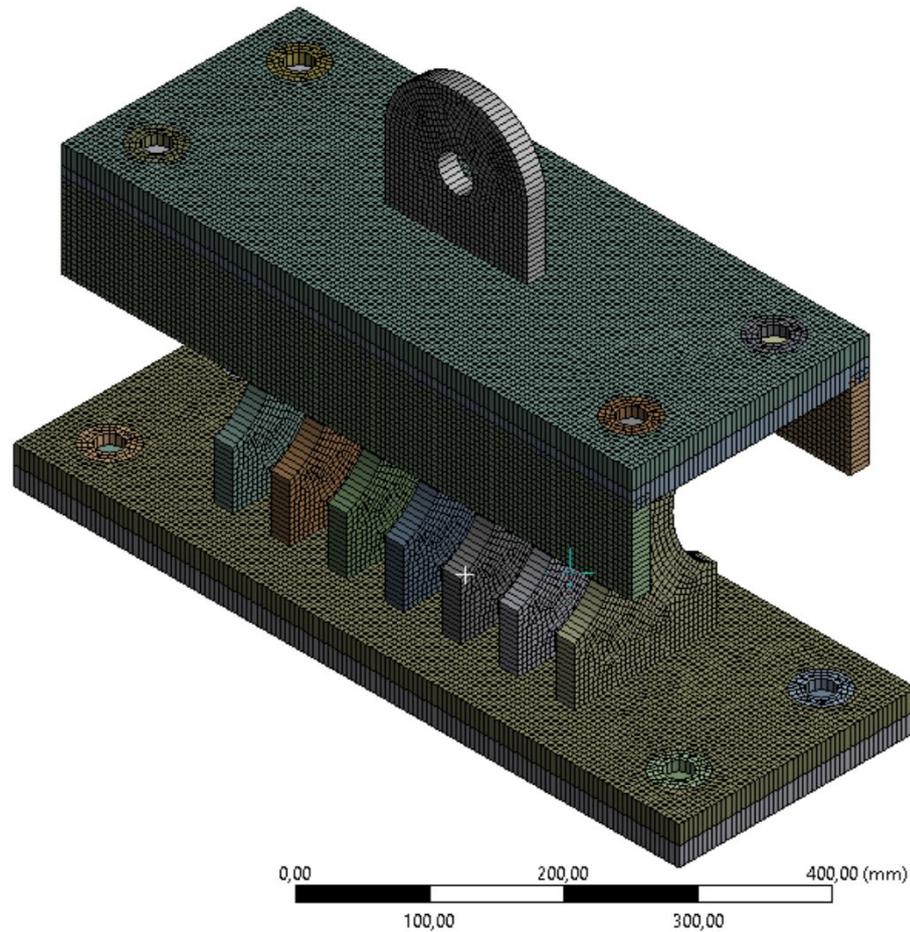


Figura 4- 11. Modelo planteado como propuesta de amortiguador híbrido para edificios de mediana altura.

La propuesta se basa en mejorar el amortiguador de placas paralelas y superficie de fricción implementando hendiduras radiales en las placas y disminuyendo el espesor de estas con esto se bajan los esfuerzos y se aumenta la ductilidad del conjunto constituyéndose en un elemento fusible adecuado para disipar una mayor cantidad de energía.

### 4.3.1. Resultados del modelo optimizado para la propuesta AMH\_04

Tabla 4- 19. Datos de esfuerzos y deformaciones del amortiguador propuesto.

Nº	Ciclo de carga [N]	Esfuerzo equivalente máximo [Mpa]	Esfuerzo Equivalente promedio [Mpa]	Deformación [mm]
0	0	0	0	0
1	44250	94,913	12,649	0,35061
2	-44250	252,08	31,867	1,4876
3	88500	50,693	7,4526	1,2723
4	-88500	237,36	31,669	0,73245
5	132750	48,556	7,2501	0,83534
6	-132750	255,86	62,012	2,2673
7	177000	121,58	13,056	2,6693
8	-177000	263,81	61,773	1,3851
9	221250	188,37	3,6979	2,2008
10	-221250	325,37	82,015	3,0865
11	265500	297,99	19,203	12,961
12	-265500	338,81	83,48	6,7976
13	309750	300,84	17,157	1,6819
14	-309750	367,49	90,789	7,884
15	354000	392,42	96,849	42,242
16	-354000	94,913	12,649	0,35061

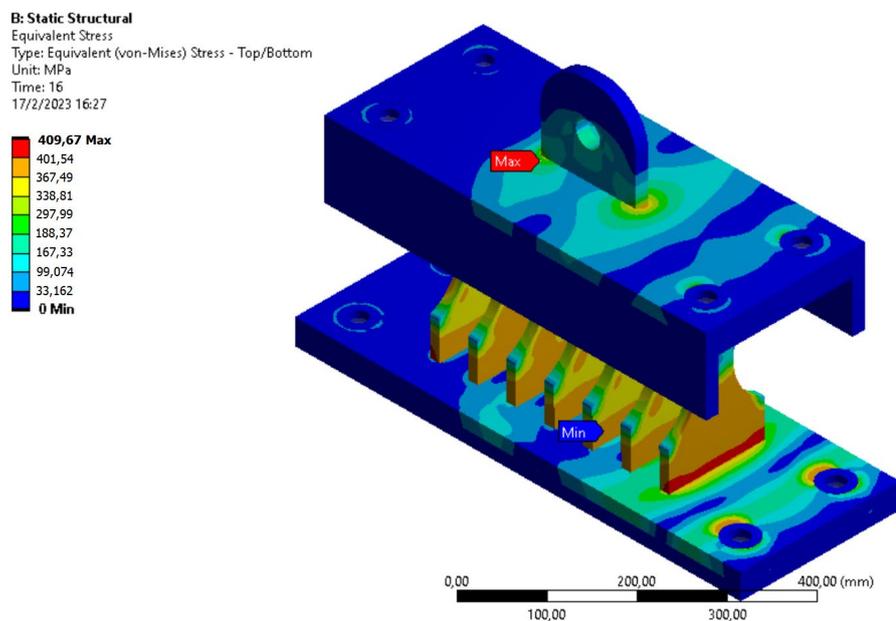


Figura 4- 12. Esfuerzo equivalente del modelo planteado como propuesta de amortiguador híbrido para edificios de mediana altura.

La concentración de esfuerzos ocurre en la junta soldada entre la primera placa paralela en sentido de aplicación de la carga se llega a un valor máximo de 392,42 MPa, con placas de 15 mm de espesor, esto indica que el amortiguador tendría una mayor ductilidad admitiendo deformaciones mayores causadas por las cargas sísmicas.

#### 4.3.2. Deformaciones.

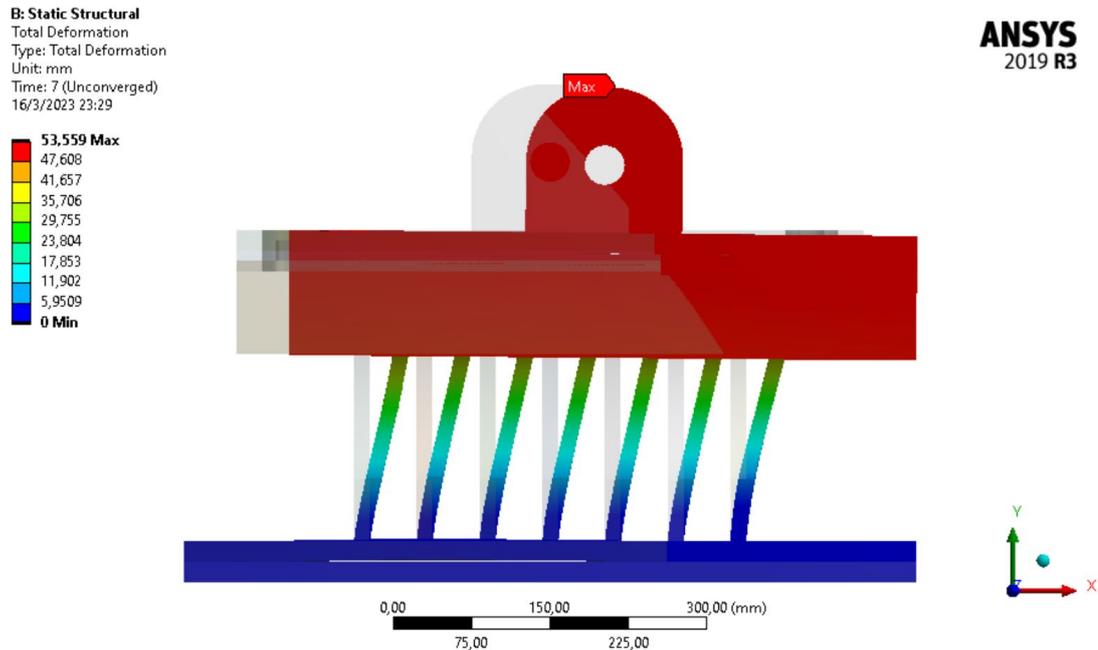


Figura 4- 13. Esfuerzo equivalente del modelo planteado como propuesta de amortiguador híbrido para edificios de mediana altura.

La deformación máxima del amortiguador planteado alcanza un valor de 53,56 mm que es más alta que en el modelo original, sin embargo, el esfuerzo es menor porque las placas débiles disipan energía a través de la deformación, en este caso no se evidenció una separación tan pronunciada de las superficies de fricción superior e inferior, lo que indica que la mayor disipación de energía se da en las placas intermedias.

### 4.3.3. Curva histerética del amortiguador propuesto.

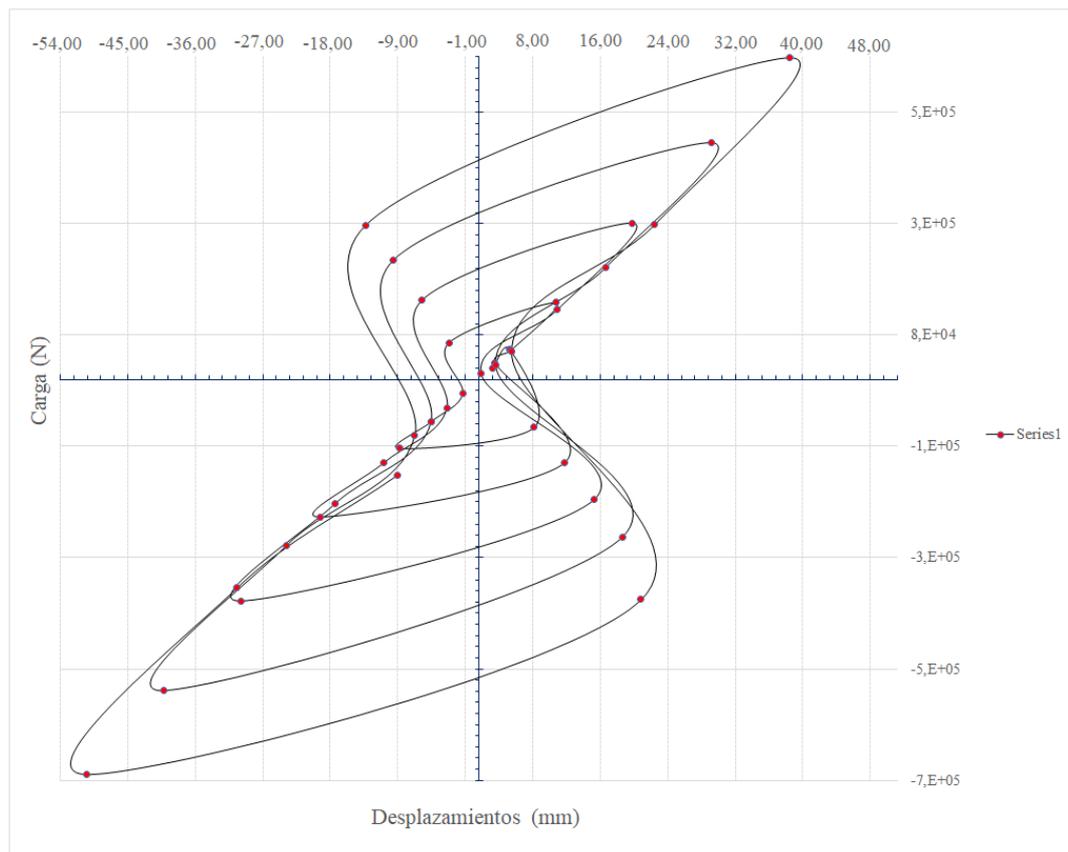


Figura 4- 14. Curva histerética del amortiguador de placas paralelas propuesto.

Como se muestra en la Figura 4-14 el amortiguador propuesto tiene un rango de desplazamientos más amplio, la curva histerética muestra bucles más amplios y repetitivos que indican que el conjunto tiene un comportamiento predecible como se indicó en el análisis de esfuerzos, no se llega al límite de fractura del material por lo que el amortiguador soportaría un rango más alto de cargas sin inconvenientes, por lo que es adecuado para ser aplicado en edificios de mediana altura.

## 4.4. Verificación de la hipótesis

### 4.4.1. Hipótesis

El amortiguador híbrido propuesto disipa mayor cantidad de energía.

### 4.4.2. Variable dependiente.

Disipación de energía

#### 4.4.3. Variable Independiente.

Modelos de amortiguador y los rangos de carga aplicados

#### 4.4.4. Hipótesis nula $H_0$ :

El amortiguador híbrido propuesto no disipa una mayor cantidad de energía que los analizados.

#### 4.3.4. Hipótesis alterna $H_a$ :

El amortiguador híbrido propuesto disipa una mayor cantidad de energía que los otros modelos analizados.

#### 4.3.5. Modelo matemático:

$$H_0: \text{Disip. Energía Propuesto} \leq \text{Disip Energía Analizados}$$

$$H_a: \text{Disip. Energía Propuesto} \geq \text{Disip Energía Analizados}$$

Nivel de significancia

El intervalo de confianza seleccionado es del 95%; por lo tanto, la significancia es del 5% que corresponde a una probabilidad de 0,05

Grados de libertad.

$$v = n_1 + n_2 - 2$$

$$v = 17 + 17 - 2$$

$$v = 32$$

Los grados de libertad se calculan en función de los ciclos de carga planteados para este caso son 17 considerando el cero dado que los incrementos en la fuerza aplicada en el análisis MEF son uniformes hasta alcanzar los 100 kN.

Tabla 4- 20. Valores estadísticos de los resultados para la distribución calculada.

Nº	Deformación máxima AMH-03	Deformación máxima AMH-04	(x-μx) <sup>2</sup>	(y-μy) <sup>2</sup>
1	-	-	1,832	1,832
2	0,303	0,585	1,104	0,591
3	0,301	0,573	1,108	0,609
4	0,611	1,176	0,552	0,032
5	0,612	1,137	0,550	0,047
6	0,929	1,762	0,180	0,167
7	0,932	1,719	0,178	0,134
8	1,254	2,334	0,010	0,961
9	1,258	2,303	0,009	0,901
10	1,595	2,905	0,058	2,408
11	1,589	2,960	0,055	2,580
12	1,934	3,596	0,336	5,026
13	1,927	3,570	0,328	4,911
14	2,273	4,244	0,846	8,353
15	2,266	4,214	0,833	8,181
16	2,618	4,952	1,599	12,951
17	2,610	4,916	1,578	12,693
<b>Media (μ)</b>	1,354	2,526	<b>11,157</b>	<b>39,001</b>

$$S^2 = \frac{\Sigma(x - \mu x)^2 + \Sigma(y - \mu y)^2}{v}$$

Donde:

x: es un valor del conjunto de datos que corresponden a las deformaciones del amortiguador original.

y: es un valor del conjunto de datos que corresponde a la deformación del amortiguador modificado.

v: grados de libertad.

S<sup>2</sup>: varianza.

$$S^2 = \frac{11,157 + 39,001}{32}$$

$$S^2 = 1,567$$

Distribución t student.

$$t = \frac{\mu x - \mu y}{\sqrt{\frac{s^2}{n1} + \frac{s^2}{n2}}}$$

$$t = \frac{1.354 - 2.526}{\sqrt{\frac{1,567}{32} + \frac{1,567}{32}}}$$

$$t \text{ calculado} = -3,746 < t \text{ tabulado } 1,6939$$

Tabla 4- 21. Distribución t student tabulada.

Grados de libertad	0.25	0.1	0.05	0.025	0.01	0.005
1	1.0000	3.0777	6.3137	12.7062	31.8210	63.6559
2	0.8165	1.8856	2.9200	4.3027	6.9645	9.9250
3	0.7649	1.6377	2.3534	3.1824	4.5407	5.8408
4	0.7407	1.5332	2.1318	2.7765	3.7469	4.6041
5	0.7267	1.4759	2.0150	2.5706	3.3649	4.0321
6	0.7176	1.4398	1.9432	2.4469	3.1427	3.7074
7	0.7111	1.4149	1.8946	2.3646	2.9979	3.4995
8	0.7064	1.3968	1.8595	2.3060	2.8965	3.3554
9	0.7027	1.3830	1.8331	2.2622	2.8214	3.2498
10	0.6998	1.3722	1.8125	2.2281	2.7638	3.1693
11	0.6974	1.3634	1.7959	2.2010	2.7181	3.1058
12	0.6955	1.3562	1.7823	2.1788	2.6810	3.0545
13	0.6938	1.3502	1.7709	2.1604	2.6503	3.0123
14	0.6924	1.3450	1.7613	2.1448	2.6245	2.9768
15	0.6912	1.3406	1.7531	2.1315	2.6025	2.9467
16	0.6901	1.3368	1.7459	2.1199	2.5835	2.9208
17	0.6892	1.3334	1.7396	2.1098	2.5669	2.8982
18	0.6884	1.3304	1.7341	2.1009	2.5524	2.8784
19	0.6876	1.3277	1.7291	2.0930	2.5395	2.8609
20	0.6870	1.3253	1.7247	2.0860	2.5280	2.8453
21	0.6864	1.3232	1.7207	2.0796	2.5176	2.8314
22	0.6858	1.3212	1.7171	2.0739	2.5083	2.8188
23	0.6853	1.3195	1.7139	2.0687	2.4999	2.8073
24	0.6848	1.3178	1.7109	2.0639	2.4922	2.7970
25	0.6844	1.3163	1.7081	2.0595	2.4851	2.7874
26	0.6840	1.3150	1.7056	2.0555	2.4786	2.7787
27	0.6837	1.3137	1.7033	2.0518	2.4727	2.7707
28	0.6834	1.3125	1.7011	2.0484	2.4671	2.7633
29	0.6830	1.3114	1.6991	2.0452	2.4620	2.7564
30	0.6828	1.3104	1.6973	2.0423	2.4573	2.7500
31	0.6825	1.3095	1.6955	2.0395	2.4528	2.7440
32	0.6822	1.3086	1.6939	2.0369	2.4487	2.7385
33	0.6820	1.3077	1.6924	2.0345	2.4448	2.7333

Fuente: [28]

El valor de t tabulado obtenido para los 32 grados de libertad calculados con una significancia del 5% es mayor que el valor calculado por ende se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alterna que indica que el nivel de disipación de energía del amortiguador propuesto es mayor que los modelos originales, por ende, el dispositivo es adecuado para su uso en edificios de mediana altura.

## CAPÍTULO V

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 5.1. Conclusiones

- En el estudio se identificaron tres tipos de amortiguadores usados comúnmente en el mercado estos fueron: amortiguador de rendija de placas interconectadas, amortiguador de placa con rendija y brazos y amortiguador de placas paralelas con superficies de fricción, todos fueron sometidas a las mismas cargas utilizando las mismas condiciones de frontera a través del método de elementos finitos.
- Luego de analizar los distintos tipos de amortiguadores híbridos para edificaciones de mediana altura se encontró que el que tiene una mejor disipación de energía es el amortiguador híbrido de placas paralelas con superficies de fricción ya que admite mayor desplazamiento superando ligeramente el límite de elasticidad de los materiales de los que está constituido y tiene una curva de histéresis uniforme que demuestra que es estable.
- El amortiguador 1 admite una deformación considerable este fue el de placas interconectadas sin embargo presenta concentraciones de esfuerzos excesivas especialmente en las reducciones de sección lo que disminuye su desempeño además de tener un tamaño considerable que interferiría con las condiciones arquitectónicas y funcionales de los edificios.
- El amortiguador que tuvo el mejor desempeño fue el de placas paralelas ya que tiene dos partes importantes que ayudan a disipar la energía las placas ceden producto de la fuerza aplicada actuando como elementos fusibles, mientras que las superficies que están en contacto disipan la energía en forma de calor por esto admite una deformación mayor que los otros dos modelos y es más compacto para ser usado en edificios de mediana altura.
- El primer modelo de amortiguador tiene una curva histerética irregular que afecta la funcionalidad de este por lo que no es predecible su funcionamiento lo que lo hace menos confiable para ser usado en edificios de mediana altura.
- Luego de analizar cuál de los tres tipos de amortiguadores tiene el mejor desempeño se escogió el tercero como modelo base ya que tiene las mejores prestaciones, sin embargo, es necesario realizar adecuaciones para que admita mayores deformaciones y disipe mejor la energía.

- El segundo amortiguador fue el que menos cantidad de energía disipó dado que al aplicarse la carga en el extremo transversal la placa gruesa le proporciona rigidez evitando que se formen grandes desplazamientos que es lo que se busca en estos dispositivos.
- En el modelo planteado se disminuyó el espesor de las placas centrales para hacerlas intencionalmente más débiles ya que se busca que cedan disipando una cantidad considerable de energía, además se realizaron muescas radiales en los extremos para concentrar de forma intencionada los esfuerzos en las placas.
- El modelo propuesto tiene un comportamiento más estable y admite mayores deformaciones por ciclo de carga, en este caso la marga máxima aplicada fue de 354,85 kN con una deformación máxima de 53,47 mm.

## **5.2.Recomendaciones**

- Para futuras investigaciones se recomienda analizar amortiguadores híbridos de distintos materiales ya que algunos de estos ofrecen características propias que los hace más dúctiles o frágiles y se pueden aprovechar para disipación de energía producida por las cargas sísmicas.
- Un factor que interfiere en el desempeño del amortiguador es el punto o sentido de aplicación de la carga, es recomendable que en futuros trabajos también se analice por separado en qué sentido de aplicación de carga tiene más eficiencia el amortiguador con esto se puede plantear la geometría más adecuada de este.
- Es necesario también considerar investigaciones sobre las superficies de fricción ya que ciertos materiales ofrecen coeficientes de fricción adecuados para disipar mejor la energía, en este caso se pueden aprovechar nuevos materiales existentes en el mercado como fibras sintéticas de gran resistencia para futuras investigaciones.
- Para validar los modelos de elementos finitos es necesario llevar a cabo ensayos de carga cíclica físicos con esto se puede conocer el comportamiento real de los amortiguadores y generar modelos MEF confiables.

## REFERENCIAS

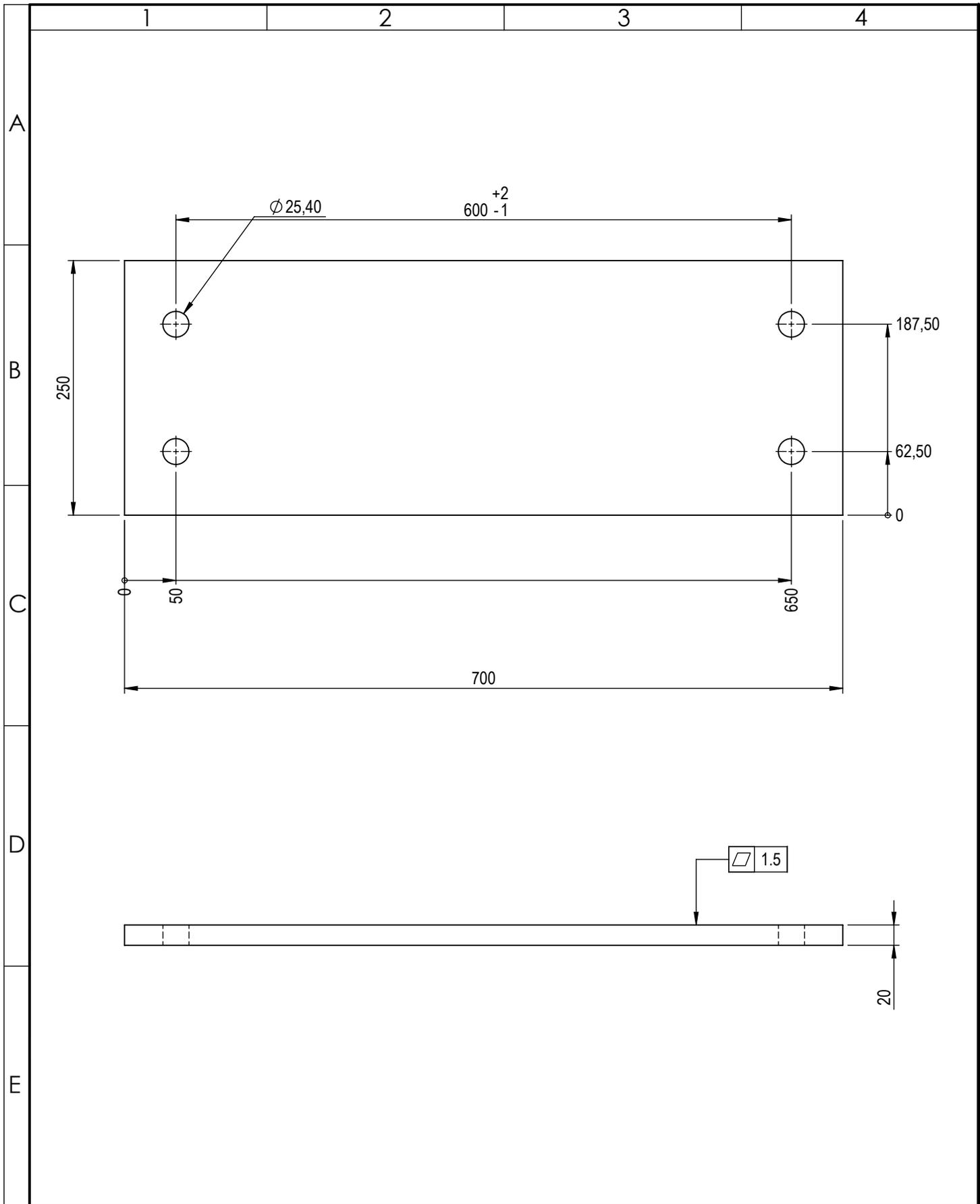
- [1] M. Bazzaz, M. A. Kafi, A. Kheyroddin, Z. Andalib, and H. Esmaeili, “Evaluating the seismic performance of off-centre bracing system with circular element in optimum place,” *Int. J. Steel Struct.*, vol. 14, no. 2, pp. 293–304, 2014, doi: 10.1007/s13296-014-2009-x.
- [2] A. Naeem and J. Kim, “Seismic performance evaluation of a multi-slit damper,” *Eng. Struct.*, vol. 189, no. February, pp. 332–346, 2019, doi: 10.1016/j.engstruct.2019.03.107.
- [3] B. Shahbazi and E. Moaddab, “A New Hybrid Friction Damper (HFD) for Dual-Level Performance of Steel Structures,” *Int. J. Steel Struct.*, vol. 21, no. 4, pp. 1332–1345, 2021, doi: 10.1007/s13296-021-00507-9.
- [4] M. Sajjad, M. Reza, and A. Hosseini, “Experimental evaluation of self-centering hybrid coupled wall subassemblies with friction dampers,” *Eng. Struct.*, vol. 214, no. October 2019, p. 110644, 2020, doi: 10.1016/j.engstruct.2020.110644.
- [5] B. H. Hashemi and E. Moaddab, “Experimental study of a hybrid structural damper for multi-seismic levels,” *Proc. Inst. Civ. Eng. Struct. Build.*, vol. 170, no. 10, pp. 722–734, 2017, doi: 10.1680/jstbu.15.00122.
- [6] D. Martínez and E. Parra, “Análisis de viabilidad técnica del sistema de resistencia sísmica de un edificio de siete pisos con y sin dispositivos de disipación de energía y sus costos de implementación,” Universidad La Gran Colombia, 2019.
- [7] S. Jaisee, F. Yue, and Y. H. Ooi, “A state-of-the-art review on passive friction dampers and their applications,” *Eng. Struct.*, vol. 235, no. September 2020, p. 112022, 2021, doi: 10.1016/j.engstruct.2021.112022.
- [8] A. Javanmardi, Z. Ibrahim, K. Ghaedi, H. Benisi Ghadim, and M. U. Hanif, “State of the Art Review of Metallic Dampers: Testing, Development and Implementation,” *Arch. Comput. Methods Eng.*, vol. 27, no. 2, pp. 455–478, 2020, doi: 10.1007/s11831-019-09329-9.
- [9] A. Jalaefar and B. Asgarian, “Innovative hybrid damper with structural steel

- and nickel-titanium shape memory alloy bars,” *Proc. Inst. Civ. Eng. Struct. Build.*, vol. 174, no. 8, pp. 685–693, 2021, doi: 10.1680/jstbu.19.00232.
- [10] S. B. Beheshti-Aval, H. Mahbanouei, and F. Zareian, “A hybrid friction-yielding damper to equip concentrically braced steel frames,” *Int. J. Steel Struct.*, vol. 13, no. 4, pp. 577–587, 2013, doi: 10.1007/s13296-013-4001-2.
- [11] J. Lee, H. Kang, and J. Kim, “Seismic performance of steel plate slit-friction hybrid dampers,” *J. Constr. Steel Res.*, vol. 136, no. April, pp. 128–139, 2017, doi: 10.1016/j.jcsr.2017.05.005.
- [12] J. Li, W. Wang, and Z. Cao, “Self-centering hybrid dampers for improving seismic resilience,” *Eng. Struct.*, vol. 244, no. March, p. 112829, 2021, doi: 10.1016/j.engstruct.2021.112829.
- [13] M. S. E. Nasab and J. Kim, “Seismic Retrofit of Structures Using Hybrid Steel Slit–Viscoelastic Dampers,” *J. Struct. Eng.*, vol. 146, no. 11, 2020, doi: 10.1061/(asce)st.1943-541x.0002816.
- [14] Z. Li, H. Dong, X. Wang, and M. He, “Experimental and numerical investigations into seismic performance of timber-steel hybrid structure with supplemental dampers,” *Eng. Struct.*, vol. 151, pp. 33–43, 2017, doi: 10.1016/j.engstruct.2017.08.011.
- [15] S. Hashizume and I. Takewaki, “Hysteretic-Viscous Hybrid Damper System With Stopper Mechanism for Tall Buildings Under Earthquake Ground Motions of Extremely Large Amplitude,” *Front. Built Environ.*, vol. 6, no. September, pp. 1–16, 2020, doi: 10.3389/fbuil.2020.583543.
- [16] J. Kim, “Development of seismic retrofit devices for building structures,” *Int. J. High-Rise Build.*, vol. 8, no. 3, pp. 221–227, 2019, doi: 10.21022/IJHRB.2019.8.3.221.
- [17] G. Li and H. N. Li, “Experimental study and application of metallic yielding-friction damper,” *J. Earthq. Tsunami*, vol. 7, no. 3, pp. 1–13, 2013, doi: 10.1142/S1793431113500127.
- [18] L. A. Pérez, S. Avila, and G. Doz, “Seismic response control of adjacent buildings connected by viscous and hybrid dampers,” *Conf. Proc. Soc. Exp. Mech. Ser.*, vol. 4, pp. 433–440, 2014, doi: 10.1007/978-3-319-04546-7\_46.

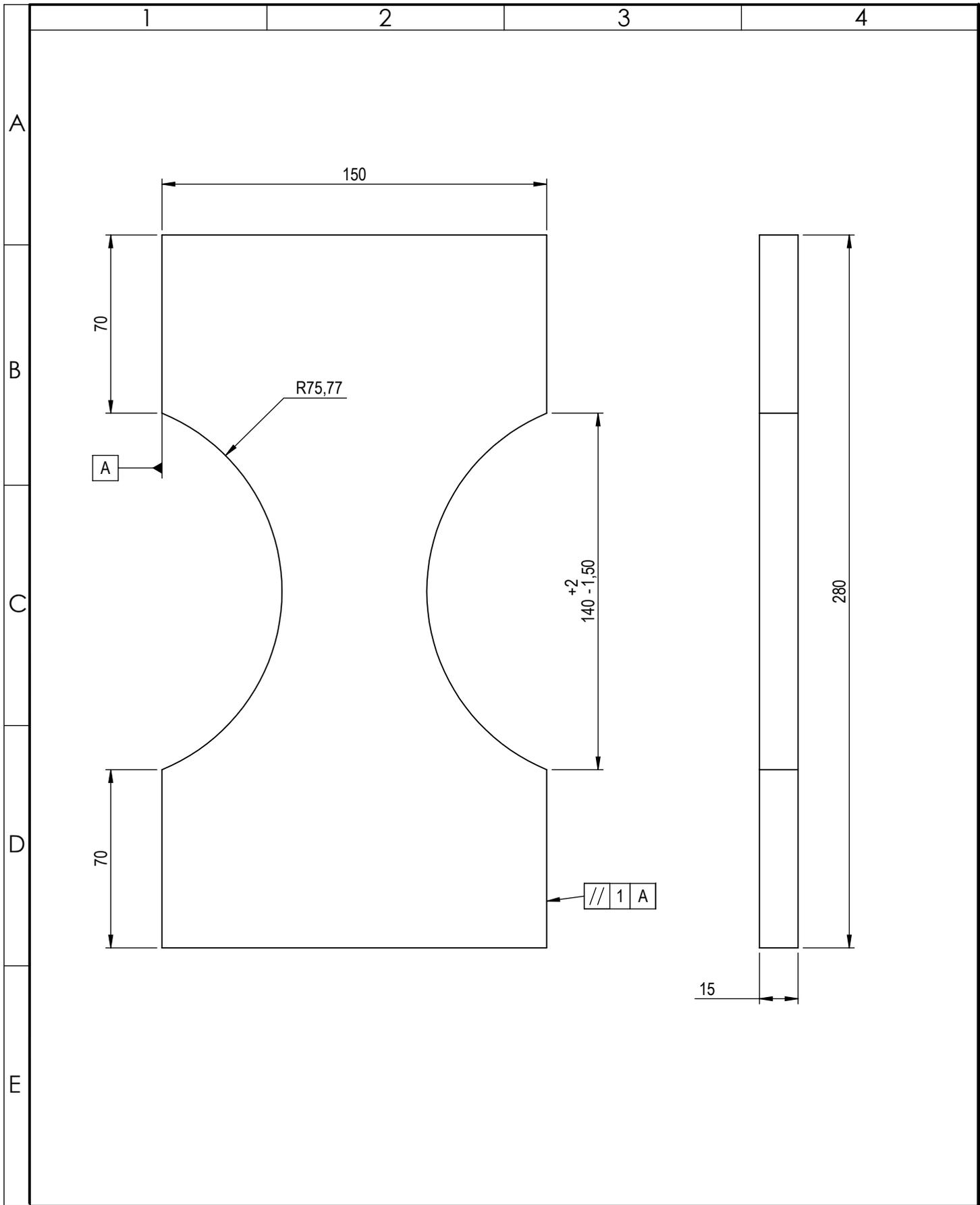
- [19] P. Avestaeifar and H. Khezzadeh, “Experimental and numerical assessment of Piston Hybrid Frictional Metallic Damper (PHFMD),” *Eng. Struct.*, vol. 243, no. June, p. 112669, 2021, doi: 10.1016/j.engstruct.2021.112669.
- [20] N. D. K. Reddy Chukka, L. Natrayan, and W. D. Mammo, “Seismic Fragility and Life Cycle Cost Analysis of Reinforced Concrete Structures with a Hybrid Damper,” *Adv. Civ. Eng.*, vol. 2021, 2021, doi: 10.1155/2021/4195161.
- [21] D. Hyeon, S. Hyung, and J. Kim, “Low - Cycle Fatigue Failure Prediction of Steel Yield Energy Dissipating Devices Using a Simplified Method,” *Int. J. Steel Struct.*, no. 0123456789, 2018, doi: 10.1007/s13296-018-0148-1.
- [22] R. Alberto and S. Turcios, “t-Student. Usos y abusos,” pp. 59–61, 2015.
- [23] MatWeb, “ASTM A36 Steel, plate,” *Mechanical Properties*, 2022. .
- [24] H. U. Sajid and R. Kiran, “Influence of stress concentration and cooling methods on post-fire mechanical behavior of ASTM A36 steels,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 186, pp. 920–945, Oct. 2018, doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2018.08.006.
- [25] X. C. Liu, X. N. He, H. X. Wang, and A. L. Zhang, “Compression-bend-shearing performance of column-to-column bolted-flange connections in prefabricated multi-high-rise steel structures,” *Eng. Struct.*, vol. 160, pp. 439–460, Apr. 2018, doi: 10.1016/J.ENGSTRUCT.2018.01.026.
- [26] G. Kulak, “High Strength Bolts,” in *Steel Design Guide*, AISC, 2003.
- [27] E. Peruano, “NORMA TÉCNICA E.031 AISLAMIENTO SÍSMICO DEL REGLAMENTO NACIONAL DE EDIFICACIONES,” *Ed. Peru*, 2019.
- [28] A. Shah, A. G. Wilson, and Z. Ghahramani, “Student-t processes as alternatives to Gaussian processes,” *J. Mach. Learn. Res.*, vol. 33, pp. 877–885, 2014.

## **ANEXOS**

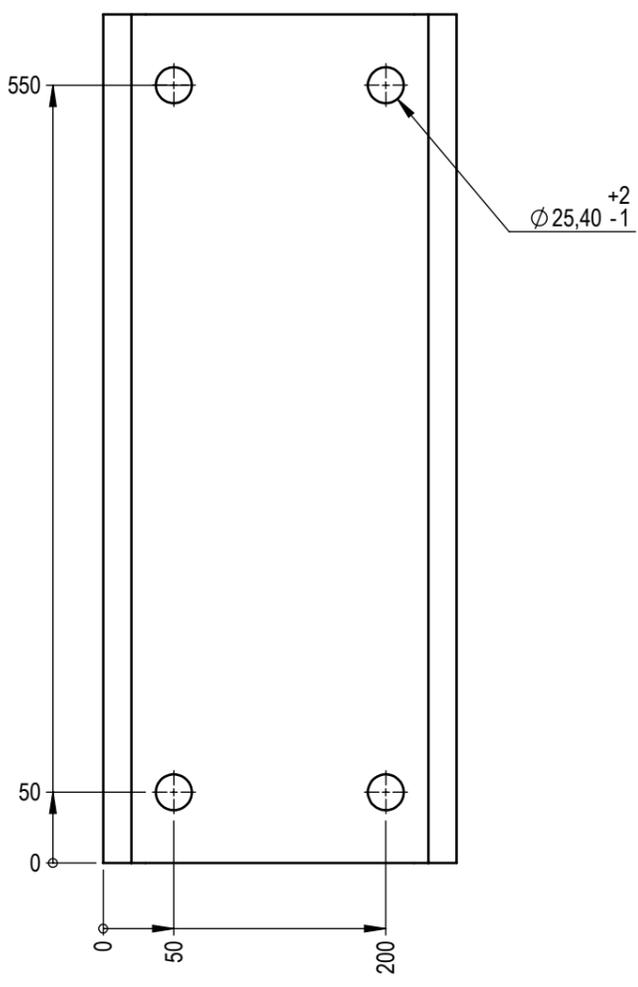
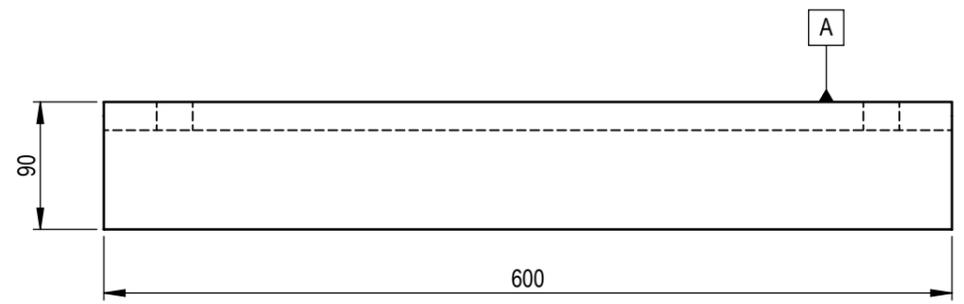
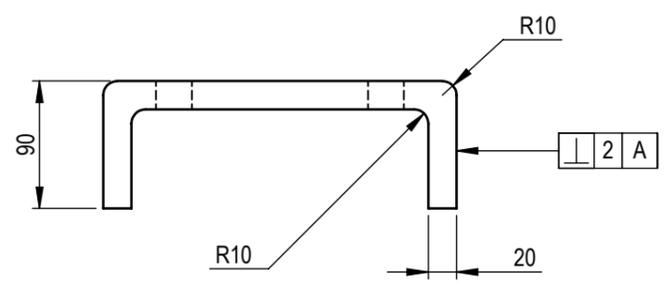
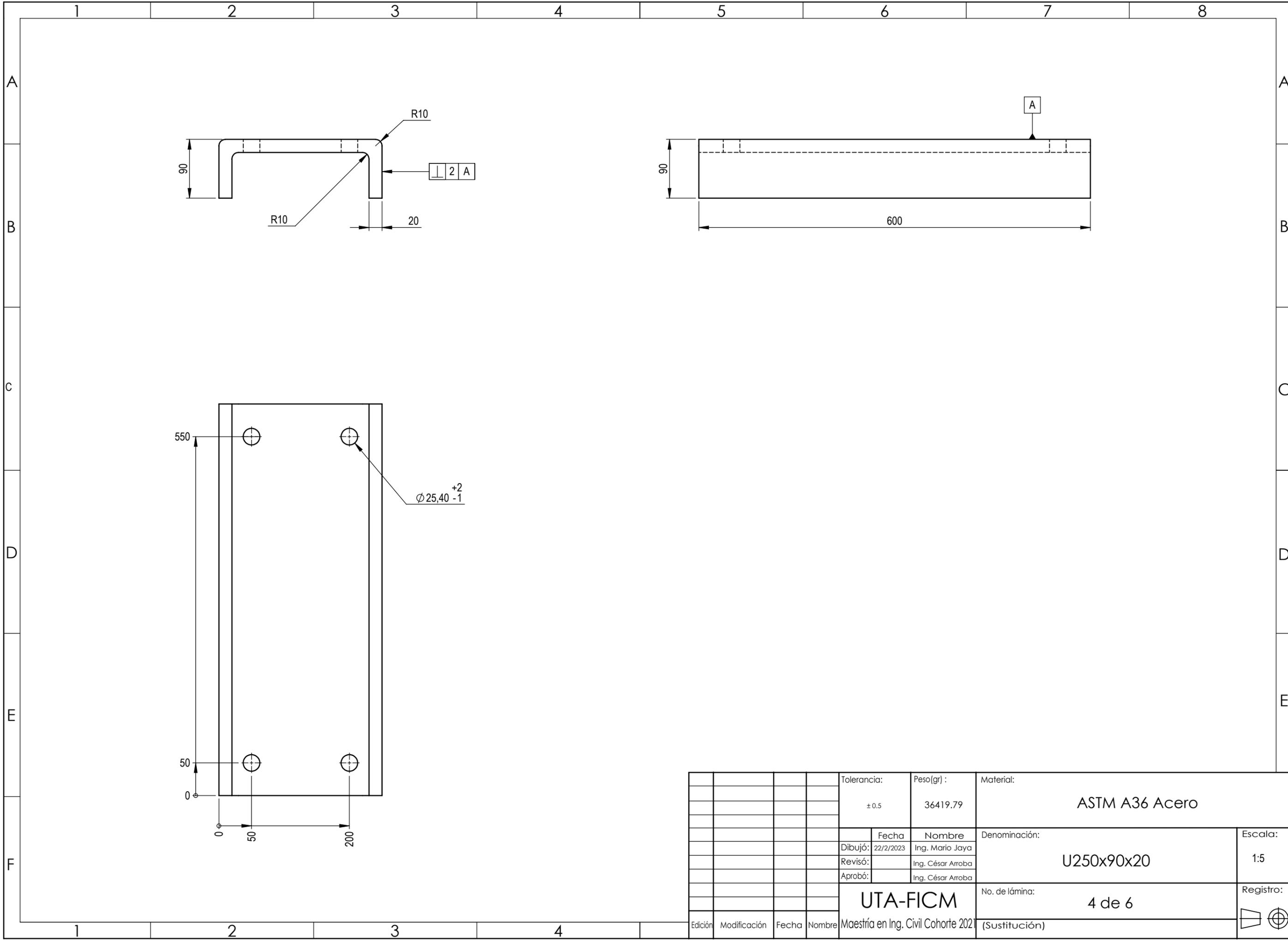




				Tolerancia: ± 0.5	Peso: 27156.788	Material: <b>ASTM A36 Acero</b>	
				Fecha	Nombre	Denominación: <b>Placa Inferior</b>	Escala: 1:1
				Dibujó: 22/2/2023	Ing. Mario Jaya		
				Revisó:	Ing. César Arroba		
				Aprobó:	Ing. César Arroba		
				<b>FICM U.T.A.</b>		No. de lámina: <b>2 de 6</b>	Registro:
Edición	Modificación	Fecha	Nombre	Maestría en Ing. Civil cohorte 2021		(Sustitución)	

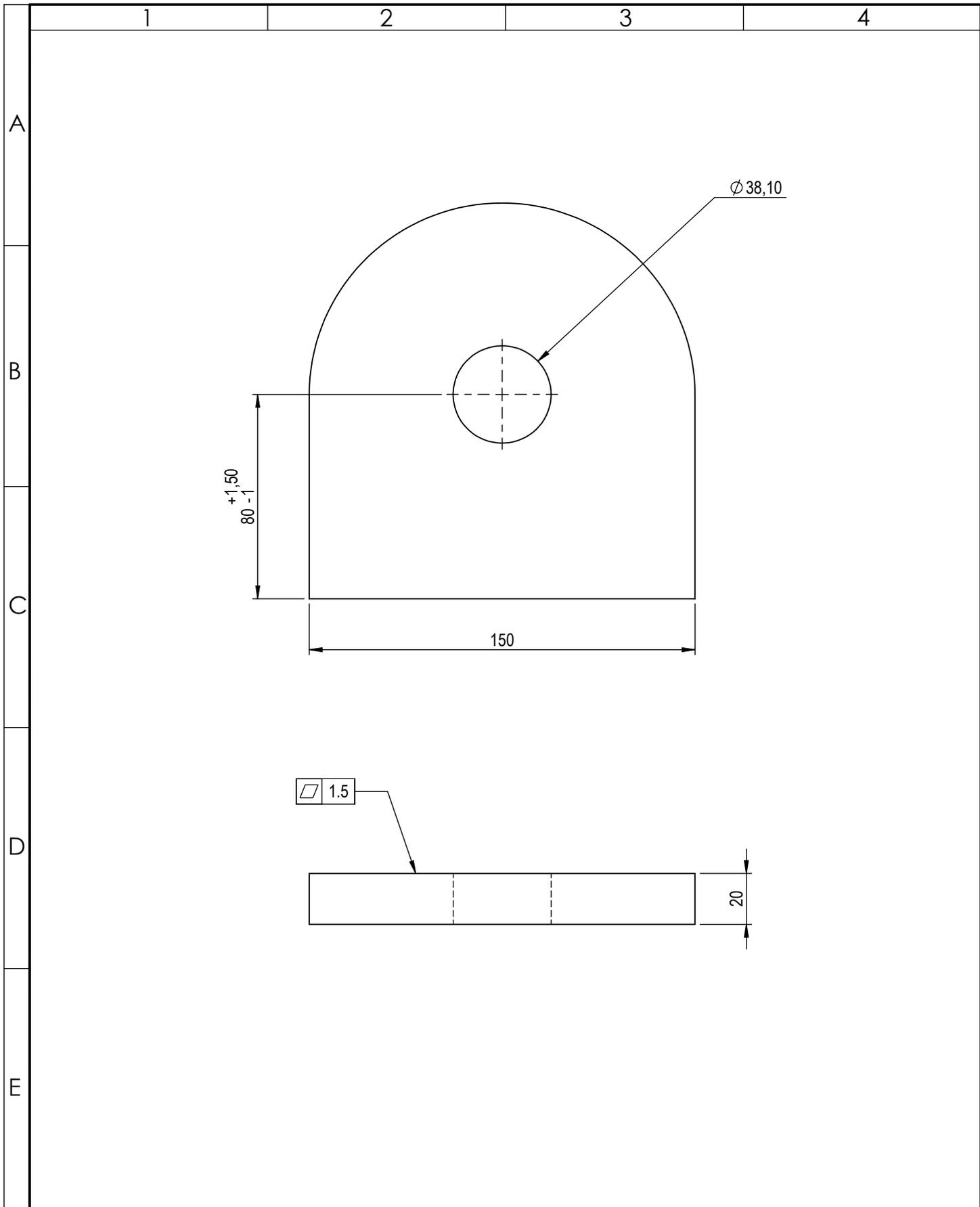


				Tolerancia: ± 0.5	Peso: 3830.881	Material: ASTM A36 Acero	
				Fecha	Nombre	Denominación: Placa Intermedia	Escala: 1:1
				Dibujó: 22/2/2023	Ing. Mario Jaya		
				Revisó:	Ing. César Arroba		
				Aprobó:	Ing. César Arroba	No. de lámina: 3 de 6	Registro: 
Edición	Modificación	Fecha	Nombre	FICM U.T.A. Maestría en Ing. Civil cohorte 2021			



				Tolerancia:	Peso(gr) :	Material:		
				± 0.5	36419.79	ASTM A36 Acero		
					Fecha	Nombre	Denominación:	
				Dibujó:	22/2/2023	Ing. Mario Jaya	U250x90x20	
				Revisó:		Ing. César Arroba		
				Aprobó:		Ing. César Arroba		
				UTA-FICM			No. de lámina:	Registro:
				Maestría en Ing. Civil Cohorte 2021			4 de 6	1:5
Edición	Modificación	Fecha	Nombre				(Sustitución)	





				Tolerancia: ± 0.5	Peso: 3092.215	Material: <b>ASTM A36 Acero</b>	
				Fecha	Nombre	Denominación:	Escala:
				Dibujó: 22/2/2023	Ing. Mario Jaya	<b>Sujetador superior</b>	<b>1:1</b>
				Revisó:	Ing. César Arroba		
				Aprobó:	Ing. César Arroba		
				<b>FICM U.T.A.</b>		No. de lámina:	Registro:
				Maestría en Ing. Civil Cohorte 2021		<b>6 de 6</b>	
Edición	Modificación	Fecha	Nombre			(Sustitución)	