



FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL MECÁNICA

**DISEÑO DE DISIPADORES HISTERÉTICOS DE
ENERGÍA SÍSMICA PARA UN PÓRTICO DE 5
PLANTAS**

**MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL MECÁNICO**

PROF. GUÍA: JORGE HINOJOSA

FLAVIA BUSTOS HERNÁNDEZ

**CURICÓ - CHILE
2019**

CONSTANCIA

La Dirección del Sistema de Bibliotecas a través de su encargado Biblioteca Campus Curicó certifica que el autor del siguiente trabajo de titulación ha firmado su autorización para la reproducción en forma total o parcial e ilimitada del mismo.



Curicó, 2022

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a mi familia, porque gracias a su apoyo fue posible seguir estudiando a pesar de todas las situaciones que tuve que enfrentar y a mis amigos, por estar siempre a mi lado, cuando los necesité.

Finalmente agradecer a los profesores de la Universidad de Talca, por su buena disposición a la hora de entregar los conocimientos necesarios para ser una buena profesional.

DEDICATORIA

(A mi hijo Christian, quién es
y será mi mejor motivación).

RESUMEN

El pórtico ubicado en la ciudad de Lorca, España, actualmente no cuenta con un sistema de disipación de energía, por lo cual en esta memoria se diseñó un sistema de disipadores histeréticos para cada una de las 5 plantas que lo componen, basándose en las curvas fuerza-desplazamiento calculadas por el profesor David Domínguez del departamento de Ingeniería y Gestión de la Construcción de la Universidad de Talca, que debiese cumplir el disipador en cada uno de los pisos.

Para lograr un diseño acorde a los requerimientos se estableció una metodología, basada en expresiones teóricas y experimentales con el fin de estimar los parámetros que caracterizan la curva, que son rigidez elástica, fuerza de fluencia y rigidez plástica sobre rigidez elástica, para así dimensionar los sistemas de disipación. Esta metodología fue validada con simulaciones computacionales realizadas en el software comercial Ansys v19.1.

Palabras clave: estructura sismorresistente, disipador histerético, simulación.

ABSTRACT

The portico located in the city of Lorca, Spain, does not currently have an energy dissipation system, so in this report an hysteretic energy dissipating devices was designed for each of the 5 plants that make it, based on the curves force-displacement calculated by Professor David Domínguez of the Department of Engineering and Construction Management of the University of Talca, which should meet the dissipator in each of the floors.

To achieve a design according to the requirements, a methodology was established, based on theoretical and experimental expressions in order to estimate the parameters that characterize the curve, which are elastic stiffness, yield strength and the coefficient between plastic stiffness and elastic stiffness, in order to dimension the dissipation systems. This methodology was validated with computational simulations performed in the commercial software Ansys v19.1

Key words: seismic resistant structure, hysteretic energy dissipating devices, simulation.

ÍNDICE GENERAL

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Antecedentes y motivación.....	2
1.2. Descripción del problema.....	3
1.3. Solución propuesta	3
1.4. Objetivos.....	3
1.4.1. Objetivo general	3
1.4.2. Objetivos específicos.....	3
1.5. Alcances.....	4
1.6. Resultados esperados.....	4
1.7. ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO.....	4
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO	5
2.1. SISTEMAS DE PROTECCIÓN SÍSMICA	6
2.1.1. Sistemas activos.....	6
2.1.2. Sistemas semi activos	6
2.1.3. Sistemas pasivos	7
2.1.3.1. Sistemas de aislación sísmica.....	7
A) Aisladores elastoméricos	8
B) Aisladores deslizantes.....	9
2.1.3.2. Sistemas pasivos de disipación de energía	9
A) Disipadores activados por desplazamientos.....	10
B) Disipadores activados por velocidad	10
C) Disipadores activados por desplazamiento y velocidad.....	11
D) Dispositivos activados por movimiento.....	11

2.2.	DISIPADORES HISTERÉTICOS	12
2.2.1.	Disipadores de barras de pandeo restringido	13
2.2.2.	Disipador Slit-Type Plates.....	13
2.2.3.	Disipador SSD	13
2.2.4.	Disipador YSPD	14
2.2.5.	Disipadores ADAS	15
2.2.6.	Disipadores TADAS.....	15
2.2.7.	Disipador HADAS.....	16
2.2.8.	Disipador WPD	16
2.2.9.	Disipador Honeycomb	17
2.2.10.	Disipador AMD	17
2.2.11.	Disipador SAFYD.....	18
2.3.	COMPORTAMIENTO ELASTOPLÁSTICO DE LOS MATERIALES.....	18
2.4.	CONSIDERACIONES EN EL DISEÑO DE UN DISIPADOR	20
2.5.	METODOLOGÍA DE CÁLCULO DE DISIPADORES HISTERÉTICOS BASADA EN ENERGÍA	21
2.6.	CURVAS FUERZA-DESPLAZAMIENTO QUE DEBE CUMPLIR EL DISIPADOR HISTERÉTICO	23
2.7.	MÉTODO DE DOBLE INTEGRACIÓN	24
2.8.	SEGUNDO TEOREMA DE CASTIGLIANO	25
2.9.	SISTEMAS DE RESORTES EN SERIE Y PARALELO	26
CAPÍTULO 3. ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DE UNA GEOMETRÍA ADAS.		28
3.1.	SIMULACIÓN DE PLASTICIDAD EN ANSYS	29
3.2.	ESTIMACIÓN DE LA RIGIDEZ ELÁSTICA DE UN DISIPADOR CON INERCIA CONSTANTE	32

3.3. ESTIMACIÓN DE LA RIGIDEZ ELÁSTICA DE UN DISIPADOR CON INERCIA VARIABLE	37
3.4. ESTIMACIÓN DE LA RELACIÓN POST FLUENCIA DEL DISIPADOR CON INERCIA VARIABLE.....	40
3.5. ESTIMACIÓN DE LA FUERZA DE FLUENCIA DEL DISIPADOR CON INERCIA VARIABLE.....	42
CAPÍTULO 4. METODOLOGÍA Y RESULTADOS	44
4.1. CÁLCULO DE LA DISPOSICIÓN DE LAS UNIDADES BÁSICAS EN SERIE Y PARALELO	45
4.2. METODOLOGÍA PROPUESTA.....	47
4.3. RESULTADOS PLANTA 1	47
4.4. RESULTADOS PLANTA 2	51
4.5. RESULTADOS PLANTA 3	51
4.6. RESULTADOS PLANTA 4	52
4.7. RESULTADOS PLANTA 5	53
CAPÍTULO 5. ESTUDIO DE NUEVAS GEOMETRÍAS Y CONFIGURACIONES.....	55
5.1. NUEVAS GEOMETRÍAS	56
5.2. NUEVA CONFIGURACIÓN	60
CONCLUSIONES.....	64
REFERENCIAS	66
ANEXO 1: CÁLCULO DE CURVA ELÁSTICA PARA GEOMETRÍA DE INERCIA CONSTANTE	68
ANEXO 2: CÁLCULO DE CURVA ELÁSTICA PARA GEOMETRÍA DE INERCIA VARIABLE.....	70
ANEXO 3: CÁLCULO DE DESPLAZAMIENTO GENERADO POR CORTE.....	73

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1: Ejemplo de edificio construido utilizando pórticos estructurales. Fuente: Tena-Colunga y Nangullasmú-Hernández, 2015.....	2
Figura 2.1: Principales protecciones sísmicas. Fuente: Elaboración Propia.	12
Figura 2.2: Disipadores BRB. Fuente: Morillas, 2013.	13
Figura 2.3: Disipador hysterético Slit-Type Plate. Fuente: Journal of Structural Engineering, Vol 144, issue 1.	14
Figura 2.4: Disipador SSD. Fuente: Dimopoulos, 2012.....	14
Figura 2.5: Disipador YSPD. Fuente: Nath, 2016.....	14
Figura 2.6: Comportamiento del disipador ADAS al estar sometido a cargas sísmicas. Fuente: Alehashem y otros, 2008.	15
Figura 2.7: Comportamiento del disipador TADAS al estar sometido a cargas sísmicas. Fuente: Alehashem y otros, 2008.	16
Figura 2.8: Disipador HADAS. Fuente: Basu & Reddy, 2016.	16
Figura 2.9: Disipador WPD. Fuente: Morillas, 2013.	16
Figura 2.10: Disipador Honeycomb. Fuente: Somarriba, 2012.....	17
Figura 2.11: Forma de los tubos corrugados. De izquierda a derecha se muestran S, C y U respectivamente. Fuente: Motamedi & Nateghi-A, 2018.....	17
Figura 2.12: Comportamiento de un sistema disipador compuesto por dos AMD. Fuente: Motamedi & Nateghi-A, 2018.....	18
Figura 2.13: Disipador SAFYD luego de un ensayo de falla. Fuente: Sahoo et al., 2015.	18
Figura 2.14: Comportamiento elastoplástico perfecto. Fuente: Gilbert & Hadzi-Janev, 2009.	19
Figura 2.15: Comportamiento idealizado en plasticidad. Fuente: Gilbert & Hadzi-Janev, 2009.	19
Figura 2.16: Curva carga lateral Q v/s desplazamiento δ_i . (a) estructura existente. (b) disipador de energía hysterético. (c) conjunto estructura- disipador. Fuente: Benavent-Climent, 2011. ...	23
Figura 2.17: Sistemas de resortes. El de la izquierda corresponde al sistema en serie y el de la derecha al sistema en paralelo. Fuente: Rico, 2018.....	26
Figura 3.1: Condiciones de borde de la simulación computacional de un HADAS. Fuente: Briones y de la Llera, 2014.....	29

Figura 3.2: Dimensiones del disipador ADAS simulado. Fuente: Elaboración propia.	30
Figura 3.3: Condiciones de borde y malla utilizadas. Fuente: Ansys v19.1.....	30
Figura 3.4: Dimensiones de la geometría en la que se estudiará la rigidez. Fuente: Elaboración propia.	33
Figura 3.5: Condiciones de borde de la placa central. Fuente: Elaboración propia.	33
Figura 3.6: DCL de la geometría. Fuente: Elaboración propia.	34
Figura 3.7: Deflexión esperada en la placa del disipador. Fuente: Elaboración propia.	34
Figura 3.8: DCL para determinar el momento interno de la geometría. Fuente: Elaboración propia.	34
Figura 3.9: Variación de la base de la sección rectangular en función de x. La imagen de la izquierda es para el tramo $0 \leq x \leq L/2$ y la de la derecha para $L/2 \leq x \leq L$. Fuente: Elaboración propia.	37
Figura 3.10: Deformación observada en geometrías con e/L mayor a 0,05. Fuente: Ansys v19.1	39
Figura 4.1: Condiciones de borde aplicadas en la simulación de un sistema de disipación de energía sísmica. Fuente: Ansys v19.1	49
Figura 4.2: Sistema de disipación de energía sísmica de la planta 1. Fuente: Elaboración propia.	50
Figura 4.3: Sistema de disipación de energía sísmica de la planta 2. Fuente: Elaboración propia.	51
Figura 4.4: Sistema de disipación de energía sísmica de la planta 3. Fuente: Elaboración propia.	52
Figura 4.5: Sistema de disipación de energía sísmica de la planta 4. Fuente: Elaboración propia.	52
Figura 4.6: Sistema de disipación de energía sísmica de la planta 5. Fuente: Elaboración propia.	53
Figura 5.1: Geometría curva propuesta. Fuente: Elaboración propia.	56
Figura 5.2: Sistema de disipación para la planta 4 con geometrías curvas. Fuente elaboración propia.	58
Figura 5.3: Nueva geometría propuesta. Fuente: Elaboración propia.	59

Figura 5.4: Nueva propuesta de sistema de disipación para la planta 5. Fuente: Elaboración propia.....	59
Figura 5.5: Nueva configuración de geometría ADAS $z=150$, $a=30$, $L=180$, $e=10$. Fuente: Elaboración propia.....	60
Figura 5.6: Condiciones de borde de la nueva configuración. Fuente: Ansys v19.1	60
Figura 5.7: Desplazamientos de la nueva configuración. Fuente: Ansys v19.1	61
Figura 5.8: Configuración equivalente a 2 disipadores en paralelo y 3 en serie.	62
Figura 5.9: Sistema de disipación para la planta 1 utilizando la nueva configuración. Fuente: Elaboración propia.....	63
Figura 5.10: Opciones para instalar esta configuración en el pórtico. Fuente: Elaboración propia.....	63

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 3.1: Curva fuerza-desplazamiento. Fuente: Elaboración propia.	31
Gráfico 3.2: Fuerza de fluencia. Fuente: Elaboración propia.	32
Gráfico 3.3: Relación K_p/K_e en función del espesor de la geometría $z=150$, $a=30$ y $L=180$. Fuente: Elaboración propia.....	41
Gráfico 3.4: Fuerza de fluencia en función del espesor de la geometría $z=150$, $a=30$ y $L=180$. Fuente: Elaboración propia.....	42
Gráfico 5.1: K_p/K_e versus espesor para la geometría curva propuesta. Fuente: Elaboración propia.....	57

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Datos de los disipadores calculados por el profesor David Domínguez	24
Tabla 3.1 Comparación de rigidez teórica y rigidez obtenida de simulación computacional. Fuente: Elaboración propia.....	36
Tabla 3.2 Comparación de los errores de estimación de la rigidez de las tres expresiones planteadas. Fuente: Elaboración propia.....	40
Tabla 3.3: Coeficientes α y β para cada geometría analizada. Fuente: Elaboración propia.	41
Tabla 3.4: Coeficientes γ , θ y μ para cada geometría analizada. Fuente: Elaboración propia. .	43
Tabla 4.1: Resultados sistemas serie y paralelo. Fuente: Elaboración propia.....	46
Tabla 4.2: Resultados de la primera iteración para la planta 1. Fuente: Elaboración propia. ...	48
Tabla 4.3: Espesores que cumplen el requerimiento K_p/K_e para la planta 1. Fuente: Elaboración propia.....	48
Tabla 4.4: Sistemas de disipación para la planta 1. Fuente: Elaboración propia.	49
Tabla 4.5: Resultados de las simulaciones de las geometrías seleccionadas para la planta 1. Fuente: Elaboración propia.....	50
Tabla 4.6: Resumen de los resultados obtenidos. Fuente: Elaboración propia.	54
Tabla 5.1: Variación de la dimensión "d" en geometría curva. Fuente: Elaboración propia. ...	57
Tabla 5.2: Estimaciones de los sistemas de disipación utilizando geometrías curvas. Fuente: Elaboración propia.....	57
Tabla 5.3: Comparación entre la estimación del comportamiento a partir de la simulación de una placa y los resultados de la simulación del sistema completo. Fuente: Elaboración propia.	61
Tabla 5.4: Comparación entre la estimación del comportamiento a partir de la simulación de una placa y los resultados de la simulación del sistema de la figura 5.8. Fuente: Elaboración propia.....	62

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1. ANTECEDENTES Y MOTIVACIÓN

La idea de estudiar los disipadores histeréticos, que son aquellos que disipan la energía de un sismo a medida que su material se deforma plásticamente y diseñarlos en base a un caso determinado, surge del profesor David Domínguez Santos del departamento de Ingeniería y Gestión de la Construcción de la universidad de Talca, quién para este proyecto de memoria facilitó los requerimientos que debe cumplir el sistema de disipación de energía para un pórtico ubicado en España.

La palabra pórtico hace referencia a un tipo de sistema estructural utilizado como esqueleto de las edificaciones. Consiste en elementos horizontales (vigas) unidos rígidamente a elementos verticales (columnas). Esta unión rígida, es la encargada de asegurar la continuidad y en consecuencia la estabilidad del conjunto.



Figura 1.1: Ejemplo de edificio construido utilizando pórticos estructurales. Fuente: Tena-Colunga y Nangullasmú-Hernández, 2015.

Independientemente de la ubicación geográfica de la estructura para la cual se diseñará el disipador, este tema tiene potencial aplicación en Chile, ya que está emplazado en una zona de alta sismicidad producida por la interacción entre las placas tectónicas de Nazca y la Sudamericana.

Debido a lo anterior, en Chile, la norma que regula el diseño sísmico de edificios para resguardar a la población: “Está orientada a lograr estructuras que: a) resistan sin daños movimientos

sísmicos de intensidad moderada; b) limiten los daños en elementos no estructurales durante sismos de mediana intensidad; c) aunque presenten daños, eviten el colapso durante sismos de intensidad excepcionalmente severa” (NCh433 Of.1996, 2012, p.21).

Para lograr los requerimientos de la norma, se pueden utilizar elementos de protección sísmica, como los disipadores, que son los dispositivos que se abordarán en este proyecto de memoria.

1.2. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

El pórtico de 5 pisos está ubicado en la ciudad de Lorca (España) y no cuenta con un sistema de protección sísmica. Debido a esto se requiere de un diseño estructural que le permita tener un mejor comportamiento frente a los sismos. Para ello, el profesor David Domínguez, pensando en disipadores histeréticos, calculó las curvas de fuerza-desplazamiento que debiese cumplir el sistema en cada uno de los 5 pisos de la estructura. Estas curvas son esenciales para diseñar el sistema de disipación.

1.3. SOLUCIÓN PROPUESTA

Para mejorar el comportamiento de la estructura se propone la instalación de disipadores histeréticos de energía. Debido a lo anterior, el proyecto de memoria estará enfocado en el diseño del sistema de disipación de energía para cada uno de los pisos, teniendo como base, la curva fuerza-desplazamiento que debe cumplir el disipador en cada uno de los pisos de la estructura.

1.4. OBJETIVOS

1.4.1. Objetivo general

Desarrollar sistemas de disipación de energía sísmica en base a los requerimientos de un pórtico existente utilizando simulaciones computacionales del comportamiento del material.

1.4.2. Objetivos específicos

- Investigar los disipadores histeréticos existentes.

Capítulo 1. Introducción

- Describir la metodología de cálculo utilizada para obtener la curva fuerza-desplazamiento que deben cumplir los disipadores en cada piso de la estructura.
- Modelar una unidad básica del disipador y obtener su comportamiento elastoplástico mediante simulación computacional.
- Desarrollar una expresión teórica de rigidez elástica para la unidad básica diseñada.
- Establecer una expresión experimental para estimar la relación entre la rigidez plástica y la rigidez elástica a partir de las simulaciones realizadas.
- Obtener el diseño del sistema de disipación de energía para cada piso, mediante la suma de comportamientos elastoplásticos de las unidades básicas que permitan cumplir los requerimientos de diseño.

1.5. ALCANCES

El diseño de los sistemas de disipación sísmica para cada piso se realizará de acuerdo con los resultados que entregue la simulación computacional realizada con el software Ansys versión 19.1. No se considera la evaluación experimental de los dispositivos.

1.6. RESULTADOS ESPERADOS

Luego de las simulaciones, se espera obtener un sistema de disipación para cada uno de los pisos de la estructura con una curva fuerza-desplazamiento que se aproxime a la calculada previamente por el profesor David Domínguez.

1.7. ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO

Este proyecto de memoria se desglosará en capítulos, los cuales son:

- Capítulo 2: Marco Teórico
- Capítulo 3: Estudio del comportamiento de una geometría ADAS
- Capítulo 4: Metodología y resultados
- Capítulo 5: Estudio de nuevas geometrías y configuraciones.

CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO

2.1. SISTEMAS DE PROTECCIÓN SÍSMICA

Los sistemas de protección sísmica son aquellos sistemas que tienen como objetivo principal mejorar la respuesta de una estructura sometida a vibraciones generadas por un sismo, con el fin de resguardar la seguridad de las personas y minimizar los daños que se generen en la edificación.

Los sistemas de protección sísmica, sin importar de qué tipo, deben instalarse en un lugar de la estructura donde puedan ser sometidos a inspección luego de un sismo y además su ubicación debe permitir la ejecución de labores de mantenimiento o de reemplazo en caso de ser necesario.

Los sistemas de protección sísmica se pueden dividir en tres categorías: activos, semi activos y pasivos.

2.1.1. Sistemas activos

En estos sistemas se busca estabilizar la estructura mediante la aplicación de fuerzas que contrarresten los efectos del sismo, para lo cual posee un monitoreo en tiempo real a través de sensores. Los datos que se obtienen son procesados por un algoritmo de control, el cual, determina la magnitud de la fuerza que debe generar el actuador, modificándola de acuerdo con los nuevos datos que va procesando, mejorando así, el comportamiento de la estructura frente al sismo.

Su desventaja es que es un sistema de alto costo y que además requiere de una fuente de energía independiente para poder asegurar su funcionamiento durante el evento sísmico.

2.1.2. Sistemas semi activos

En este tipo de sistema, al igual que en los sistemas activos, existe un monitoreo en tiempo real del comportamiento de la estructura durante el sismo, sin embargo, en vez de aplicar fuerzas para estabilizar la estructura, se modifican las propiedades mecánicas de los disipadores de energía instalados. Entre estos sistemas, se pueden encontrar los amortiguadores de masa semi activos y los dispositivos de fricción con fricción controlable.

2.1.3. Sistemas pasivos

Estos sistemas son los más utilizados, siendo su objetivo principal minimizar la respuesta dinámica de la estructura, lo cual se logra disipando la energía del sismo en forma de calor. Para ello se utilizan dispositivos mecánicos tales como los aisladores sísmicos de base y los disipadores de energía.

2.1.3.1. *Sistemas de aislación sísmica*

Como su nombre lo indica, este dispositivo permite aislar la estructura de los movimientos del suelo, es decir, limitar la transferencia de energía entre el suelo y la estructura. Para ello, se utilizan aisladores dispuestos en puntos específicos, los cuales modifican la frecuencia natural de la edificación, con el fin de que no sea igual a la del sismo evitando así el fenómeno de resonancia. Usualmente se instalan en las fundaciones o entre el subterráneo y el primer piso, sin embargo, también pueden ser utilizados para aislar un piso superior.

Para que este sistema sea eficaz, debe cumplir con las siguientes condiciones:

- Soportar la carga de la estructura de la misma forma en que lo haría un apoyo estructural convencional, como por ejemplo las columnas de hormigón armado.
- Otorgar la flexibilidad necesaria en el sentido horizontal que permita alcanzar el valor de frecuencia natural que se ha definido para la aislación de la edificación.
- Ser capaz de retornar a su posición original, aun cuando el sismo haya sido muy fuerte.
- Disipar una cantidad de energía adecuada que permita controlar los movimientos y así disminuir los daños en elementos estructurales.

Este sistema se recomienda para estructuras de baja altura o rígidas y en ningún caso, para estructuras construidas sobre suelo blando.

Debido a que los aisladores generan un desplazamiento horizontal relativo, éste debe ser considerado en el diseño de elementos que estarán en contacto tanto con el suelo como con la estructura aislada. Son ejemplos las cañerías de agua y gas, ya que su desplazamiento puede ser entre 40 y 60 centímetros (Corporación de Desarrollo tecnológico [CDT], 2012).

Capítulo 2. Marco Teórico

Dentro de estos sistemas, se pueden encontrar dos grandes grupos: los aisladores elastoméricos y los aisladores deslizantes.

A) Aisladores elastoméricos

Estos aisladores se fabrican principalmente con dos materiales que son láminas planas de elastómeros y capas de acero. Las láminas pueden ser de sección circular o cuadrada y son vulcanizadas a las capas de acero, lo cual le da al aislador la flexibilidad lateral, que es esencial para que se produzca un desplazamiento horizontal relativo entre el suelo y la estructura.

El elastómero le otorga la capacidad de recentrado, de esta forma, luego de un sismo el aislador retornará a su posición original y en consecuencia lo hará la estructura.

Dentro de los aisladores elastoméricos, es posible encontrar los aisladores elastoméricos con núcleo de plomo, los aisladores elastoméricos de bajo amortiguamiento y los aisladores elastoméricos de alto amortiguamiento.

Los aisladores elastoméricos con núcleo de plomo o LRB (lead rubber bearing), además de estar formados por láminas de elastómeros y capas de acero, tienen en el centro un núcleo de plomo que disipa la energía en forma de calor al deformarse plásticamente debido a los esfuerzos de corte, lo que aumenta el nivel de amortiguamiento del sistema entre un 25-30% (CDT, 2012).

Los aisladores elastoméricos de bajo amortiguamiento, también conocidos como LDRB (low damping rubber bearing) son los aisladores más simples y más fáciles de fabricar. Generan un bajo nivel de amortiguamiento, entre un 2 y un 5% (CDT, 2012). Debido a esto, se recomienda utilizarlo junto a otra protección sísmica como por ejemplo los disipadores de energía.

Finalmente, los aisladores elastoméricos de alto amortiguamiento o HDRB (high damping rubber bearing), son aisladores con una capacidad de amortiguamiento entre un 10 y 15% (CDT, 2012). Lo anterior se logra adicionando a las láminas de elastómeros elementos tales como carbón, aceites y resinas.

Capítulo 2. Marco Teórico

B) Aisladores deslizantes

Este tipo de aisladores disipan la energía del sismo por medio de fuerzas de roce generadas entre una superficie de acero, que usualmente es inoxidable y una placa de acero revestida con politetrafluoroetileno.

El nivel de energía que disipa depende del coeficiente de roce, cuyo valor presenta variaciones frente a factores como temperatura, presión de contacto, rugosidad de las superficies y envejecimiento del aislador. En consecuencia, estos dispositivos requieren de mantenciones para asegurar que existe un coeficiente de roce adecuado.

Esta clasificación se puede dividir en apoyos deslizantes planos y péndulos friccionales. Los primeros son los más simples y consisten en dos superficies, una unida a la fundación y otra a la estructura, que tienen un bajo coeficiente de roce entre sí para permitir los desplazamientos laterales durante el sismo. No es autocentrante, por lo cual debe estar acompañado de un sistema restitutivo como un aislador elastomérico.

Los péndulos friccionales o FPS (friction pendulum system) son aisladores deslizantes con una superficie de deslizamiento cóncava, mientras que el deslizador es un elemento articulado. Tienen la particularidad de ser autocentrantes, es decir, regresan la estructura a su posición original, gracias a la geometría del dispositivo y a la fuerza de gravedad.

2.1.3.2. Sistemas pasivos de disipación de energía

Los disipadores tienen como objetivo principal disipar la energía que adquiere la estructura por fenómenos tales como los sismos e incluso para ráfagas fuertes de viento, mejorando el comportamiento de la estructura. A diferencia de los aisladores, los disipadores no generan una separación entre el suelo y la estructura para evitar que se transfiera el movimiento a esta última.

Estos sistemas se pueden clasificar según su forma de activación, existiendo disipadores activados por desplazamientos, por velocidades, por una combinación de los dos anteriores o por movimiento.

Capítulo 2. Marco Teórico

A) Disipadores activados por desplazamientos

Como su nombre lo indica, este disipador funciona cuando existe un desplazamiento relativo entre sus extremos, el cual es generado por el sismo.

La disipación de energía en estos dispositivos se puede lograr a través de fricción entre superficies, o bien, con la deformación plástica de los elementos del disipador.

Dentro de esta clasificación es posible encontrar disipadores histeréticos y disipadores friccionales.

Los disipadores histeréticos son fabricados con metales, los cuales disipan la energía por la fluencia del material, causada por los esfuerzos presentes en el disipador. Estos esfuerzos se producen por el movimiento de la estructura durante el sismo y pueden ser de torsión, flexión, corte o una combinación de ellos.

Los disipadores friccionales, por otra parte, disipan la energía a través de la fricción que se genera entre superficies que están en contacto. Estos disipadores tienen diversas formas, como por ejemplo las conexiones deslizantes con orificios ovalados. Su principal desventaja es que se diseña pensando en que debe superar un nivel de carga determinado para activarse, por ende, si el sismo produce una carga inferior, este dispositivo no actuará.

B) Disipadores activados por velocidad

Estos dispositivos se activan cuando entre los extremos del dispositivo existe una velocidad relativa.

Dentro de esta clasificación están los dispositivos fluido-viscosos y los muros viscosos. En los primeros, para disipar la energía se utiliza un fluido con alta viscosidad, el cual es forzado a circular a través del dispositivo, el cual tiene valores determinados de longitud, inclinación y diámetro, que son calculados para controlar el paso del fluido.

En cuanto a los muros viscosos, estos disipadores están formados por una placa externa que corresponde al muro, en cuyo interior almacena un fluido de alta viscosidad, en el cual, se mueve

Capítulo 2. Marco Teórico

una segunda placa. El movimiento de esta placa interna en el medio viscoso es lo que disipa la energía del sismo.

C) Disipadores activados por desplazamiento y velocidad

Estos disipadores se activan cuando el dispositivo detecta entre sus extremos una combinación de desplazamiento y velocidad relativas.

Dentro de esta categoría se tienen los dispositivos viscoelásticos sólidos, que corresponde a una estructura tipo sándwich con dos placas de acero exteriores y un material viscoelástico en el centro que disipará energía al deformarse. Esta deformación es originada por el desplazamiento relativo entre las capas de acero, el cual, a su vez, es generado por el sismo.

D) Dispositivos activados por movimiento

Estos dispositivos están relacionados con las fuerzas inerciales y entre ellos, se encuentran los amortiguadores de masa sintonizada (AMS).

Los AMS usualmente se instalan sobre apoyos elásticos en el techo de la estructura y son una masa de concreto, en cuyo interior puede tener bolones de acero. Este amortiguador acopla su frecuencia natural a la del edificio, existiendo así una fuerza que se opone al movimiento, reduciendo los desplazamientos de la estructura.

En la figura 2.1 se muestra un esquema resumen de las principales protecciones sísmicas explicadas en este documento.

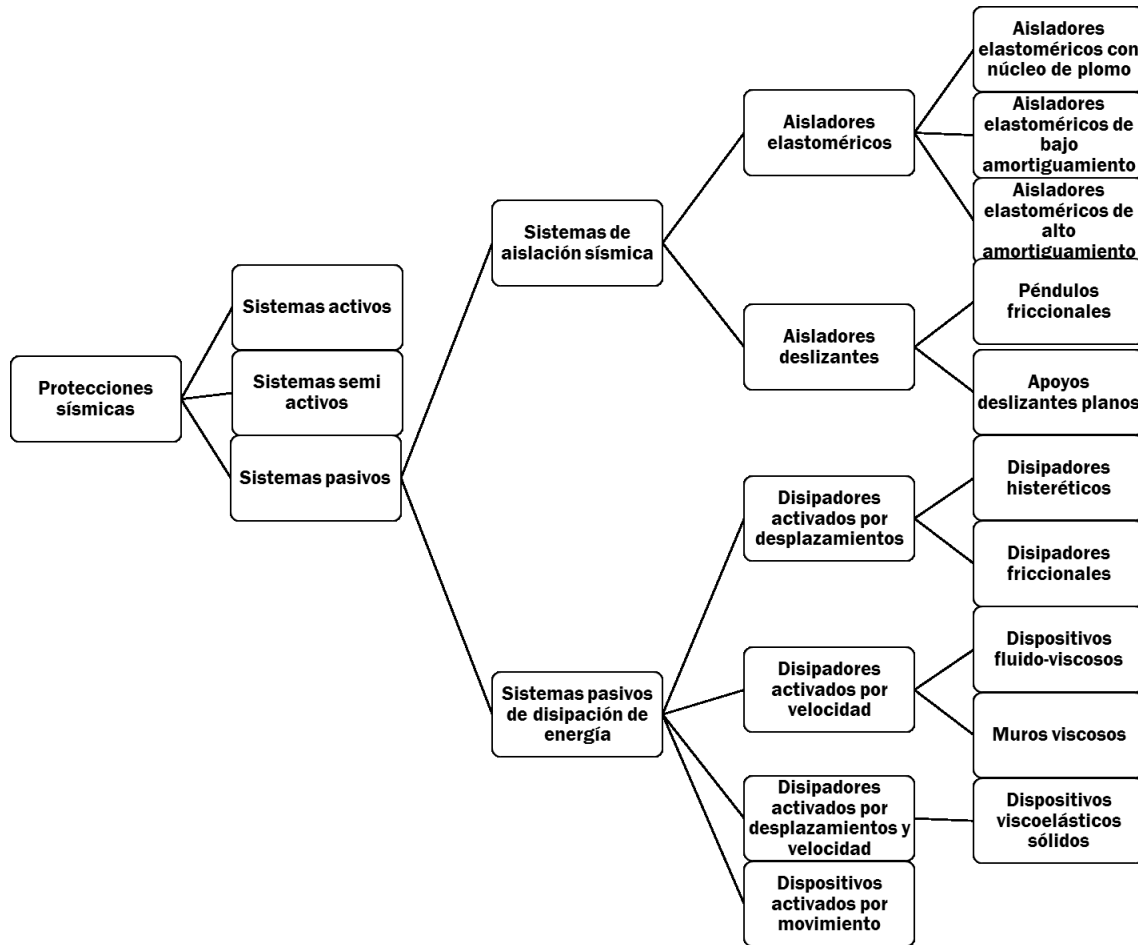


Figura 2.1: Principales protecciones sísmicas. Fuente: Elaboración Propia.

2.2. DISIPADORES HISTERÉTICOS

Este proyecto de memoria se enfoca en el desarrollo de un disipador de energía sísmica, que cumpla con los requerimientos de estructuras previamente calculados en otra investigación, que arrojó como resultados las curvas fuerza-desplazamiento que debiese tener el dispositivo, para que la rigidez del conjunto estructura-disipador sea adecuada para soportar las cargas sísmicas.

De los sistemas de protección sísmicas nombrados anteriormente, el que mejor se adapta a los datos recopilados es el disipador histerético, pues disipa la energía a través de la fluencia de los metales con los que está fabricado, actuando como un fusible, para que de esta forma la estructura principal mantenga su comportamiento en el rango elástico, al estar sometida a cargas sísmicas.

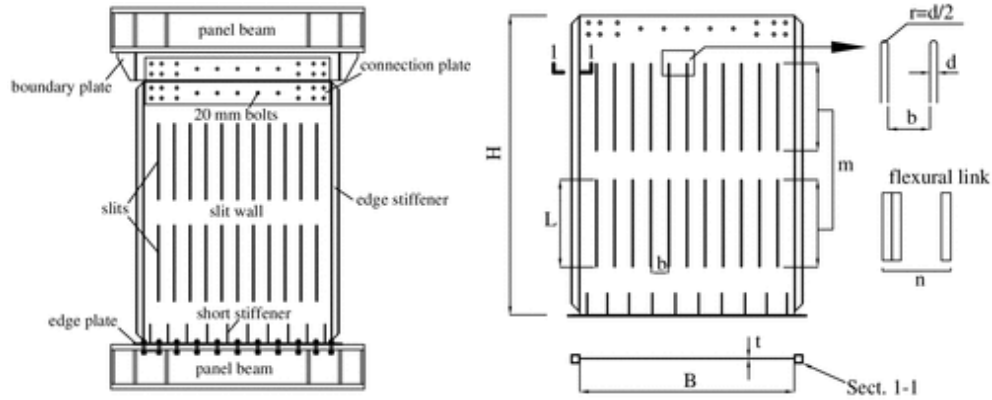


Figura 2.3: Disipador histerético Slit-Type Plate. Fuente: *Journal of Structural Engineering*, Vol 144, issue 1.



Figura 2.4: Disipador SSD. Fuente: Dimopoulos, 2012.

2.2.4. Disipador YSPD

El disipador YSPD (yielding shear panel device) consiste en perfiles de acero de sección cuadrada, con una lámina de acero soldada en su interior. Este dispositivo fue desarrollado por Chan, Albermani y Williams en el año 2007.

Como su nombre lo indica, este dispositivo estará sometido a esfuerzos de corte durante el sismo.

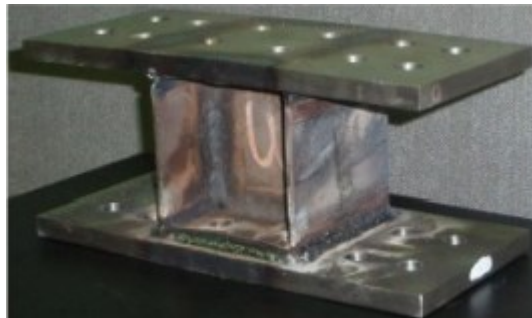


Figura 2.5: Disipador YSPD. Fuente: Nath, 2016.

2.2.5. Disipadores ADAS

El disipador ADAS (added damping and stiffness) está compuesto por varias chapas de acero en forma de X, las que se distribuyen en paralelo y se encuentran unidas tanto en la parte superior como en la inferior con un perfil auxiliar.

Este dispositivo es sometido a una deformación con doble curvatura, debido al movimiento relativo que existe entre la parte superior e inferior del disipador.

Usualmente el acero utilizado en la fabricación del disipador ADAS, es acero estructural A-36.

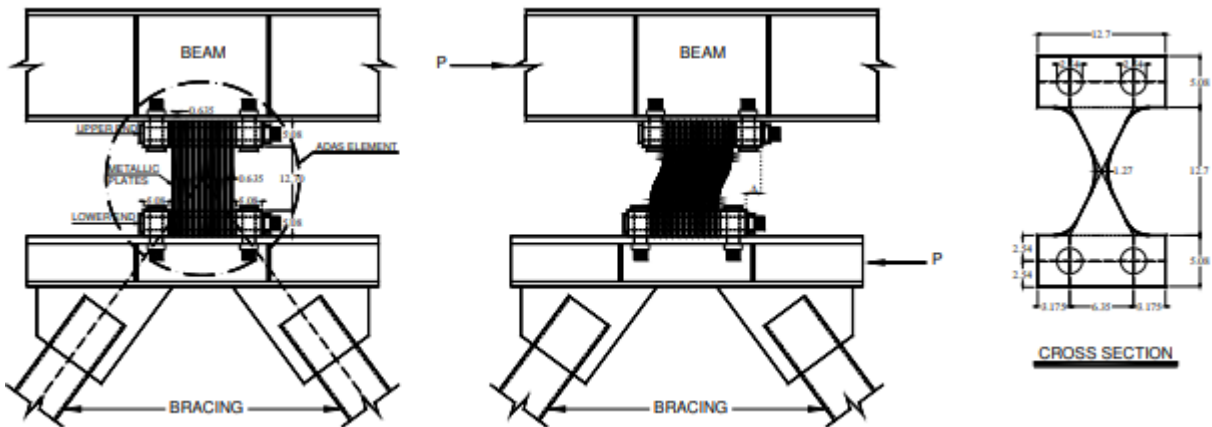


Figura 2.6: Comportamiento del disipador ADAS al estar sometido a cargas sísmicas. Fuente: Alehashem y otros, 2008.

2.2.6. Disipadores TADAS

El disipador triangular steel plate added dampin and stiffness, más conocido como Tadas, es una variación del dispositivo ADAS, desarrollado por Tsai, Chen, Hong y Su en el año 1993.

Su geometría es triangular y a diferencia del ADAS, que tiene sus dos extremos empotrados, el TADAS tiene un extremo soldado a una placa rígida, mientras que el otro extremo está libre, permitiendo los desplazamientos verticales. Su deformación es equivalente a la de una viga en voladizo, tal como se puede apreciar en la figura 2.7

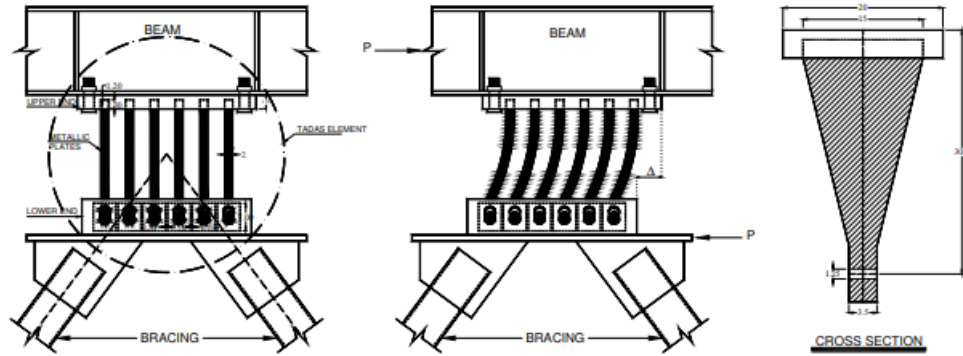


Figura 2.7: Comportamiento del disipador TADAS al estar sometido a cargas sísmicas.
Fuente: Alehashem y otros, 2008.

2.2.7. Disipador HADAS

El disipador HADAS (hourglass added damping and stiffness), es un disipador metálico, que como su nombre en inglés indica, tiene forma de reloj de arena. Este disipador fue diseñado como solución a la falla temprana que ocurre en el cuello de los disipadores ADAS, una vez que se han deformado lateralmente. De esta forma, en vez de hacer un disipador con varias placas en paralelo, se hizo un solo cuerpo sólido, tal como se muestra a continuación:



Figura 2.8: Disipador HADAS. Fuente: Basu & Reddy, 2016.

2.2.8. Disipador WPD

El WPD (web plastifying damper), es un dispositivo fabricado a partir de segmentos de perfiles doble T, los cuales son sometidos a flexión.

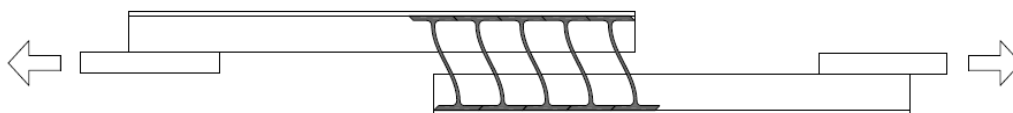


Figura 2.9: Disipador WPD. Fuente: Morillas, 2013.

2.2.9. Disipador Honeycomb

Este disipador fue desarrollado por la empresa japonesa Kajima Corporation. Su geometría se caracteriza por tener espacios vacíos entre sus elementos, permitiendo así una deformación prácticamente uniforme en ellos.



Figura 2.10: Disipador Honeycomb. Fuente: Somarriba, 2012.

2.2.10. Disipador AMD

El disipador metálico de acordeón, más conocido como AMD (accordion metallic damper), es un dispositivo fabricado con tubos corrugados de pared delgada, los cuales, en sus extremos son unidos con soldadura a un par de placas más rígidas que el tubo. Este disipador fue propuesto por Motamedi y Nateghi-A.

Según la forma del tubo utilizado en su fabricación, es posible encontrar tres tipos de disipador AMD: S, C y U.

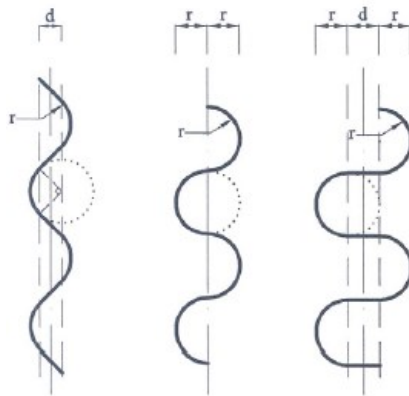


Figura 2.11: Forma de los tubos corrugados. De izquierda a derecha se muestran S, C y U respectivamente. Fuente: Motamedi & Nateghi-A, 2018.

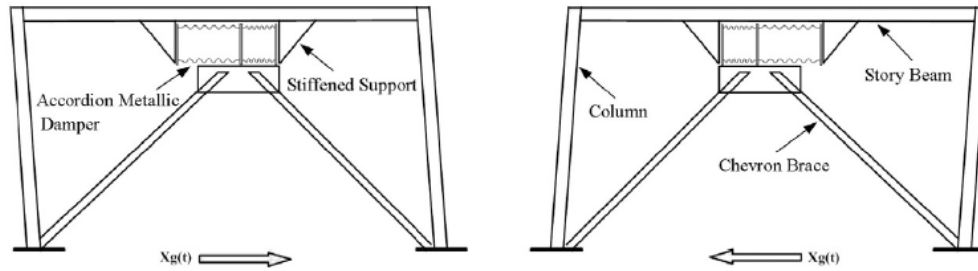


Figura 2.12: Comportamiento de un sistema disipador compuesto por dos AMD. Fuente: Motamedi & Nateghi-A, 2018.

2.2.11. Disipador SAFYD

El disipador SAFYD (shear and flexural yielding damping) es una combinación de disipadores ya existentes. Tiene dos placas que están sometidas a flexión, que son del tipo ADAS y una tercera, ubicada perpendicularmente a las otras dos, que estará sometida a esfuerzos de corte. De esta forma se considera el disipador como dos resortes en serie, siendo la rigidez total del disipador, la suma de la rigidez de las placas en flexión más la rigidez de la placa sometida a corte.



Figura 2.13: Disipador SAFYD luego de un ensayo de falla. Fuente: Sahoo et al., 2015.

2.3. COMPORTAMIENTO ELASTOPLÁSTICO DE LOS MATERIALES

Un material presenta comportamiento elastoplástico, cuando es sometido a un esfuerzo mayor a su esfuerzo de fluencia. En consecuencia, las deformaciones presentes en el material no son recuperables totalmente, existiendo una deformación permanente. Tal como se puede apreciar en la figura 2.14, para un punto P dentro de la curva esfuerzo-deformación de un material, la

deformación está compuesta por la deformación elástica (ϵ^e), que es la deformación que es capaz de retornar a su estado original y la deformación plástica o permanente (ϵ^p).

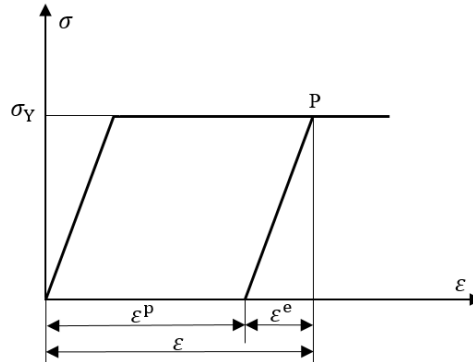


Figura 2.14: Comportamiento elastoplástico perfecto. Fuente: Gilbert & Hadzi-Janev, 2009.

Adicionalmente, en la figura 2.14 se tiene un comportamiento elastoplástico perfecto. Este corresponde al comportamiento ideal de un material, señalando que las deformaciones aumentarán de forma indefinida, con un esfuerzo constante igual al límite de fluencia.

Sin embargo, es posible encontrar los siguientes comportamientos idealizados:

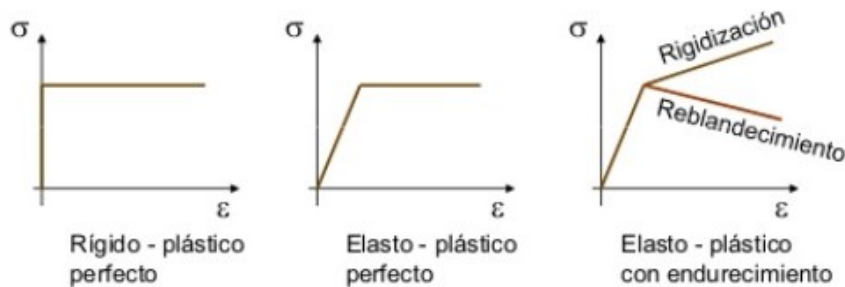


Figura 2.15: Comportamiento idealizado en plasticidad. Fuente: Gilbert & Hadzi-Janev, 2009.

En la figura 2.15, además del comportamiento elastoplástico perfecto explicado anteriormente, se puede observar un comportamiento rígido-plástico perfecto, que pertenecería a un material que no tuviese un rango elástico, es decir, al aplicarle una carga tendría de inmediato deformaciones plásticas. Finalmente, se tiene una curva que representa un comportamiento elastoplástico con rigidización, que significa que para que aumenten las deformaciones en el material debe aumentar el esfuerzo aplicado y una con reblandecimiento, que hace referencia a que una vez que se ha sobrepasado el límite de fluencia del material, las deformaciones aumentan, aplicando un esfuerzo menor al de fluencia.

2.4. CONSIDERACIONES EN EL DISEÑO DE UN DISIPADOR

La protección de la estructura consiste en mantenerla en un comportamiento elástico, para lo cual, se utilizan fusibles que son los disipadores histeréticos. De esta forma, el disipador debe tener una menor rigidez que la estructura, lo cual le permite ser el primer elemento en deformarse y alcanzar la fluencia, disipando así, la energía del sismo evitando el daño en los elementos estructurales.

En estructuras sismorresistentes, se utiliza el criterio de diseño de columna fuerte, viga débil. Cuando a esa estructura se le añaden disipadores, éstos generalmente son montados sobre diagonales, utilizando un soporte más rígido que el disipador

A pesar de que se requiere una rigidez inferior a la de la estructura para el disipador, si el dispositivo es muy flexible respecto a la rigidez de las diagonales que lo soportan, se generan esfuerzos de torsión que son traspasados a las columnas exteriores como deformaciones inelásticas, es decir se comienzan a dañar elementos estructurales, por lo que el disipador no cumple su función, concluyendo que una rigidez muy baja no es la mejor solución, debiéndose evaluar (Tena-Colunga & Nangullasmú-Hernández, 2015).

Además, cabe destacar que el ángulo de las diagonales soporte respecto del eje horizontal, influye en el comportamiento inelástico y que, en edificios de 20 y 25 pisos, los disipadores de los pisos superiores no alcanzan la fluencia, por lo cual se podría sugerir no instalar dispositivos en los pisos más altos disminuyendo los costos (Tena-Colunga & Nangullasmú-Hernández, 2015).

Finalmente, en la fabricación de los disipadores histeréticos se utilizan materiales como acero, aluminio y cobre. Cada uno de estos metales, tiene diferentes propiedades mecánicas, los cuales permitirían modificar la rigidez de un disipador, obteniendo diseños acordes a los requerimientos de la estructura.

2.5. METODOLOGÍA DE CÁLCULO DE DISIPADORES HISTERÉTICOS BASADA EN ENERGÍA

(Benavent-Climent, 2011) propone un balance de energía para una estructura ya existente, a través del cual, se puede determinar tanto la fuerza como la rigidez lateral y la capacidad de disipación de energía del dispositivo para un sismo determinado.

Para un edificio, el balance de energía se puede obtener a partir de la ecuación 1:

$$W_k + W_\xi + W_s = E \quad (1)$$

Donde: W_k = energía cinética
 W_ξ = energía de amortiguación
 W_s = energía absorbida, que es la suma de la energía elástica (W_{se}) y la energía plástica (W_p).
 E = energía de entrada, que puede escribirse en función de la velocidad equivalente del sismo.

La velocidad equivalente del sismo, nombrada anteriormente, se puede obtener a partir de espectros, que son gráficos que ilustran el comportamiento de una variable en función del período. Existen espectros de aceleración absoluta y espectros de velocidad.

Debido a que los sismos son diferentes y por ende, diseñar una estructura en base a un solo sismo sería un supuesto muy arriesgado, existen espectros de diseño que incluyen el efecto de varios sismos representativos de una zona. Estos espectros usualmente se obtienen a través de procedimientos estadísticos de los datos de sismos ocurridos anteriormente.

Además, para utilizar el método propuesto por Benavent-Climent, es necesario conocer la masa, el esfuerzo lateral de fluencia, la rigidez lateral de cada piso y el período fundamental de la estructura. Todos estos valores, se pueden estimar a través de fórmulas o mediante un análisis de un modelo de elementos finitos. Es importante conocer estos datos, pues a partir de ellos se determinarán la rigidez lateral, el esfuerzo lateral y la demanda de disipación de energía que

Capítulo 2. Marco Teórico

deben satisfacer los disipadores histeréticos, para que la estructura se comporte de forma elástica durante el sismo.

Conocidos los valores mencionados, se debe caracterizar el sismo que se utilizará para el diseño a través del espectro de velocidad, a partir del cual se obtendrá la demanda máxima que debe soportar el conjunto estructura disipador y el período predominante. Además, se deben estimar los parámetros sísmicos, que identifican las aceleraciones y las velocidades máximas, dependiendo de la distancia al epicentro.

Luego, se debe determinar el desplazamiento máximo de plastificación permitido entre los pisos, para asegurar un comportamiento elástico de la estructura.

Además, se deben determinar los coeficientes de corte tanto para los pisos como para los disipadores, el coeficiente de deformación plástica y el coeficiente de rigidez, a partir de fórmulas.

Finalmente, se debe elegir un valor para el coeficiente K_i , que es el cociente entre la rigidez lateral del disipador del piso i y la rigidez lateral del piso i , iterando el coeficiente de rigidez del disipador del piso 1. A partir de este coeficiente, se determinan los coeficientes de rigidez de los disipadores de los pisos siguientes, ya que el método propone una distribución de daño equitativa entre los disipadores.

A partir del coeficiente del piso 1, se determina el desplazamiento de cada piso y debiendo ser cercano al desplazamiento máximo permitido para ese nivel. Si en un piso, no es posible cumplir esta condición, se debe elegir un nuevo valor para K_i .

Una vez que se ha determinado un coeficiente de rigidez para el disipador del piso 1, que satisfaga lo anterior, se calculan los coeficientes de rigidez para los disipadores de los pisos siguientes y con ellos se puede obtener la rigidez y la fuerza lateral de los disipadores para cada piso.

Cabe destacar que el sistema compuesto por la estructura y los disipadores, se considera como un sistema formado por dos resortes en paralelo, por lo cual en cada piso se tendrá lo siguiente:

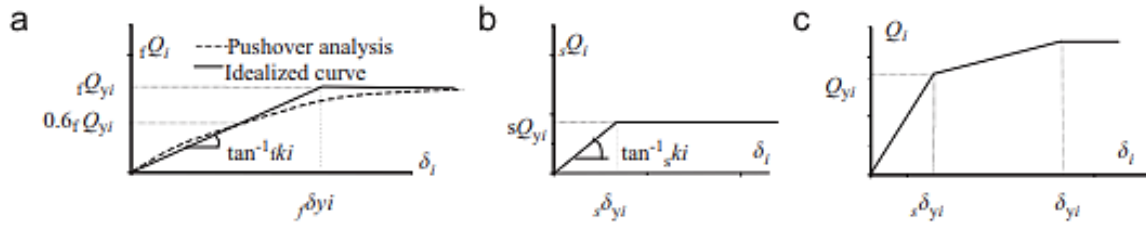


Figura 2.16: Curva carga lateral Q v/s desplazamiento δ_i . (a) estructura existente. (b) disipador de energía histerético. (c) conjunto estructura- disipador. Fuente: Benavent-Climent, 2011.

2.6. CURVAS FUERZA-DESPLAZAMIENTO QUE DEBE CUMPLIR EL DISIPADOR HISTERÉTICO

El cálculo de los disipadores requeridos por un pórtico de 5 plantas, que tiene 4 metros de altura en la planta baja y 3 metros en las siguientes, realizado por el profesor David Domínguez Santos, del departamento de Ingeniería y Gestión de la Construcción de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Talca, se realizó bajo las siguientes condiciones:

Tipo de suelo:	Suelo duro
Emplazamiento:	Ciudad de Lorca, España.
Magnitud de terremoto:	5,3 grados
Velocidad equivalente del terremoto:	1,7 [m/s]
Energía de entrada del terremoto:	1264375 [Nm]
Masa del pórtico:	875000 [kg]
Período del pórtico:	0,28"
Período sin disipador:	0,411"
Período del suelo (Tg):	0,3"
Relación entre rigidez edificio y disipador:	5

Con estos datos y utilizando el método de cálculo para disipadores histeréticos basado en energía propuesto por Amadeo Benavent Climent, el profesor Domínguez estimó los datos de los disipadores de cada planta que se resumen en la tabla a continuación:

Tabla 2.1 Datos de los disipadores calculados por el profesor David Domínguez

Plantas	Disipadores pórtico 5 plantas		
	Rigidez elástica: Ke (kN/cm)	Fuerza de fluencia: F _y (kN)	Post-f _y (Kp/Ke)
1	256,95	85,84	0,078
2	128,48	79,69	0,068
3	122,37	69,39	0,068
4	104,55	53,75	0,032
5	133,83	31,23	0,014

2.7. MÉTODO DE DOBLE INTEGRACIÓN

Es un método utilizado para determinar la pendiente y la deflexión de una viga en un determinado punto.

Para un material homogéneo y con comportamiento lineal-elástico sometido a flexión, se tiene la siguiente expresión:

$$\frac{1}{\rho} = \frac{M}{EI} \quad (2)$$

Donde: ρ = radio de curvatura en un punto específico de la curva elástica

M= momento interno de la viga en el punto que se quiere determinar ρ .

E= módulo de elasticidad del material

I= momento de inercia de la sección transversal, respecto del eje neutro.

A su vez, la curvatura se puede definir matemáticamente como:

$$\frac{1}{\rho} = \frac{d^2v/dx^2}{[1 + (dv/dx)^2]^{3/2}} \quad (3)$$

La expresión 3, permite definir de forma exacta la curva de una viga sometida a flexión pura, sin embargo, al ser una ecuación diferencial no lineal de segundo orden, es difícil encontrar una solución, por lo cual se utilizará la aproximación que se muestra en la ecuación 4:

$$\frac{1}{\rho} = \frac{d^2v}{dx^2} \quad (4)$$

Igualando las ecuaciones 2 y 4, se obtiene:

$$\frac{d^2v}{dx^2} = \frac{M}{EI} \quad (5)$$

Para obtener una solución de la expresión 5, es necesario integrar dos veces. De esta forma, luego de la primera integración, la función que se obtiene es la pendiente de la curva (θ), mientras que, de la segunda, se obtiene la deflexión (v) de la curva elástica de la viga. En cada una de estas integraciones se debe agregar una constante de integración, cuyo valor se determina a partir de las condiciones de borde y continuidad del problema, obteniendo así una solución única para cada caso.

Respecto a las condiciones de borde, las más comunes son que el desplazamiento en los apoyos es cero y que en extremos empotrados, tanto la pendiente como el desplazamiento son nulos.

Otro punto importante es asegurar la continuidad de la curva elástica, es decir si la curva está definida por funciones por tramos, en los extremos de los intervalos, tanto la función de la izquierda como la de la derecha deben tener el mismo valor al ser evaluadas en dicho punto.

2.8. SEGUNDO TEOREMA DE CASTIGLIANO

Para poder determinar los desplazamientos teóricos de un elemento sometido a esfuerzos de corte, el segundo teorema de Castigliano, establece la siguiente expresión:

$$\Delta = \int_0^L f_s V \left(\frac{\partial V}{\partial P} \right) \frac{dx}{GA} \quad (6)$$

Donde V es la fuerza cortante, P la carga aplicada en el punto del cual se quiere conocer el desplazamiento, G el módulo de corte del material, A el área de la sección transversal y f_s el factor de forma para cortante, que está dado por la siguiente expresión:

$$f_s = \frac{A}{I^2} \int_A \frac{Q^2}{t^2} dA \quad (7)$$

En la ecuación anterior, I es el momento de inercia de la sección transversal, t es el ancho de la sección transversal y Q está definido como:

$$Q = \bar{y}' A' \quad (8)$$

Siendo A' la porción superior o inferior de área transversal considerada desde la sección en que se mide t e \bar{y}' la distancia del centroide de A' al eje neutro.

2.9. SISTEMAS DE RESORTES EN SERIE Y PARALELO

Como se puede observar en las imágenes de los disipadores histeréticos existentes, estos usualmente son una unidad básica que se repite formando un sistema. De esta forma, para obtener una estimación de la rigidez total del sistema, se puede pensar que actúan como los sistemas de resortes dispuestos en serie o paralelo, según corresponda.

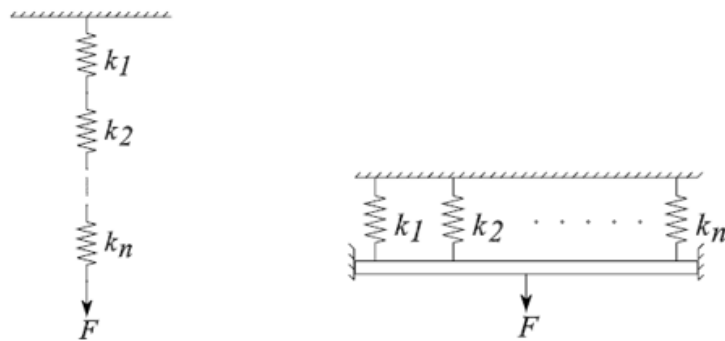


Figura 2.17: Sistemas de resortes. El de la izquierda corresponde al sistema en serie y el de la derecha al sistema en paralelo. Fuente: Rico, 2018.

En los sistemas de resortes en serie, la fuerza que actúa en el sistema es igual a la que está actuando sobre cada uno de ellos y, por lo tanto, la deformación de cada uno de ellos se puede escribir como:

$$\delta_n = F/k_n \quad (9)$$

Capítulo 2. Marco Teórico

Donde F es la fuerza del sistema, mientras que δ_n y k_n son la deformación y la rigidez del resorte n , respectivamente.

Luego la deformación total del sistema se puede escribir como:

$$\delta_T = F \sum_{i=1}^n \frac{1}{k_i} \quad (10)$$

Finalmente, la rigidez del sistema será:

$$k_{sist} = \frac{F}{\delta_T} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n 1/k_i} \quad (11)$$

Por otra parte, en los sistemas de resortes en paralelo, si la placa a la cual están unidos los resortes tiene restringida su rotación, la deformación de todos los resortes es la misma, por lo cual la fuerza que soporta cada uno de ellos se puede escribir como

$$F_n = \delta k_n \quad (12)$$

Donde δ es la deformación del sistema, mientras que F_n y k_n son la fuerza y la rigidez del resorte n , respectivamente.

Con lo anterior se puede determinar la fuerza total del sistema

$$F_T = \delta \sum_{i=1}^n k_i \quad (13)$$

Luego la rigidez total del sistema estará dada por:

$$k_{sist} = \frac{F_T}{\delta} = \sum_{i=1}^n k_i \quad (14)$$

CAPÍTULO 3. ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DE UNA GEOMETRÍA ADAS

3.1. SIMULACIÓN DE PLASTICIDAD EN ANSYS

Para la simulación del disipador, se utilizará el software Ansys, que permite simular el comportamiento de un elemento al exponerlo a cargas y condiciones de borde. Específicamente, se trabajará con el módulo Static Structural, donde se definirá un material con comportamiento no lineal, para de esta forma, poder obtener las deformaciones permanentes del elemento si existiesen. En este caso el material será acero estructural, con las siguientes propiedades:

- Módulo de Young (E): 200 GPa
- Esfuerzo de fluencia (σ_y): 250 MPa
- Módulo de corte (G): 76,923 GPa
- Coeficiente de Poisson (ν): 0,3
- Módulo tangente (zona plástica): 1,45 GPa

Las condiciones de borde a utilizar se determinaron a partir de revisión bibliográfica. Briones & de la Llera, 2014, realizaron la simulación computacional de un disipador del tipo HADAS, que luego validaron con un procedimiento experimental. Las condiciones que utilizaron en su estudio se muestran en la figura 3.1

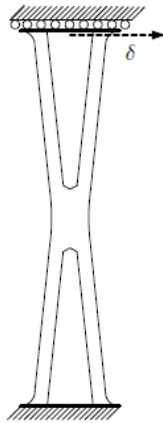


Figura 3.1: Condiciones de borde de la simulación computacional de un HADAS. Fuente: Briones y de la Llera, 2014.

Como se puede observar, la zona inferior del disipador está empotrada, estando todos sus desplazamientos y rotaciones bloqueadas, mientras que en el extremo superior, solo se tiene un bloqueo de desplazamiento en la dirección vertical, que le permite tener desplazamientos laterales.

Capítulo 3. Metodología para estimar parámetros y dimensiones del disipador

Para comprender el comportamiento de los disipadores, se eligió un disipador del tipo ADAS, el cual, está formado por dos placas rígidas y una placa central en forma de x. Sus dimensiones se muestran en la siguiente imagen:

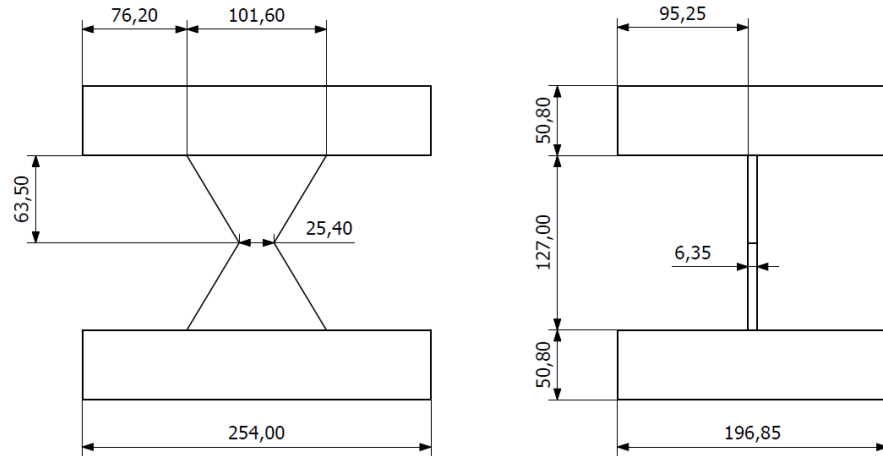


Figura 3.2: Dimensiones del disipador ADAS simulado. Fuente: Elaboración propia.

Cabe destacar, que las dimensiones a partir de las cuales se generó el modelo computacional se obtuvieron mediante revisión bibliográfica (Lopez & Bozzo, 2005).

Este disipador, fue modelado en 3D en el software Autodesk Inventor Professional, e importado al software Ansys en el formato step.

Respecto a la simulación, el material utilizado fue acero estructural no lineal, con la finalidad de obtener el comportamiento elastoplástico y las condiciones de borde utilizadas se muestran en la figura 3.1.

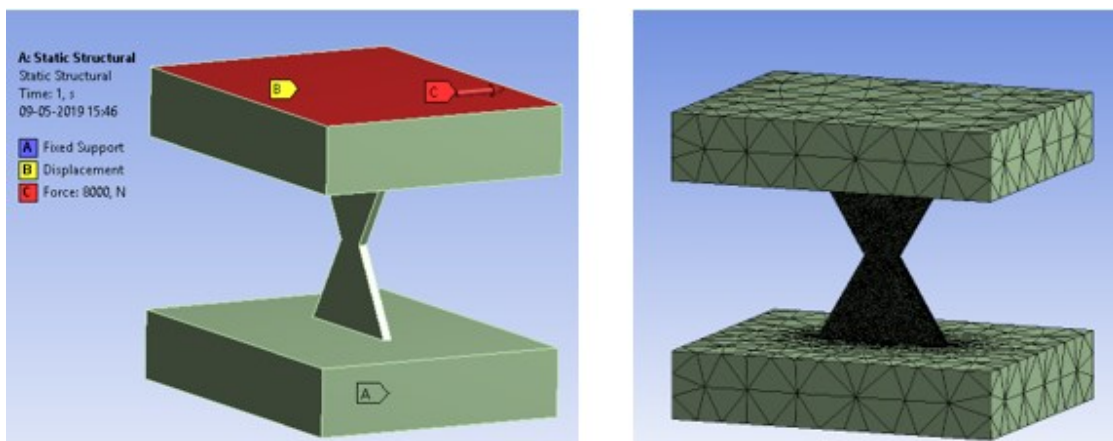


Figura 3.3: Condiciones de borde y malla utilizadas. Fuente: Ansys v19.1

Capítulo 3. Metodología para estimar parámetros y dimensiones del disipador

Como se puede observar en la figura, la malla se refinó en la placa central, pues esa es la zona del disipador que absorberá la energía del sismo al deformarse. Además, la simulación se realiza en dos tiempos, para así simular el comportamiento carga y descarga del elemento.

De los resultados que se obtienen en la simulación, interesa graficar la fuerza lateral aplicada asociada al desplazamiento lateral provocado en ambos tiempos, tal como se muestra en el gráfico 3.1.

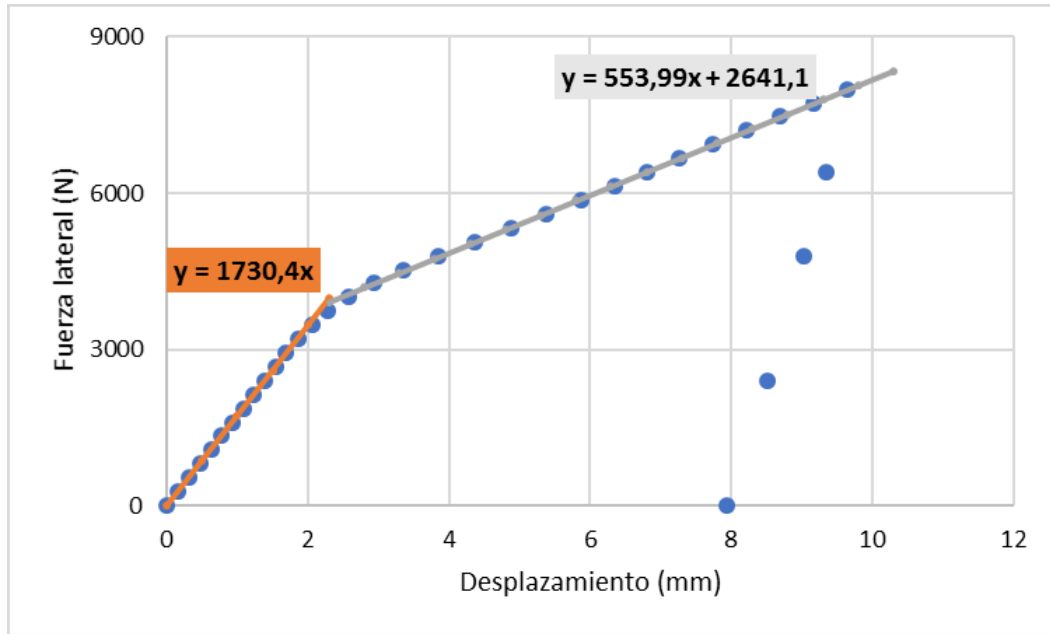


Gráfico 3.1: Curva fuerza-desplazamiento. Fuente: Elaboración propia.

La curva de puntos azules es el resultado de la simulación, pudiéndose aproximar en dos rectas. La recta naranja es la zona elástica, por lo tanto, la rigidez elástica del disipador es 1730,4 [N/mm], mientras que la recta gris es la zona plástica, siendo su rigidez de 553,99 [N/mm]. De esta forma la relación rigidez plástica sobre rigidez elástica (K_p/K_e) es 0,32.

Respecto a la fuerza de fluencia, que es la fuerza límite del elemento para que mantenga un comportamiento elástico, se obtendrá a partir del mismo gráfico y corresponderá al último punto de la zona elástica que mantenga un comportamiento lineal. Para esta simulación, la fuerza de fluencia corresponde a 3466,7 [N], tal como se muestra en el gráfico 3.2.

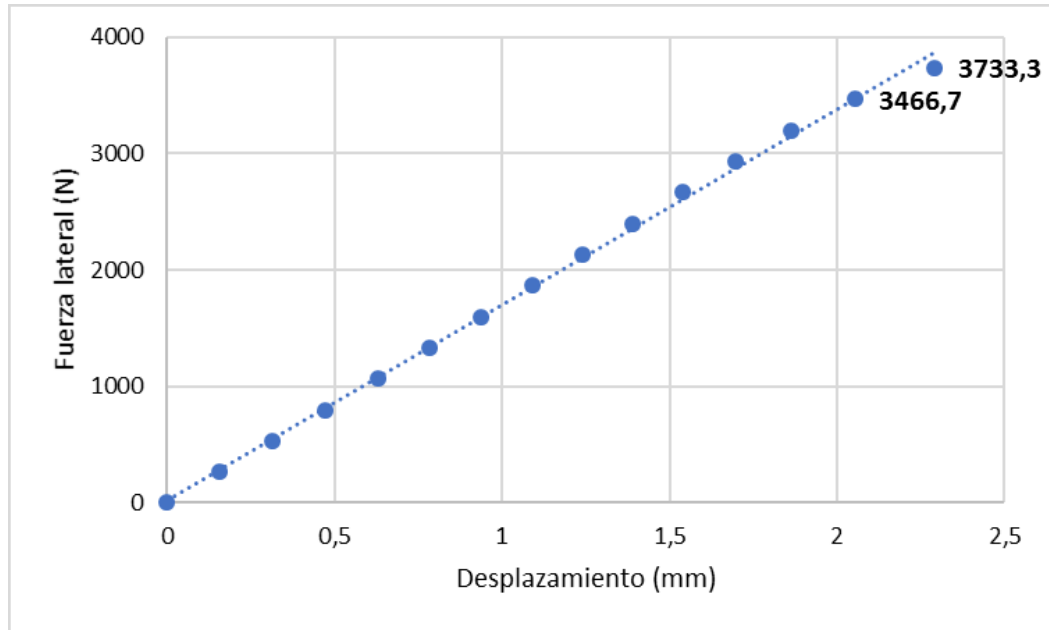


Gráfico 3.2: Fuerza de fluencia. Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, cabe destacar que en todas las simulaciones realizadas el software arrojó una advertencia que señalaba que al estar activos los grandes desplazamientos, la condición de bloqueo de desplazamiento podía haber sido invalidada. Esta advertencia no era aplicable en este caso, ya que en el software se verificó con los resultados de desplazamiento en el eje y (vertical), que en la cara superior donde se aplicó el bloqueo, eran cero, por lo tanto, el modelo si aplicó la condición de borde en cuestión, entregando de esta forma un resultado válido.

3.2. ESTIMACIÓN DE LA RIGIDEZ ELÁSTICA DE UN DISIPADOR CON INERCIA CONSTANTE

A partir de la curva elástica de la viga, es posible determinar la rigidez del disipador, ya que se conocerán los desplazamientos bajo las condiciones de borde y carga a las cuales está siendo sometida la geometría. Los resultados teóricos que se obtengan serán comparados con la rigidez calculada de los gráficos que entregue el software Ansys en las diferentes simulaciones.

Para este caso, se realizará el desarrollo con la geometría mostrada en la figura 3.4.

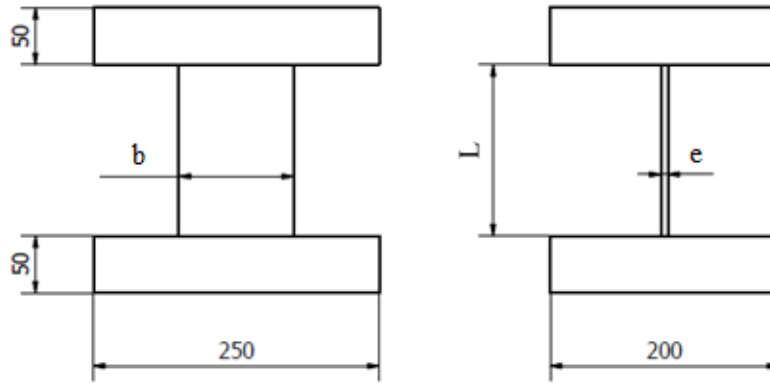


Figura 3.4: Dimensiones de la geometría en la que se estudiará la rigidez. Fuente: Elaboración propia.

Como se aprecia en la figura 3.4, en este análisis se variarán las dimensiones b , L y e , para así estudiar cómo se relacionan con la rigidez del dissipador, mientras que las placas superior e inferior se considerarán constantes y más rígidas que la placa central.

La rigidez que se busca determinar es la de la placa central, pues es el elemento que funciona como fusible durante el sismo. De esta forma, utilizando las mismas condiciones de borde de las simulaciones anteriormente mostradas, la placa central del dissipador puede considerarse como una viga con un extremo empotrado y con el otro extremo simplemente apoyado, que permite que exista un desplazamiento de ese extremo, tal como se muestra en la figura 3.5:

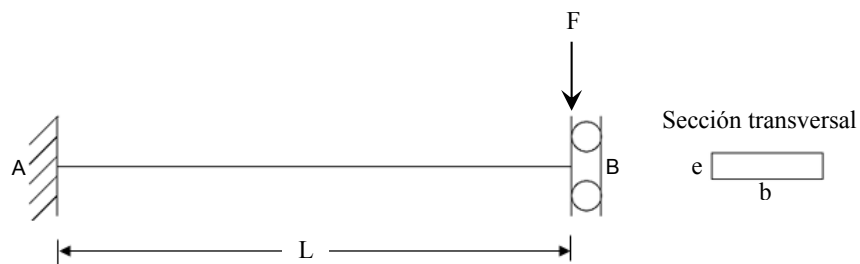


Figura 3.5: Condiciones de borde de la placa central. Fuente: Elaboración propia.

Además, se puede observar que la carga lateral se aplica en un extremo de la placa central, a pesar de que en las simulaciones se aplica en la cara de la placa superior. Este supuesto se puede hacer, pues en ese extremo existe un bloqueo de rotaciones y al ser más rígida la placa superior, se puede considerar que se desplaza hacia abajo sin mayores deformaciones, ejerciendo ese mismo valor de fuerza sobre la placa central, que es la que se quiere analizar.

Capítulo 3. Metodología para estimar parámetros y dimensiones del disipador

Al mismo tiempo, en la figura 3.5 se puede apreciar la sección transversal, cuyas medidas están designadas siguiendo la notación empleada en la figura 3.4.

El diagrama de cuerpo libre de la viga se muestra en la figura 3.6:

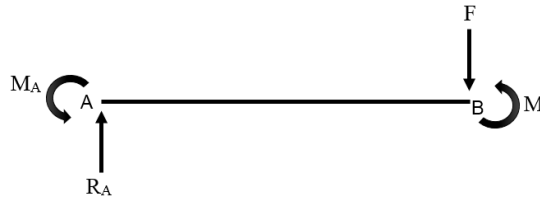


Figura 3.6: DCL de la geometría. Fuente: Elaboración propia.

Estableciendo las ecuaciones de equilibrio (sumatoria de fuerzas y momentos igual a cero), se obtienen las siguientes expresiones:

$$R_A = F \quad (15)$$

$$M_A = -M + FL \quad (16)$$

Al tener la condición de borde que bloquea las rotaciones, pero permite el desplazamiento de ese extremo, se espera una deflexión como la de la figura 3.7.

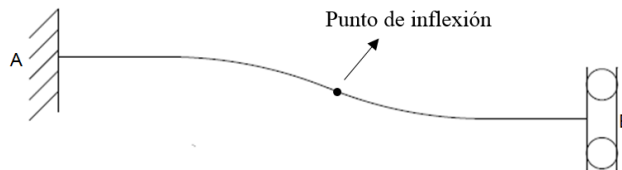


Figura 3.7: Deflexión esperada en la placa del disipador. Fuente: Elaboración propia.

Para determinar el momento interno de la viga, es necesario hacer un corte como se muestra en la figura 3.8.

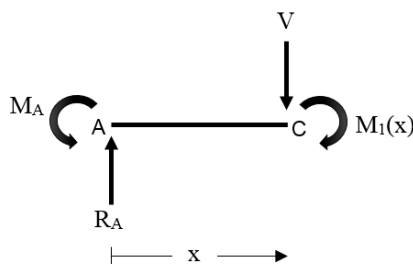


Figura 3.8: DCL para determinar el momento interno de la geometría. Fuente: Elaboración propia.

Capítulo 3. Metodología para estimar parámetros y dimensiones del disipador

Al realizar las ecuaciones de equilibrio, se obtiene el momento interno en función de x :

$$M_1(x) = -M + FL - Fx \quad (17)$$

Como se puede apreciar en la figura 3.7, entre el extremo A y el punto de inflexión, el momento interno es negativo, mientras que entre el punto de inflexión y el extremo B, el momento es positivo, por lo cual la expresión 8 es válida entre $0 \leq x \leq x_{inf}$. Para el tramo $x_{inf} \leq x \leq L$, la expresión del momento interno es:

$$M_2(x) = M - FL + Fx \quad (18)$$

En cuanto al punto de inflexión, su principal característica es que, en dicha posición el momento es nulo, por lo que la expresión que permite determinar este punto es:

$$x_{inf} = \frac{-M + FL}{F} \quad (19)$$

Luego se aplica el método de doble integración, obteniendo las constantes mediante las condiciones de borde y continuidad (véase anexo 1). El resultado final, es que el desplazamiento máximo ocurre en el punto de aplicación de la carga, y está dado por la función v_2 evaluada en $x=L$:

$$v_2(x = L) = -\frac{FL^3}{12EI} \quad (20)$$

Finalmente, la rigidez se puede estimar, al igual que en los gráficos, como fuerza sobre desplazamiento generado:

$$K = \frac{F}{v} \quad (21)$$

Luego la inercia de la sección transversal mostrada en la figura 3.5, al ser un rectángulo, está dada por:

$$I = \frac{be^3}{12} \quad (22)$$

Reemplazando las expresiones 20 y 22 en la 21, se obtiene la rigidez elástica de una placa con inercia constante:

$$K_{I\text{cte}} = \frac{Ebe^3}{L^3} \quad (23)$$

Donde E es el módulo de elasticidad propio del material, en este caso para acero estructural Ansys utiliza 200 [GPa].

Utilizando las expresiones que se desarrollaron en este documento y los valores anteriormente señalados, se construyó la tabla 3.1, que resume los valores de rigidez elástica que se espera de la geometría para determinadas dimensiones y los respectivos valores de rigidez calculados a partir del gráfico fuerza-desplazamiento obtenido de la simulación de cada una de las geometrías en Ansys.

*Tabla 3.1 Comparación de rigidez teórica y rigidez obtenida de simulación computacional.
Fuente: Elaboración propia.*

Geometría	b [mm]	L [mm]	e [mm]	K Ansys [N/mm]	Inercia (mm ⁴)	K teórico [N/mm]
1	100	150	6	1356,5	1800	1280
2	120	150	6	1638,1	2160	1536
3	140	150	6	1916,7	2520	1792
4	108	150	6	1477,2	1944	1382,4
5	100	160	6	1150,7	1800	1054,69
6	100	170	6	982,81	1800	879,3
7	100	180	6	837,67	1800	740,74
8	100	190	6	735,38	1800	629,83
9	100	150	7	2050,4	2858,33	2032,59
10	100	150	8	2982,2	4266,67	3034,07

Como se puede observar en los resultados, existe una pequeña variación entre la teoría y la simulación. Esto debido a que, en el desarrollo teórico, no se está considerando el esfuerzo de

corte ni el fenómeno de tracción al cual queda sometida la placa al empezar a ocurrir flexión. El esfuerzo de tracción es generado por el bloqueo de desplazamientos en el sentido vertical, debido a que mantiene constante la distancia entre las placas soporte.

3.3. ESTIMACIÓN DE LA RIGIDEZ ELÁSTICA DE UN DISIPADOR CON INERCIA VARIABLE

Para este caso, se mantienen las expresiones de momento interno y las condiciones tanto de borde como de continuidad, utilizadas para determinar la curva elástica de la geometría con inercia constante. En cuanto a la inercia, ésta seguirá siendo la de un área rectangular, sin embargo, la base de este rectángulo variará, tal como se muestra en la figura 3.9.

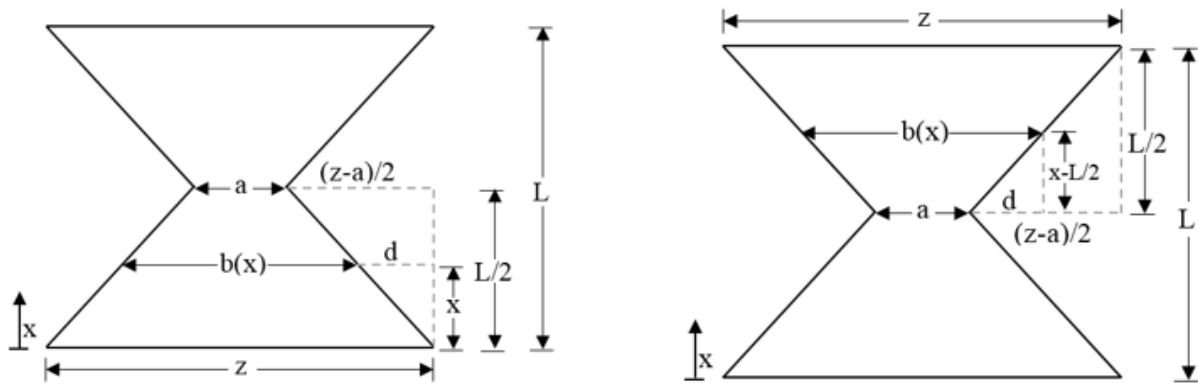


Figura 3.9: Variación de la base de la sección rectangular en función de x . La imagen de la izquierda es para el tramo $0 \leq x \leq L/2$ y la de la derecha para $L/2 \leq x \leq L$. Fuente: Elaboración propia.

Estableciendo relaciones con el Teorema de Tales, es posible encontrar para cada tramo una expresión para la base del rectángulo “ $b(x)$ ”, la cual al reemplazarla en la ecuación 22, permite obtener la inercia de la geometría en función de x . De esta forma para el tramo $0 \leq x \leq L/2$ se tiene:

$$I_1(x) = \left(z - \frac{2x(z-a)}{L} \right) \frac{e^3}{12} \quad (24)$$

Capítulo 3. Metodología para estimar parámetros y dimensiones del disipador

Para $L/2 \leq x \leq L$:

$$I_2(x) = \left(a + \frac{(2x - L)(z - a)}{L} \right) \frac{e^3}{12} \quad (25)$$

Luego, aplicando el método de integración para cada tramo, se despejan las constantes y finalmente se obtiene la ecuación de la curva elástica para el tramo $L/2 \leq x \leq L$ (véase anexo 2). Con ella se puede obtener el desplazamiento máximo, el cual ocurre en el extremo, es decir en $x=L$. De esta forma, se puede obtener la rigidez a través de la siguiente expresión:

$$K_{I\text{ var}} = \frac{2Ee^3(z - a)^3}{3L^3(3a^2 + z^2 - 4az + 2a^2[\ln(z/a)])} \quad (26)$$

Cabe destacar, que las expresiones de rigidez tanto para inercia constante como variable solo son válidas en la zona elástica.

De la expresión 26 se pueden obtener las siguientes conclusiones:

1. Si L aumenta, la rigidez elástica disminuye.
2. Si a aumenta, la rigidez elástica aumenta.
3. Si z aumenta, la rigidez elástica aumenta.
4. Si e aumenta, la rigidez elástica aumenta.

Al realizar simulaciones en Ansys, se pudo corroborar que la expresión 26 es válida cuando la relación e/L está entre 0 y 0,03. Esto quiere decir que cuando tiene mayor espesor, es necesario considerar el efecto del corte. Para esto, se aplicó el Teorema de Castigliano, para así determinar el desplazamiento asociado al corte en el extremo libre, obteniendo la siguiente expresión:

$$v_{\text{corte}} = \frac{6FL[\ln(z/a)]}{5Ge(z - a)} \quad (27)$$

Luego la rigidez elástica, considerando los desplazamientos en el extremo generados tanto por la flexión como por el corte, estará dada por:

$$K_{I\ var} = \frac{10GEe^3(z - a)^3}{12Ee^2L(z - a)^2[\ln(z/a)] + 15GL^3(3a^2 + z^2 - 4az + 2a^2[\ln(z/a)]]} \quad (28)$$

Luego de las simulaciones en Ansys, se determinó que la expresión 28 permite estimar la rigidez elástica de la geometría con errores inferiores al 10% respecto a lo obtenido con el software, cuando la relación e/L está entre 0,03 y 0,05.

Cuando e/L es mayor a 0,05, la placa al deformarse comienza a curvarse en torno al eje vertical, debido a que la zona central de la geometría es mucho más rígida que las demás zonas, como se puede apreciar en figura 3.10.

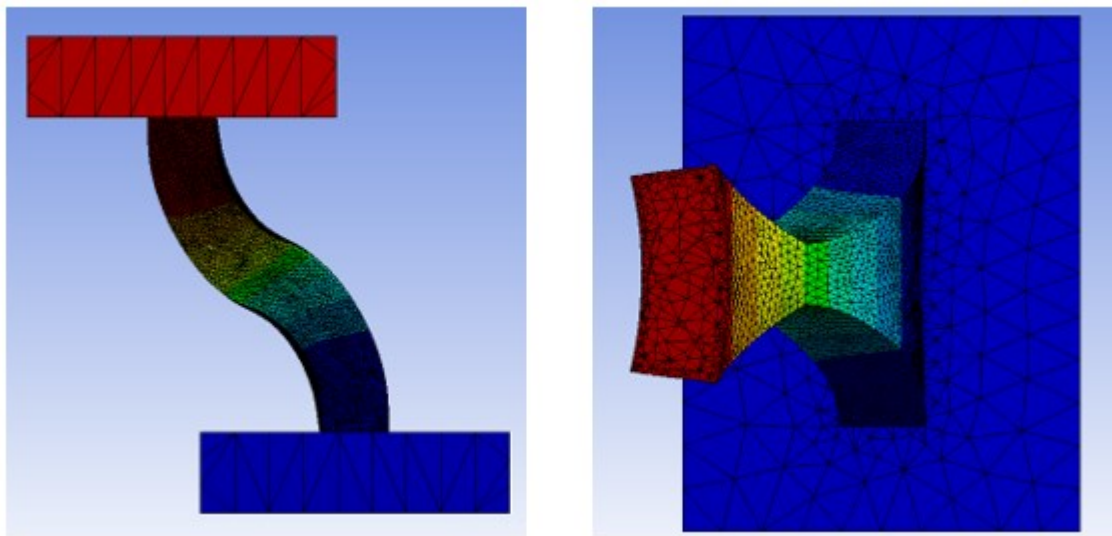


Figura 3.10: Deformación observada en geometrías con e/L mayor a 0,05. Fuente: Ansys v19.1

Describir de forma teórica esta deformación para estimar la rigidez elástica no es sencillo, por lo que se propone utilizar la ecuación de rigidez elástica de una sección con inercia constante, considerando el efecto del corte y para la base de la sección rectangular, utilizar un promedio de las dimensiones a y z. Lo anterior, está expresado en la expresión 29.

$$K_{I\ cte} = \frac{5EGe^3(z + a)}{10GL^3 + 12ELE^2} \quad (29)$$

Capítulo 3. Metodología para estimar parámetros y dimensiones del disipador

A continuación, se muestra una tabla con los valores de rigidez elástica estimados con las expresiones aquí presentadas de algunas de las geometrías simuladas en Ansys y los respectivos errores de estos.

Tabla 3.2 Comparación de los errores de estimación de la rigidez de las tres expresiones planteadas. Fuente: Elaboración propia.

z (mm)	a (mm)	L (mm)	e (mm)	Rigidez elástica ansys (N/mm)	Rigidez elástica 1 (N/mm)	Error rigidez 1	Rigidez elástica 2 (N/mm)	Error rigidez 2	Rigidez elástica 3 (N/mm)	Error rigidez 3	e/L
150	30	100	6	3521	4928,84	39,98%	4845,55	37,62%	3844,81	9,20%	0,06
150	30	120	6	2232	2852,34	27,79%	2818,69	26,29%	2232,59	0,03%	0,05
150	30	180	4	252,32	250,41	0,76%	249,82	0,99%	197,23	21,83%	0,02
31	10	60	2,5	336,48	361,22	7,35%	358,61	6,58%	294,99	12,33%	0,04
150	20	200	5	346,54	343,83	0,78%	342,69	1,11%	265,11	23,50%	0,03
150	20	200	6	570,16	594,14	4,21%	591,31	3,71%	457,71	19,72%	0,03
70	15	220	23	9817,7	12256,03	24,84%	11658,84	18,75%	9392,29	4,33%	0,10
40	15	300	12	405,52	421,44	3,93%	418,74	3,26%	350,25	13,63%	0,04
40	15	300	60	37411	52680,41	40,82%	45366,74	21,27%	39118,06	4,56%	0,20
150	30	180	43	162707	311084,57	91,19%	244475,20	50,25%	208303,17	28,02%	0,24

En la tabla 3.2 se muestran los resultados de algunas de las geometrías analizadas, en la que se evidencia la validez de cada una de las expresiones en función de la relación e/L. Cabe destacar que para la rigidez 1 se utilizó la expresión 26, para la rigidez 2 la expresión 28 y finalmente para la 3 la expresión 29.

3.4. ESTIMACIÓN DE LA RELACIÓN POST FLUENCIA DEL DISIPADOR CON INERCIA VARIABLE

Se realizaron simulaciones para encontrar una expresión que permitiera predecir la rigidez post fluencia de las geometrías, sin embargo, sólo se pudo obtener una aproximación al mantener los parámetros z, a y L constantes y variar el espesor de la geometría, pues ahí, la relación rigidez plástica dividida en rigidez elástica se podía ajustar a una curva potencial, como se muestra en el gráfico 3.3.

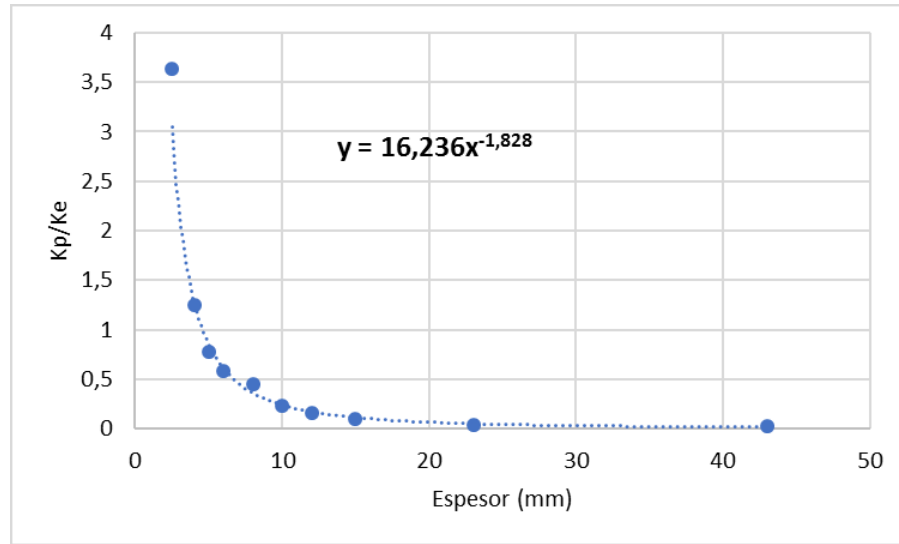


Gráfico 3.3: Relación K_p/K_e en función del espesor de la geometría $z=150$, $a=30$ y $L=180$.
Fuente: Elaboración propia.

Como se puede apreciar, la función que permite estimar la relación entre las rigideces plástica y elástica se puede escribir en términos generales como:

$$\frac{K_p}{K_e} = \alpha e^\beta \quad (30)$$

Donde “e” es el espesor de la geometría.

A partir de diversas simulaciones computacionales, se estimaron las curvas para seis geometrías, cuyos resultados se muestran en la tabla 3.3:

Tabla 3.3: Coeficientes α y β para cada geometría analizada. Fuente: Elaboración propia.

Geometría	Coeficiente alfa	Coeficiente beta	Dimensiones		
			z (mm)	a (mm)	L (mm)
150-30-180	16,236	-1,828	150	30	180
150-20-200	13,904	-1,8	150	20	200
70-15-220	21,413	-1,801	70	15	220
40-15-300	50,938	-1,848	40	15	300
46-10-80	1,4945	-1,325	46	10	80
31-10-60	0,7089	-1,174	31	10	60

3.5. ESTIMACIÓN DE LA FUERZA DE FLUENCIA DEL DISIPADOR CON INERCIA VARIABLE

La fluencia del disipador está dada principalmente por la flexión a la que está siendo sometido, sin embargo, también están presentes esfuerzos provocados por la fuerza de corte y la fuerza de tracción que genera la condición de borde que restringe los desplazamientos verticales del disipador. Es por esto, que no es sencillo encontrar una expresión teórica y al igual que para la relación post fluencia, se encontró una forma experimental para estimar la fuerza de fluencia para cada una de las geometrías estudiadas en función del espesor.

De esta forma, para una determinada geometría se tiene una curva como la del gráfico 3.4.

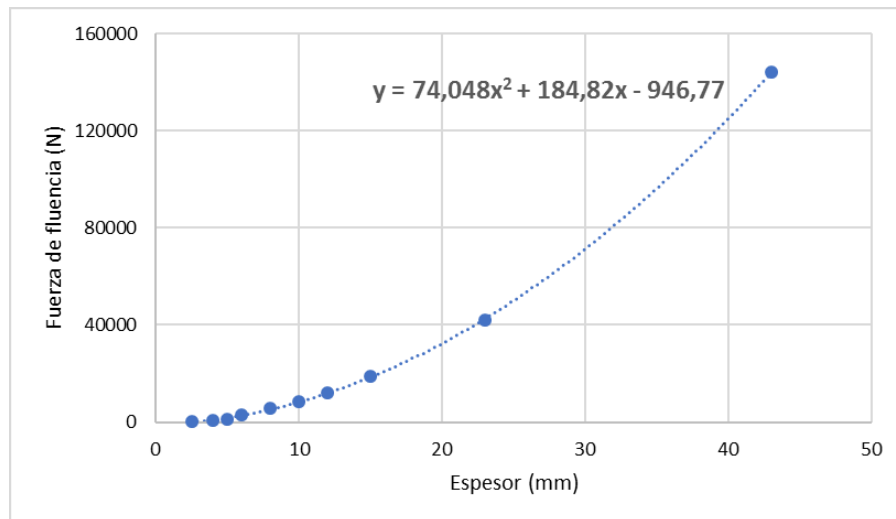


Gráfico 3.4: Fuerza de fluencia en función del espesor de la geometría $z=150$, $a=30$ y $L=180$.
Fuente: Elaboración propia.

Para cada una de las geometrías se confeccionó un gráfico, y se pudieron ajustar los puntos obtenidos de las simulaciones como una curva cuadrática. En su forma general, se puede escribir como:

$$F_y = \gamma e^2 + \theta e + \mu \quad (31)$$

Donde “ F_y ” es la fuerza de fluencia, “ e ” es el espesor de la geometría y γ , θ , μ son constantes a determinar para cada geometría a través de las simulaciones computacionales. Estas constantes se muestran en la tabla 3.4:

Capítulo 3. Metodología para estimar parámetros y dimensiones del disipador

Tabla 3.4: Coeficientes γ , θ y μ para cada geometría analizada. Fuente: Elaboración propia.

Geometría	γ	θ	μ	Dimensiones		
				z (mm)	a (mm)	L (mm)
150-30-180	74,048	184,82	-946,77	150	30	180
150-20-200	45,156	650,85	-3181,1	150	20	200
70-15-220	27,358	197	-1385,3	70	15	220
40-15-300	12,227	39,963	-382,72	40	15	300
46-10-80	-0,5465	1592,9	-7168,6	46	10	80
31-10-60	1,8409	1299,7	-5707,6	31	10	60

CAPÍTULO 4. METODOLOGÍA Y RESULTADOS

4.1. CÁLCULO DE LA DISPOSICIÓN DE LAS UNIDADES BÁSICAS EN SERIE Y PARALELO

Al considerar el sistema de disipadores que se está planteando como un sistema de resortes en serie y paralelo, se tiene la particularidad de que todos los elementos poseen la misma rigidez, por lo que las expresiones para calcular la rigidez total de un sistema de resortes se pueden reescribir. De esta forma, para un sistema de disipadores en serie se tiene:

$$k_{sist} = k_g / n_s \quad (32)$$

En cambio, para un sistema de disipadores en paralelo, la expresión es:

$$k_{sist} = n_p k_g \quad (33)$$

Para ambas expresiones k_{sist} es la rigidez del conjunto y k_g es la rigidez de la geometría que se está utilizando, mientras que n_s y n_p corresponden al número de unidades colocadas en serie y en paralelo respectivamente.

Si se revisa la tabla con los requerimientos del pórtico (tabla 2.1), además de cumplir con una determinada rigidez elástica en cada piso, el sistema de disipación de energía debe cumplir con una fuerza de fluencia específica. Haciendo la comparación con los sistemas de resortes, si el disipador estuviese compuesto por unidades en serie, la fuerza de fluencia de una unidad será igual a la del conjunto, mientras que, si están dispuestos en paralelo, la fuerza de fluencia del sistema será igual a la fuerza de fluencia de una unidad multiplicada por el número de unidades en paralelo.

A partir de lo anterior, para determinar el número de unidades en paralelo que debe tener el disipador se utilizará la siguiente expresión:

$$n_p = F_{yi} / F_{yg} \quad (34)$$

Capítulo 4. Metodología y resultados

Donde F_{yi} es la fuerza de fluencia requerida por la planta “i” y F_{yg} es la fuerza de fluencia de cada unidad.

Luego, para cumplir con la rigidez elástica de cada una de las plantas, se debe calcular cuantas unidades se dispondrán en serie, a través de la siguiente ecuación:

$$n_s = \frac{n_p k_g}{K_{ei}} \quad (35)$$

Donde K_{ei} corresponde a la rigidez elástica requerida para el sistema de disipación de la planta “i”.

Lo anterior se comprobó realizando la simulación de una configuración de ADAS en serie y una en paralelo, manteniendo las dimensiones de la figura 3.2, obteniendo los resultados que se muestran en la tabla 4.1.

Tabla 4.1: Resultados sistemas serie y paralelo. Fuente: Elaboración propia.

	Resultados de simulaciones en Ansys			Estimaciones con las expresiones de sistemas de resortes			
	ADAS (1 placa)	2 ADAS en serie	2 ADAS en paralelo	2 ADAS en serie	Error de la estimación	2 ADAS en paralelo	Error de la estimación
Rigidez elástica K_e [N/mm]	1730,400	862,320	3418,400	865,200	0,334%	3460,800	1,240%
Rigidez plástica K_p [N/mm]	553,990	276,660	1107,600	276,995	0,121%	1107,980	0,034%
Fuerza de fluencia [N]	3466,700	3466,700	6933,300				

Como se puede observar, los errores al estimar la rigidez tanto elástica como plástica a partir de la simulación de una sola placa utilizando las ecuaciones 32 y 33 son aceptables.

Además, se puede observar que, al ser las expresiones válidas para ambas rigideces, éstas aumentan o disminuyen, dependiendo de la configuración utilizada en la misma proporción, por lo que la rigidez K_p/K_e de una placa es la misma de un sistema formado por ella, independiente de si su distribución es en serie o paralelo.

Respecto a la fuerza de fluencia, se puede ver que un sistema en serie mantiene la fuerza de fluencia de sus elementos, sin embargo, en un sistema en paralelo, aumenta proporcionalmente al número de elementos, probando así que es válida la utilización de la expresión 34.

4.2. METODOLOGÍA PROPUESTA

Con todo lo anterior, el procedimiento para definir un sistema de disipación de energía sísmica conociendo los requerimientos de rigidez elástica, fuerza de fluencia y rigidez plástica dividida en rigidez elástica (K_p/K_e) para un piso de una estructura determinada es el siguiente:

- 1) Determinar el espesor para cada una de las 6 geometrías propuestas, que permite obtener la relación K_p/K_e para una planta del pórtico determinada, utilizando los coeficientes de las curvas expuestos en la tabla 3.3.
- 2) Simular las geometrías en Ansys y ajustar el espesor de cada una hasta obtener el K_p/K_e deseado.
- 3) Obtener a partir de los resultados de la simulación los valores de rigidez elástica, rigidez plástica y fuerza de fluencia de la geometría estudiada.
- 4) Calcular el número de placas que se deben colocar en paralelo y en serie utilizando las expresiones 34 y 35 respectivamente, para obtener la rigidez elástica y la fuerza de fluencia que requiere la planta.
- 5) Simular el disipador completo que se acerque más a los requerimientos para verificar su comportamiento estimado.

4.3. RESULTADOS PLANTA 1

Utilizando la metodología planteada anteriormente, se calcularon los espesores para cada geometría, sabiendo que la relación K_p/K_e para la planta 1 es de 0,078. Adicionalmente, se calculó la rigidez elástica teórica utilizando la expresión 29 y la fuerza de fluencia a partir de la expresión 31 para cada una de las geometrías estudiadas. En el caso de la rigidez elástica se utilizó la expresión 29, debido a que en todas las geometrías el coeficiente e/L era mayor a 0,05. Finalmente, con estos dos datos y sabiendo que el sistema de disipación debe tener una rigidez elástica de 25695 [N/mm] y una fuerza de fluencia de 85840 [N], se pudo determinar la cantidad

Capítulo 4. Metodología y resultados

de elementos que se debiesen colocar en serie y paralelo. Esta primera iteración se muestra en la tabla 4.2.

Tabla 4.2: Resultados de la primera iteración para la planta 1. Fuente: Elaboración propia.

Geometría	α	β	γ	θ	μ	e (mm)	F_y (N)	Ke teórico (N/mm)	np	ns
150-30-180	16,236	-1,828	74,048	184,82	-946,77	18,55	27951,6	19058,6	3,07	2,28
150-20-200	13,904	-1,8	45,156	650,85	-3181,1	17,81	22726,1	11708,21	3,78	1,72
70-15-220	21,413	-1,801	27,358	197	-1385,3	22,60	17033,4	8915,3	5,04	1,75
40-15-300	50,938	-1,848	12,227	39,963	-382,72	33,36	14558,7	7282,45	5,90	1,67
46-10-80	1,4945	-1,325	-0,5465	1592,9	-7168,6	9,29	7576,7	8405,88	11,33	3,71
31-10-60	0,7089	-1,174	1,8409	1299,7	-5707,6	6,55	2888,2	5149,38	29,72	5,96

La cantidad de elementos en paralelo (np) y en serie (ns) se calcularon utilizando las expresiones 34 y 35, en las cuales se reemplazaron la rigidez elástica y la fuerza de fluencia de cada geometría, además de la rigidez elástica y la fuerza de fluencia requerida por la planta 1.

Al observar los resultados de la tabla 4.2, se puede concluir que las geometrías “46-10-80” y “31-10-60” requieren de más elementos en serie y en paralelo, por lo que podrían descartarse.

El paso 2 de la metodología sugiere simular las geometrías calculadas en la primera iteración, ajustando el espesor hasta obtener el K_p/K_e requerido. El resultado final de este paso se muestra en la tabla 4.3.

Tabla 4.3: Espesores que cumplen el requerimiento K_p/K_e para la planta 1. Fuente: Elaboración propia.

Geometría	z (mm)	a (mm)	L (mm)	e (mm)	Ke Ansys (N/mm)	K_p Ansys (N/mm)	K_p/K_e	F_y Ansys (N)	np	ns
150-30-180	150	30	180	16,3	12760	991,43	0,07770	23333	3,68	1,83
150-20-200	150	20	200	16,9	10121	789,43	0,07800	21667	3,96	1,56
70-15-220	70	15	220	20,8	7496,3	587,89	0,07842	14667	5,85	1,71
40-15-300	40	15	300	27,8	4484,4	350,31	0,07812	11000	7,80	1,36

Como la cantidad de elementos en serie y en paralelo deben ser números enteros, éstos se aproximan y se calcula K_e y F_y esperados del sistema, en base a los resultados de la simulación de una placa.

Tabla 4.4: Sistemas de disipación para la planta 1. Fuente: Elaboración propia.

Geometría	np	ns	Estimaciones con resultados de simulación de una placa			Comparación con los requerimientos		
			Ke sistema	F _y sistema	Kp/Ke	Diferencia Ke	Diferencia F _y	Diferencia Kp/Ke
150-30-180	4	2	25520	93332	0,07770	-175	7492	-0,00030172
150-20-200	4	2	20242	86668	0,07800	-5453	828	-7,9044*10 ⁻⁷
70-15-220	6	2	22488,9	88002	0,07842	-3206,1	2162	0,00042402
40-15-300	8	2	17937,6	88000	0,07812	-7757,4	2160	0,00011747

Cabe destacar que la comparación con los requerimientos no es más que en valor que debería tener el requerimiento (Ke, F_y o Kp/Ke) para la planta específica con la cual se está trabajando, menos el valor que corresponde a la geometría calculada. Respecto a estos valores, se puede concluir que la geometría 40-15-300 tiene valores más lejanos de rigidez elástica y fuerza de fluencia que las demás geometrías, por lo que se puede descartar.

Finalmente, se simularon los sistemas de las tres primeras geometrías. Las condiciones de borde aplicadas al sistema se muestran en la figura 4.1 y los resultados de las simulaciones se exponen en la tabla 4.5.

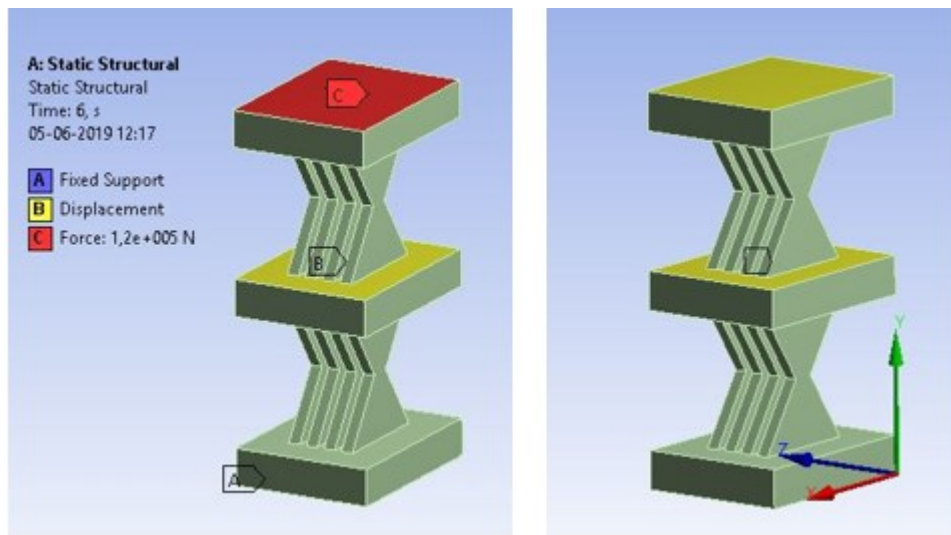


Figura 4.1: Condiciones de borde aplicadas en la simulación de un sistema de disipación de energía sísmica. Fuente: Ansys v19.1

Tabla 4.5: Resultados de las simulaciones de las geometrías seleccionadas para la planta 1.
Fuente: Elaboración propia.

Geometría	np	ns	Ke Ansys (N/mm)	Kp Ansys (N/mm)	F _y Ansys (N)	Kp/Ke
150-30-180	4	2	26309	2034,6	86000	0,07733475
150-20-200	4	2	20821	1567,9	84000	0,07530378
70-15-220	6	2	23127	1630,1	85333	0,07048471

En la figura 4.1, se puede apreciar que se mantiene el empotramiento de la cara inferior, al igual que en las simulaciones de las geometrías de una sola placa. Además, en las caras superiores de las placas rígidas se aplica el bloqueo de desplazamientos en el eje vertical y la fuerza se aplica sólo en la cara superior del sistema, que es la zona que estaría en contacto con la estructura del pórtico.

De la tabla 4.5, se puede concluir que la propuesta que mejor cumple con los requerimientos es el sistema formado por la geometría 150-30-180. Su modelo 3D y su curva fuerza-desplazamiento se presentan en la figura 4.2.

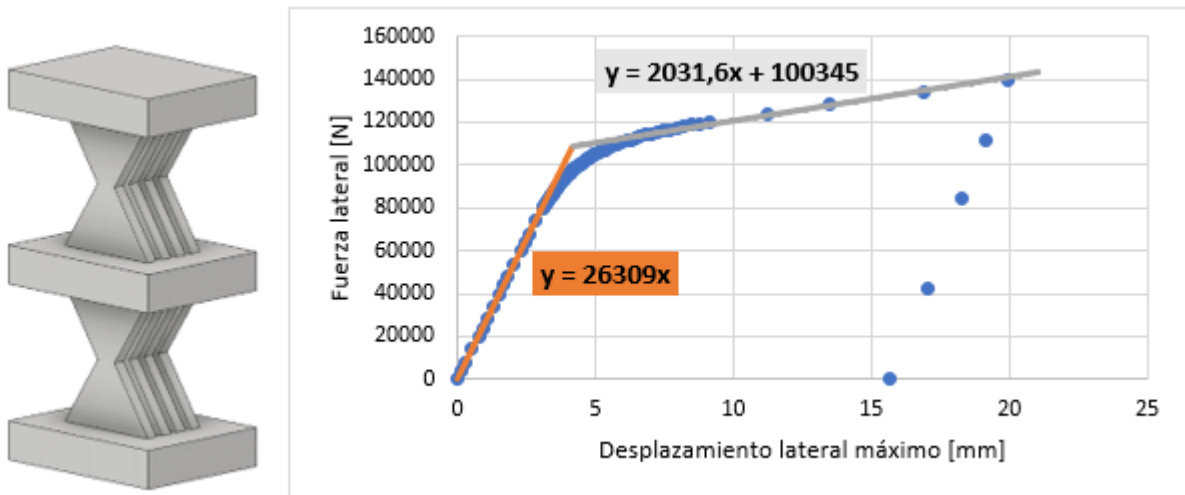


Figura 4.2: Sistema de disipación de energía sísmica de la planta 1. Fuente: Elaboración propia.

Las dimensiones del sistema de la figura 4.2 son $z=150$ [mm], $a=30$ [mm], $L=180$ [mm], $e=16,3$ [mm], la altura total del sistema=520 [mm] y las dimensiones de la base 254 [mm]x196 [mm] (la primera medida corresponde a la dimensión de la base en el mismo sentido de la dimensión z , mientras que la segunda, es la dimensión de la base en el mismo sentido del espesor).

4.4. RESULTADOS PLANTA 2

El procedimiento realizado fue el mismo que el de la planta 1. El disipador que mejor se adapta a los requerimientos se expone en la figura 4.3.

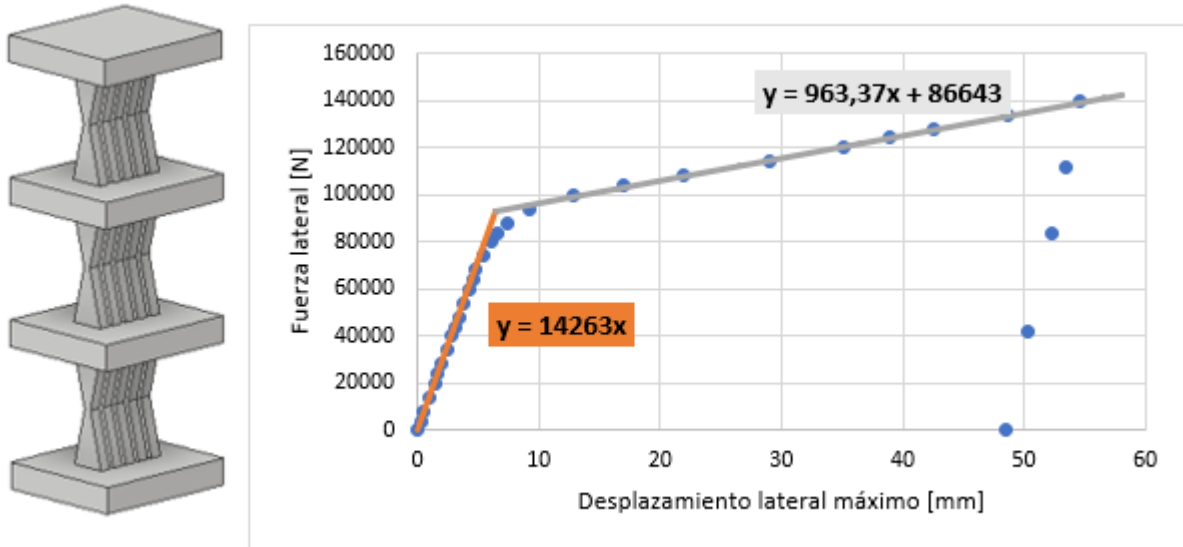


Figura 4.3: Sistema de disipación de energía sísmica de la planta 2. Fuente: Elaboración propia.

En cuanto a los parámetros de diseño, la rigidez elástica del sistema es 14263 [N/mm], la rigidez plástica es 963,37 [N/mm], $K_p/K_e=0,06754$ y la fuerza de fluencia es 77000 [N].

Además, las dimensiones del sistema de la figura 4.3 son $z=70$ [mm], $a=15$ [mm], $L=220$ [mm], $e=21,5$ [mm], la altura total del sistema=860 [mm] y las dimensiones de la base 254 [mm]x296 [mm].

4.5. RESULTADOS PLANTA 3

El sistema de disipación de energía sísmica para la planta 3, se muestra en la figura 4.4.

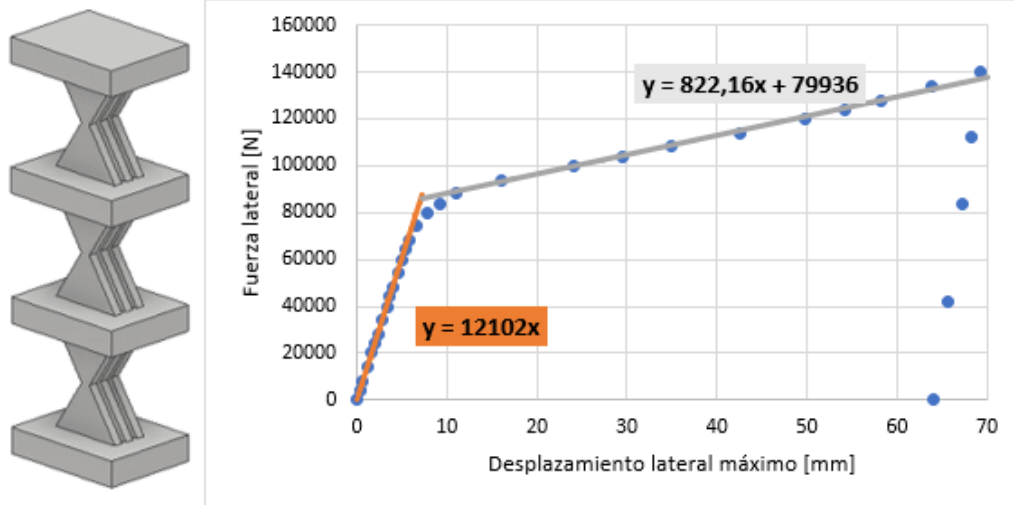


Figura 4.4: Sistema de disipación de energía sísmica de la planta 3. Fuente: Elaboración propia.

La rigidez elástica del sistema es 12102 [N/mm], la rigidez plástica es 822,16 [N/mm], $K_p/K_e=0,067936$ y la fuerza de fluencia es 68000 [N].

Las dimensiones del sistema de la figura 4.4 son $z=150$ [mm], $a=20$ [mm], $L=200$ [mm], $e=17,8$ [mm], la altura total del sistema=800 [mm] y las dimensiones de la base 254 [mm] x 196 [mm].

4.6. RESULTADOS PLANTA 4

El sistema de disipación de energía sísmica para la planta 4, se exhibe en la figura 4.5.

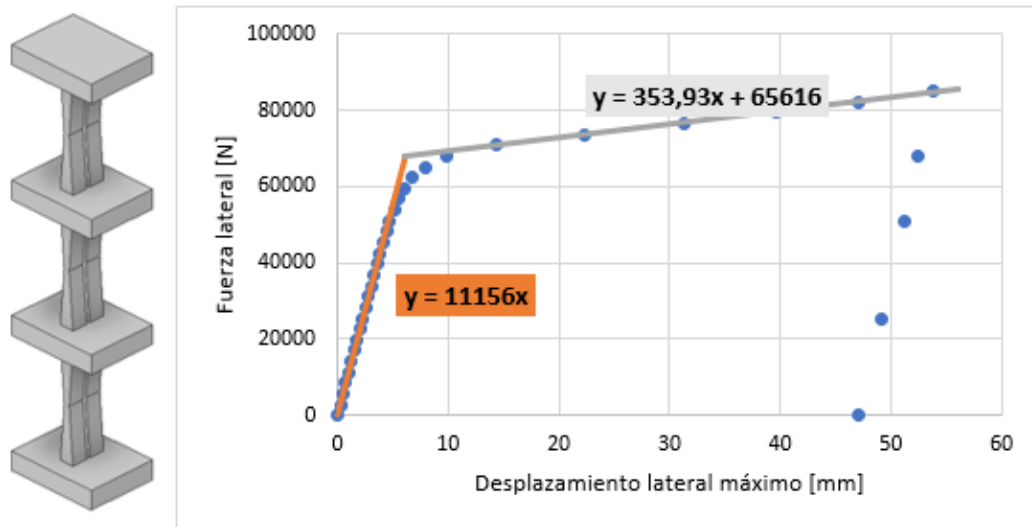


Figura 4.5: Sistema de disipación de energía sísmica de la planta 4. Fuente: Elaboración propia.

Capítulo 4. Metodología y resultados

La rigidez elástica del sistema es 11156 [N/mm], la rigidez plástica es 353,93 [N/mm], $K_p/K_e=0,03173$ y la fuerza de fluencia es 51000 [N].

Las dimensiones del sistema de la figura 4.5 son $z=40$ [mm], $a=15$ [mm], $L=300$ [mm], $e=44$ [mm], la altura total del sistema=1100 [mm] y las dimensiones de la base 254[mm] x 196 [mm].

4.7. RESULTADOS PLANTA 5

El sistema de disipación de energía sísmica para la planta 5, se expone en la figura 4.6.

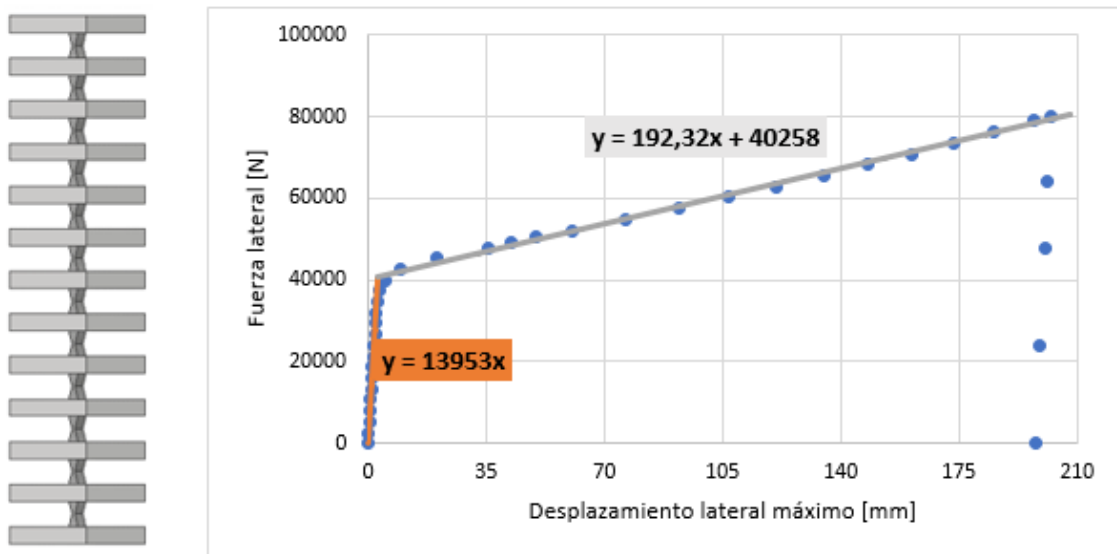


Figura 4.6: Sistema de disipación de energía sísmica de la planta 5. Fuente: Elaboración propia.

La rigidez elástica del sistema es 13953 [N/mm], la rigidez plástica es 192,32 [N/mm], $K_p/K_e=0,01378$ y la fuerza de fluencia es 29333 [N].

Las dimensiones del sistema de la figura 4.6 son $z=31$ [mm], $a=10$ [mm], $L=60$ [mm], $e=26$ [mm], la altura total del sistema=1240 [mm] y las dimensiones de la base 254 [mm]x196 [mm].

Los resultados de los diseños propuestos se resumen en la tabla 4.6.

Tabla 4.6: Resumen de los resultados obtenidos. Fuente: Elaboración propia.

planta	Requerimientos			Características del diseño propuesto									
	Ke [N/mm]	Kp/Ke	Fy [N]	z (mm)	a (mm)	L (mm)	e (mm)	np	ns	altura del sistema (mm)	Ke [N/mm]	Kp/Ke	Fy [N]
1	25695	0,078	85840	150	30	180	16,3	4	2	510	26309	0,07722	86000
2	12848	0,068	79690	70	15	220	21,5	5	3	860	14263	0,06754	77000
3	12237	0,068	69390	150	20	200	17,8	3	3	800	12102	0,06794	68000
4	10455	0,032	53750	40	15	300	44	2	3	1100	11156	0,03173	51000
5	13383	0,014	31230	31	10	60	26	1	12	1240	13953	0,01378	29333

Como se puede observar en la tabla 4.6, los diseños propuestos satisfacen los requerimientos de cada uno de los pisos del pórtico, sin embargo, se presentan dos problemáticas; la primera de ellas es que los requerimientos de los pisos no permiten utilizar una única geometría para los sistemas de disipación, lo cual, complejiza el proceso de diseño.

Mientras que la segunda problemática hace referencia a la altura de los sistemas de las plantas 4 y 5, la cual es bastante elevada si se compara con la altura total de los sistemas de las demás plantas.

La explicación a este hecho, es que la altura del sistema de disipación, está directamente relacionada con la cantidad de elementos en serie y la rigidez elástica que requiere el sistema; en los pisos superiores aumenta, pues se requieren valores de la relación Kp/Ke inferiores, los cuales es posible lograr con un aumento en el espesor de la geometría, el cual, a su vez, causa un crecimiento en la rigidez elástica de cada elemento y, para poder cumplir con el valor requerido, se deben disponer muchos elementos en serie. Esta dificultad, se podría solucionar buscando geometrías con menor rigidez o nuevas formas de distribuir los elementos en serie y paralelo.

**CAPÍTULO 5. ESTUDIO DE NUEVAS GEOMETRÍAS Y
CONFIGURACIONES**

5.1. NUEVAS GEOMETRÍAS

Como se pudo observar en los diseños propuestos en el capítulo anterior, en los pisos superiores se requiere una menor rigidez elástica y una relación rigidez plástica sobre rigidez elástica cada vez menor. En base a la geometría analizada, la única opción para lograr la relación antes mencionada era aumentar el espesor de la geometría, lo que a su vez causaba un aumento en la rigidez elástica y por ende, se debían colocar varios elementos en serie para poder disminuirla hasta el valor requerido, provocando sistemas de disipación de una altura considerable, tanto así, que en las plantas 4 y 5 el sistema mide poco más de un metro.

Debido a lo anterior, se estudió una nueva geometría, que se detalla en la figura 5.1.

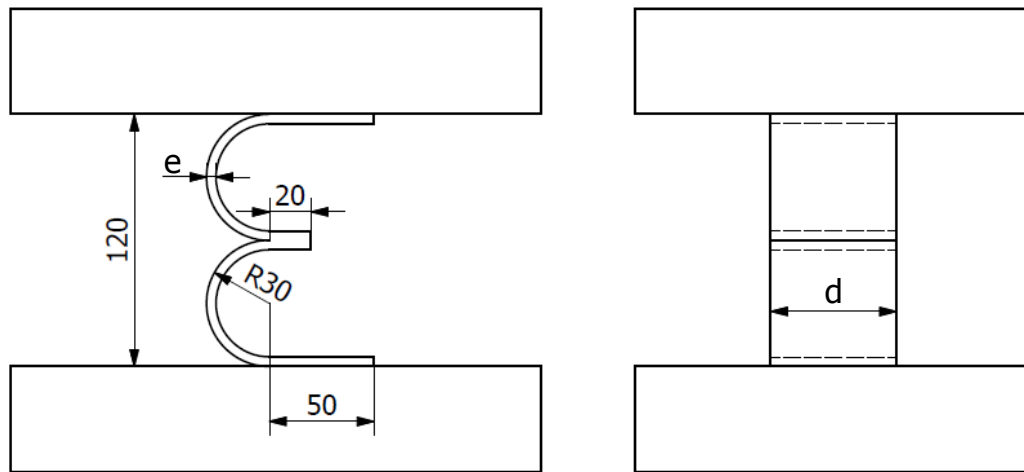


Figura 5.1: Geometría curva propuesta. Fuente: Elaboración propia.

Esta geometría se simuló utilizando $d=60$ mm y se fue modificando el espesor “e” hasta alcanzar los valores de K_p/K_e requeridos. Cabe destacar que, en esta ocasión, no fue posible realizar el ajuste de curva que se utilizó en la geometría ADAS, pues los valores presentaban mayor dispersión, como se puede observar en el gráfico 5.1.

No obstante, para esta geometría se sigue cumpliendo el hecho de que un aumento en el espesor está ligado a una disminución en el valor de rigidez plástica sobre rigidez elástica.

Capítulo 5: Estudio de nuevas geometrías y configuraciones

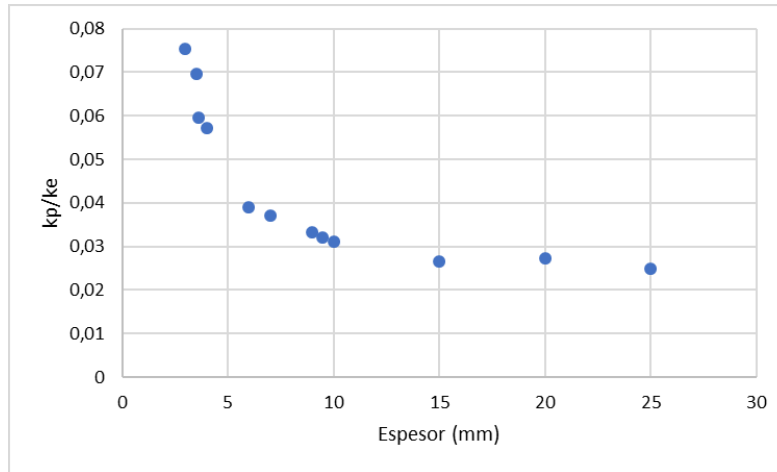


Gráfico 5.1: K_p/K_e versus espesor para la geometría curva propuesta. Fuente: Elaboración propia.

Algo interesante a destacar de esta geometría es que al variar la dimensión “d”, se produce un cambio en la rigidez y en la fuerza de fluencia, pero K_p/K_e presenta cambios mínimos. Esta característica, sería una ventaja frente a los disipadores ADAS, ya que se podría controlar de mejor forma el número de unidades en serie y en paralelo requeridos por el sistema.

Tabla 5.1: Variación de la dimensión “d” en geometría curva. Fuente: Elaboración propia.

Dimensión d (mm)	K_e [N/mm]	F_f [N]	K_p [N/mm]	K_p/K_e
60	188,25	733,33	13,124	0,0697158
100	316,44	1155,6	21,225	0,06707433

A través de simulaciones, se determinaron espesores para la geometría de la figura 5.1 que cumplieran con la relación K_p/K_e requerida por las plantas 2, 3 y 4, y se determinaron la cantidad de elementos en serie y en paralelo que debiese tener el sistema de disipación de energía, tal como se expone en la tabla 5.2.

Tabla 5.2: Estimaciones de los sistemas de disipación utilizando geometrías curvas. Fuente: Elaboración propia.

e (mm)	K_e [N/mm]	K_p [N/mm]	K_p/K_e	F_y [N]	n° de planta	n_p	n_s	K_e sistema [N/mm]	F_y sistema [N]
3,5	188,25	13,124	0,06972	733,33	2	108	2	10165,5	79199,64
3,5	188,25	13,124	0,06972	733,33	3	95	2	8941,875	69666,35
9,5	3885,7	124,73	0,03209	5488,9	4	10	4	9714,25	54889

Como se puede observar, los valores de la fuerza de fluencia del sistema son bastante cercanos a los requerimientos mostrados en la tabla 2.1, sin embargo, los valores estimados de rigidez

Capítulo 5: Estudio de nuevas geometrías y configuraciones

elástica están un poco más alejados de los requerimientos, en comparación a la rigidez elástica de los diseños propuestos en el capítulo 4. No obstante, los sistemas tendrían menor altura, pero requerirían de una mayor área basal.

El sistema con esta geometría, para la planta 4, se expone en la figura 5.2.

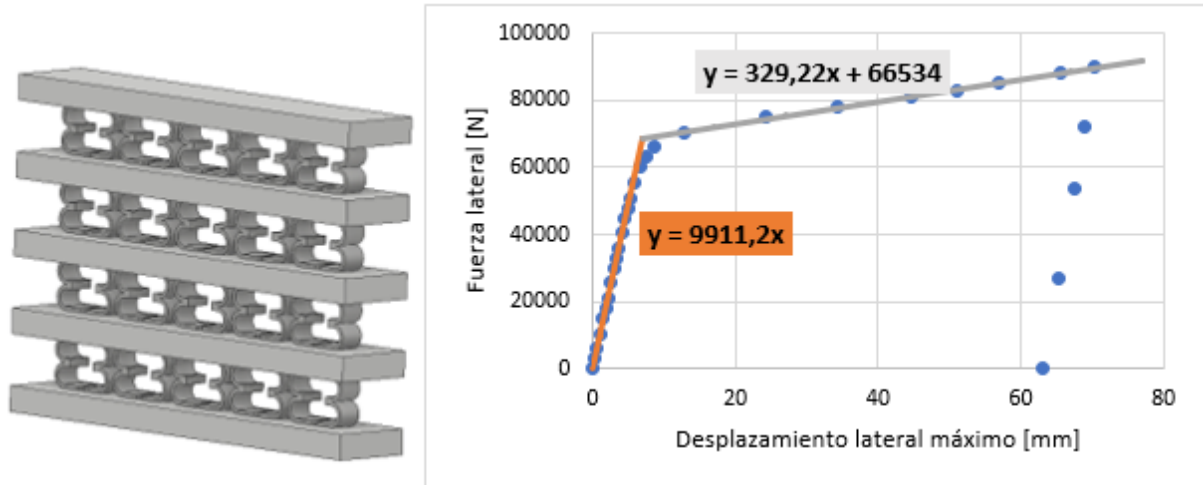


Figura 5.2: Sistema de disipación para la planta 4 con geometrías curvas. Fuente elaboración propia.

Con una rigidez elástica de 9911,2 [N/mm], una fuerza de fluencia de 51000 [N] y una relación $K_p/K_e = 0,0332$.

Respecto a las dimensiones, se mantuvieron las presentadas en la figura 5.1 con un $d=60$ mm y un $e=9,5$ mm, logrando un disipador de 780 mm de altura total y unas dimensiones de la base de 200 mm x 1080 mm.

Si se compara con el diseño propuesto anteriormente para la misma planta, este último requiere de una mayor área basal, pero de una menor altura. Esta misma situación se repite para las plantas 2 y 3, sin embargo, solo se estimaron numéricamente, dado que estos sistemas al estar formados por tantos elementos y con un espesor muy pequeño, requerían de una malla con muchos elementos, lo cual dificultaba su simulación.

Ahora bien, esta geometría no permite lograr una relación $K_p/K_e = 0,014$, ya que, al simularla con un espesor de 25 mm, se obtuvo $K_p/K_e = 0,02497$, con lo cual se deduce que requiere un mayor espesor para alcanzar el requerimiento de la planta 5. Esto no es factible, debido al radio

de la geometría, por lo que sería necesario variar las dimensiones o bien proponer una geometría distinta, como la que se muestra en la figura 5.3.

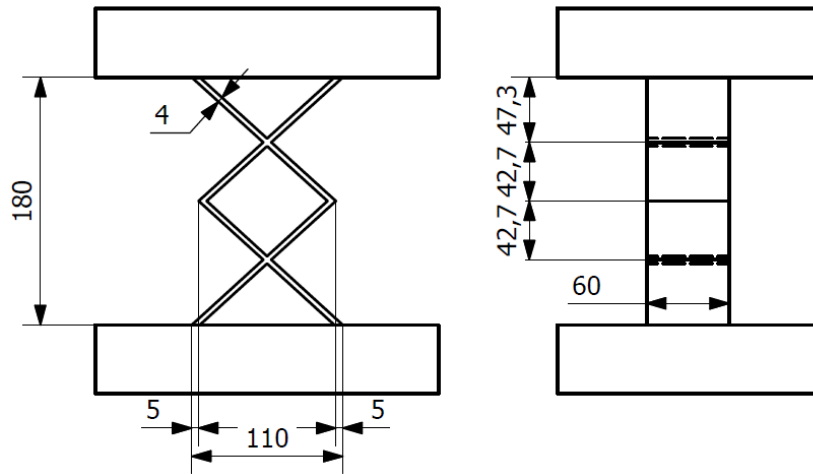


Figura 5.3: Nueva geometría propuesta. Fuente: Elaboración propia.

Con esta geometría se logró diseñar una nueva propuesta de sistema de disipación de energía sísmica para la planta 5. Su modelo computacional y su curva fuerza-desplazamiento se presentan en la figura 5.4.

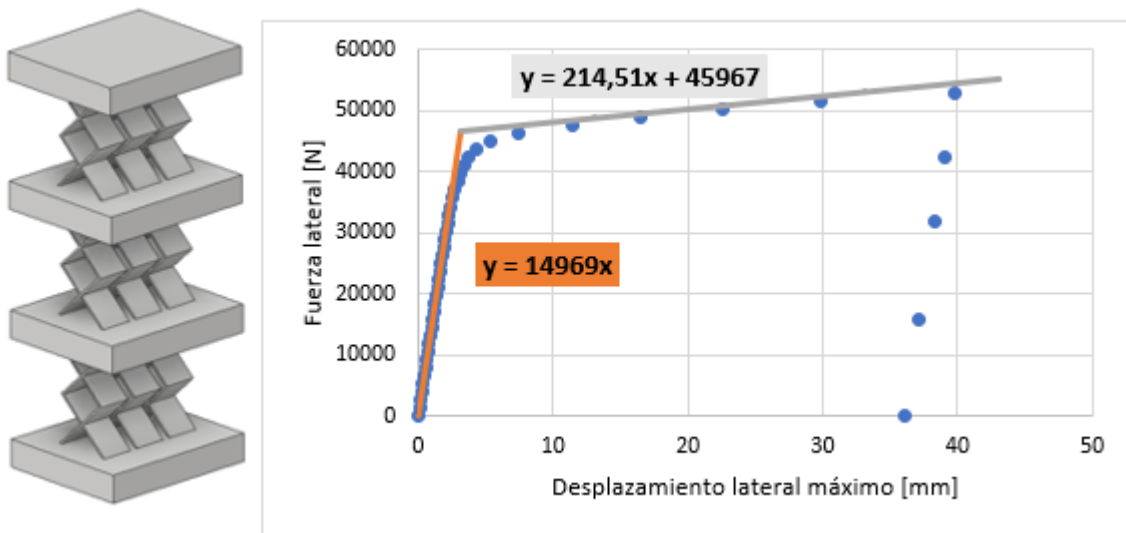


Figura 5.4: Nueva propuesta de sistema de disipación para la planta 5. Fuente: Elaboración propia.

Este sistema tiene una rigidez elástica de 14969 [N/mm], una fuerza de fluencia de 33000 [N] y $K_p/K_e = 0,01433$. En cuanto a las dimensiones, se mantuvieron las de la figura 5.3, logrando un

disipador de 740 mm de altura total y una base de 250 mm x 300 mm. Como se puede observar esta nueva propuesta tiene una menor altura que el sistema para esta misma planta descrito en el capítulo 4. Además su rigidez elástica es más cercana a los requerimientos.

5.2. NUEVA CONFIGURACIÓN

Al realizar el estudio de nuevas geometrías, se pudo observar que una disminución en la rigidez de la geometría permite obtener sistemas de menor altura, sin embargo, ésta se podría disminuir aún más si se propone una nueva configuración que permita tener elementos en serie que no estén dispuestos en forma vertical.

En la figura 5.5, se propone una nueva configuración para disponer elementos en serie y paralelo. Para este caso, se tiene un sistema de disipación de energía de la geometría ADAS, compuesto por 4 disipadores en paralelo y dos en serie.

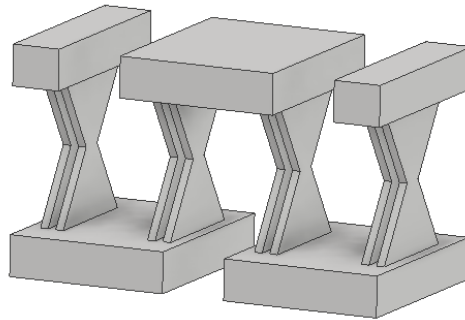


Figura 5.5: Nueva configuración de geometría ADAS $z=150$, $a=30$, $L=180$, $e=10$. Fuente: Elaboración propia.

Las condiciones de borde aplicadas durante la simulación se exponen en la figura 5.6.

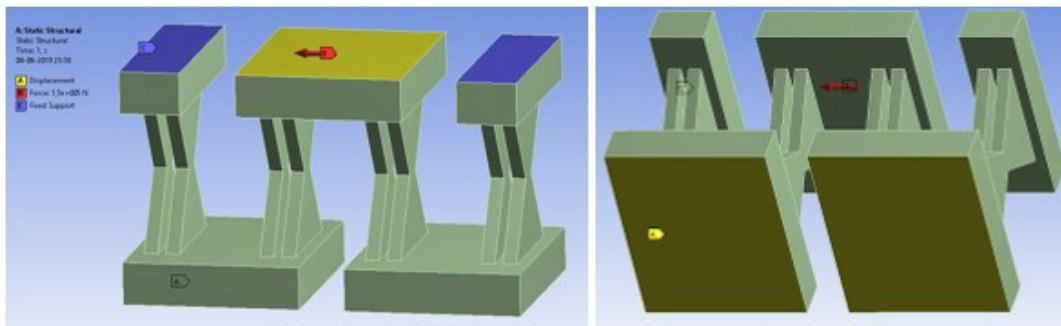


Figura 5.6: Condiciones de borde de la nueva configuración. Fuente: Ansys v19.1

Capítulo 5: Estudio de nuevas geometrías y configuraciones

Los desplazamientos de esta configuración se muestran en la figura 5.7.

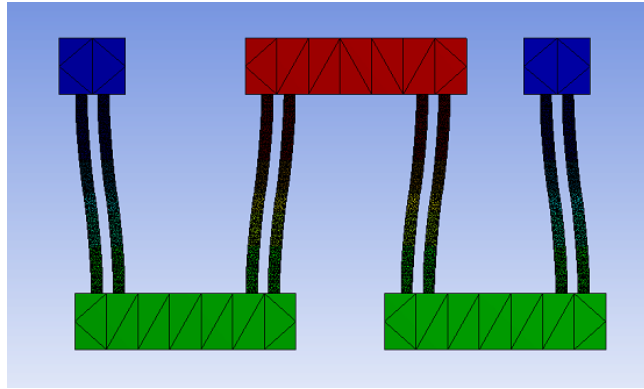


Figura 5.7: Desplazamientos de la nueva configuración. Fuente: Ansys v19.1

Los resultados de la simulación de este sistema son $K_e=6486,6$ [N/mm], $K_p=1512,6$ [N/mm] y $F_y=34667$ [N].

Al estar formado por una geometría que ya fue simulada durante este proyecto de memoria, se pudo establecer una comparación, la cual se expone en la tabla 5.3.

Tabla 5.3: Comparación entre la estimación del comportamiento a partir de la simulación de una placa y los resultados de la simulación del sistema completo. Fuente: Elaboración propia.

Parámetro	Resultados de la simulación de 1 placa de la geometría $z=150$, $a=30$, $L=180$, $e=10$	Estimación considerando 4 geometrías en paralelo y 2 en serie	Resultados de la simulación de la nueva configuración propuesta
K_e [N/mm]	3264,9	6529,8	6486,6
K_p [N/mm]	755,6	1511,2	1512,6
K_p/K_e	0,2314	0,2314	0,2332
F_y [N]	8500	34000	34667

De la tabla 5.3, se puede concluir que esta nueva configuración efectivamente se comporta como un sistema formado por 4 placas en paralelo y 2 en serie.

Para poder entender de mejor forma esta disposición de los disipadores, en la figura 5.8 se presenta una configuración equivalente a 2 elementos paralelos y 3 en serie, utilizando las mismas dimensiones de la geometría ADAS del sistema expuesto en la figura 5.5.

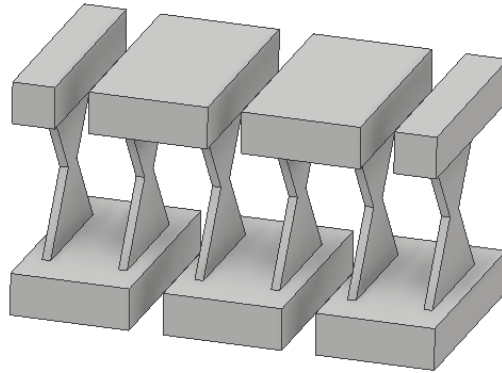


Figura 5.8: Configuración equivalente a 2 disipadores en paralelo y 3 en serie.

Al igual que en el sistema anterior, se puede establecer una comparación entre los resultados de la simulación de una sola placa, la estimación utilizando las expresiones de sistemas de resortes y los resultados que entrega el software Ansys al simular el comportamiento del sistema completo. Esta comparación se muestra en la tabla 5.4.

Tabla 5.4: Comparación entre la estimación del comportamiento a partir de la simulación de una placa y los resultados de la simulación del sistema de la figura 5.8. Fuente: Elaboración propia.

Parámetro	Resultados de la simulación de 1 placa de la geometría $z=150, a=30, L=180, e=10$	Estimación considerando 2 geometrías en paralelo y 3 en serie	Resultados de la simulación de la nueva configuración propuesta
K_e [N/mm]	3264,9	2176,6	2168,9
K_p [N/mm]	755,6	503,73	513,43
k_p/k_e	0,2314	0,2314	0,2367
F_y [N]	8500	17000	16000

Con los resultados de la tabla 5.4, se puede concluir que el sistema de la figura 5.8 es equivalente a 2 disipadores dispuestos en paralelo y 3 en serie.

Finalmente, el sistema de la figura 5.5, tiene la misma disposición que se propuso en el capítulo 4 para el sistema de disipación de energía de la planta 1, por lo cual se realizó el modelo 3D de esta nueva configuración utilizando las dimensiones de la geometría ADAS correspondientes al diseño anteriormente señalado que se expuso en la figura 4.2. Este nuevo sistema y su curva fuerza-desplazamiento obtenida a partir de la simulación, se presentan en la figura 5.9.

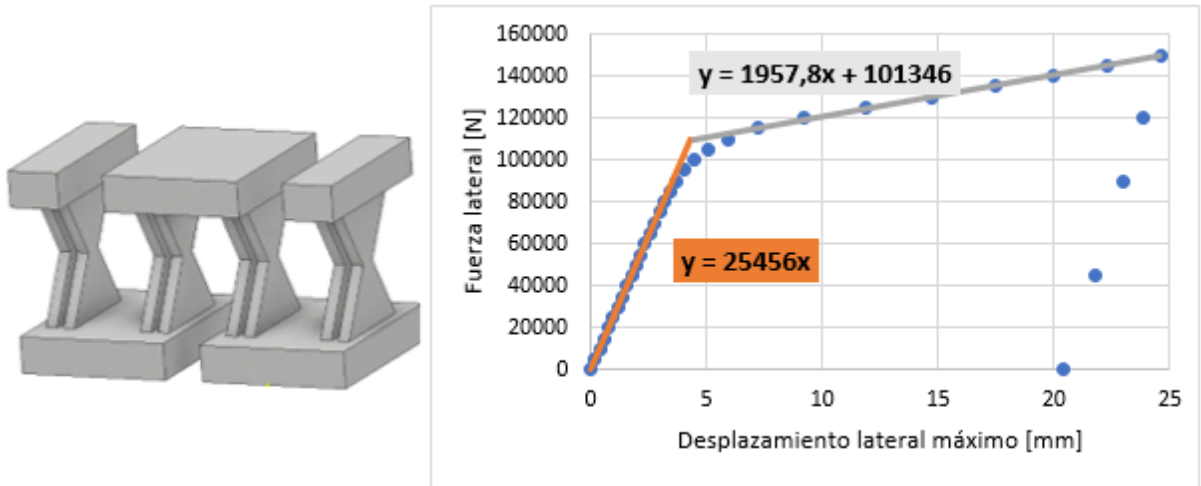


Figura 5.9: Sistema de disipación para la planta 1 utilizando la nueva configuración. Fuente: Elaboración propia.

Este sistema tiene una rigidez elástica de 25456 [N/mm], una fuerza de fluencia de 85000 [N] y $K_p/K_e = 0,0769$. En cuanto a las dimensiones, la geometría ADAS mantiene las medidas de la figura 4.2, obteniendo un sistema de 280 mm de altura total y una base de 254 mm x 480 mm. Esta nueva propuesta tiene una menor altura que el sistema para esta misma planta descrito en el capítulo 4. Además su rigidez elástica es más cercana a los requerimientos.

Es importante revisar la forma de instalar esta nueva configuración en el pórtico. En la figura 5.10 se presentan dos opciones, pensando en las dos configuraciones presentadas en esta sección del capítulo.

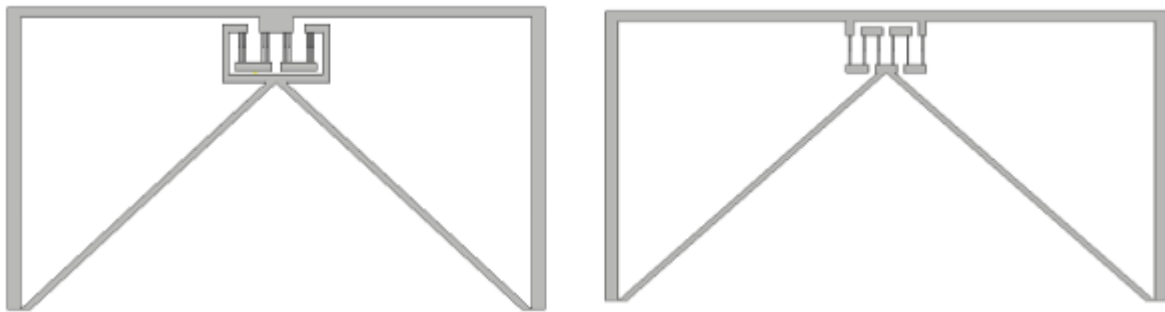


Figura 5.10: Opciones para instalar esta configuración en el pórtico. Fuente: Elaboración propia.

CONCLUSIONES

Respecto a lo expuesto en este informe, se puede concluir que es válido comparar estos sistemas de disipación con un sistema de resortes, lo cual permite simular solo una unidad y de esta forma estimar en base a los requerimientos cuántas unidades básicas se necesitan y cómo distribuir las (serie o paralelo). Esto permite optimizar los tiempos, ya que las simulaciones del sistema completo tardan mucho más tiempo que las de una sola unidad.

En cuanto a las expresiones de rigidez elástica para un disipador del tipo ADAS, se demostró que no es posible estimar este parámetro para todas las geometrías utilizando la misma expresión, dependiendo la elección de ésta, de la relación entre el espesor y la longitud vertical de la geometría.

Respecto de la rigidez plástica, se puede concluir que, durante este proyecto, solo se obtuvo una expresión experimental que permite estimar la variación de este parámetro al cambiar el espesor y mantener constantes todas las demás dimensiones de la geometría ADAS, lo cual no fue posible para la geometría curva propuesta.

Por otra parte, los disipadores propuestos en el capítulo 4, tienen un comportamiento bastante cercano a los requerimientos, sin embargo, los de las plantas superiores superan el metro de altura, ya que para lograr una relación rigidez plástica sobre rigidez elástica más baja, se debe aumentar el espesor, provocando con ello un aumento en la rigidez elástica, contradiciéndose con los requerimientos del pórtico. Esto último se soluciona colocando más elementos en serie, que es la causa de sistemas de disipación de gran altura.

Una de las posibles soluciones a la problemática descrita en el párrafo anterior, es el cambio de geometría, por lo que en el capítulo 5 se estudiaron dos posibles opciones. En este estudio se pudo evidenciar que la geometría curva es menos rígida que la geometría ADAS, traduciéndose en una disminución de la altura total del sistema. Sin embargo, al ser menos rígidos y con una fuerza de fluencia más baja, se requieren más elementos en paralelo, aumentando el área basal del sistema.

Conclusiones

Adicionalmente, las geometrías curvas son más fáciles de manipular, debido a que un cambio en el ancho de éstas afecta la rigidez y la fuerza de fluencia, produciendo cambios mínimos en la relación K_p/K_e , que como se demostró en este proyecto, está ligada fuertemente al cambio de espesor de la geometría. Cabe destacar que, en todas las geometrías estudiadas, un aumento de espesor implica una reducción en la relación K_p/K_e .

Respecto a la última geometría estudiada, se puede concluir que permitió obtener un disipador que cumpliera con los requerimientos de la planta 5 con una menor altura que el propuesto con la geometría ADAS, sin embargo, para considerarla como mejor opción, habría que evaluar el proceso de fabricación y los costos asociados.

En cuanto a los resultados del estudio de una nueva configuración, este permitió obtener una segunda solución al problema de la altura de los sistemas de disipación. Es importante señalar que las soluciones para disminuir la altura de los sistemas propuestos se podrían utilizar por separado, como se detalló en este documento, o bien en conjunto, diseñando una nueva configuración con una geometría distinta al ADAS.

Si se considera el proceso de manufactura, para los disipadores con geometrías curvas sería más complejo, tanto por la forma como por la cantidad de elementos, ya que como se pudo evidenciar en la tabla 5.2, en el sistema de disipación para la planta 2 eran necesarios 216 elementos para cumplir los requerimientos, mientras que en el sistema compuesto por ADAS solo se necesitaban 15.

La investigación se debería continuar estudiando nuevas geometrías que permitan optimizar el diseño, obteniendo fuerzas de fluencia mayores para disminuir la cantidad de elementos en serie y al mismo tiempo rigideces elásticas menores, para requerir menos elementos en serie y tener un sistema de disipación más bajo. Debido a esto, se está pensando en evaluar geometrías creadas a partir de la técnica de fabricación aditiva metálica, que es similar a la impresión en 3D, pero utilizando metales. Adicionalmente, se puede evaluar la influencia que tendría un cambio de material en el coeficiente entre las rigideces plástica y elástica.

REFERENCIAS

Alehashem, S. M., Keyhani, A. & Pourmohammad, H. (2008). Behavior and Performance of Structures Equipped with ADAS & TADAS Dampers (a Comparison with Conventional Structures). *The 14th World Conference on Earthquake Engineering*. Beijing, China.

Basu, D. & Reddy, P. (2016). A New Metallic Damper for Seismic Resilience: Analytical Feasibility Study. *Structures*, 7, 165-183.

Benavent-Climent, A. (2011). An energy-based method for seismic retrofit of existing frames using hysteretic dampers. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 31, 1385-1396.

Briones, B. & De la Llera, J. (2014). Analysis, design and testing of an hourglass-shaped copper energy dissipation device. *Engineering Structures*, 79, 309-321.

Corporación de Desarrollo Tecnológico. (2012). Protección Sísmica de Estructuras: Sistemas de Aislación Sísmica y Disipación de Energía. Documentos técnicos CDT, 29.

Dimopoulos, A., Hale E. & Karavasilis, T. (2012). Seismic design and evaluation of a minimal-damage steel frame equipped with steel yielding devices and viscous dampers. *15th World Conference on Earthquake Engineering*, Lisboa, Portugal.

Hibbeler, R. C. (2006). *Mecánica de materiales*. México, Pearson Education.

Gilbert, R. & Hadzi-Janey, D. (2009) Parámetros geotécnicos para la caracterización elastoplástica de los suelos. *Jornadas técnicas Ilustre Colegio Oficial de geólogos de Cataluña*. Cataluña, España.

Lopez, F. & Bozzo, L. (2005). Disipadores de energía para control de vibraciones de estructuras. noviembre 20, 2018, de Universidad de La Coruña. Descargado de: ftp://ceres.udc.es/Doctorado/Estructuras2/analisis_no_lineal/proceso_constructivo_pushover_dinamico/varios/Disipadores_de_energia.pdf

Méndez, C. (2013). Beneficios y ventajas de los sistemas de protección sísmica. *Congreso estructuras 2013, XII Seminario de Ingeniería Estructural y Sísmica*. San José, Costa Rica.

Referencias

- Morillas, L. (2013). Proyecto sismorresistente basado en prestaciones utilizando métodos energéticos aplicado a pórticos con sistemas de control pasivo (Tesis doctoral). Universidad de Granada, España.
- Motamedi, M. & Nateghi-A, F. (2018). Study on mechanical characteristics of accordion metallic damper. *Journal of Constructional Steel Research*, 142, 68-77.
- Nath, M. (2016). Seismic design and performance of yielding shear panel device (Tesis de pregrado). Concordia University, Montreal, Canadá.
- Rico, J. (2018). Sistemas de resortes en “serie” y “paralelo”: determinación de la constante del resorte equivalente. Universidad de Guanajuato, Salamanca, México. Descargado de: <http://www.dicis.ugto.mx/profesores/chema/Documentos/Vibraciones%20Mec%C3%A1nicas/Sistemas%20de%20un%20Grado%20de%20Libertad/Resortes%20en%20Serie%20%20y%20Paralelo.pdf>
- Sahoo, D., Singhal, T., Taraithia, S. & Saini, A. (2015). Cyclic behavior of shear-and-flexural yielding metallic dampers. *Journal of Constructional Steel Research*, 114, 247-257.
- Somarriba, M. (2012). Efecto de los disipadores metálicos de energía tipo “ADAS” y “TADAS” en la respuesta sísmica de un edificio irregular (Tesis de pregrado). Universidad Nacional de Ingeniería, Nicaragua.
- Tena-Colunga, A. & Nangullasmú-Hernández, H. (2015). Assesment of seismic design parameters of moment resisting RC braced frames with metallic fuses. *Engineering Structures*, 95, 138-153.
- Wang, W., Kong, J., Zhang, Y. & Chu G. (2018). Seismic Behavior of Self-Centering Modular Panel with Slit Steel Plate Shear Walls: Experimental Testing. *Journal of Structural Engineering*, 144.

ANEXO 1: CÁLCULO DE CURVA ELÁSTICA PARA GEOMETRÍA DE INERCIA CONSTANTE

Aplicando el método de doble integración, para el tramo $0 \leq x \leq x_{\text{inf}}$ se tiene:

$$\frac{d^2v_1}{dx^2} = \frac{-M + FL - Fx}{EI} \quad (36)$$

$$\frac{dv_1}{dx} = \frac{1}{EI} \left(-Mx + FLx - \frac{Fx^2}{2} + C_1 \right) \quad (37)$$

$$v_1 = \frac{1}{EI} \left(-\frac{Mx^2}{2} + \frac{FLx^2}{2} - \frac{Fx^3}{6} + C_1x + C_2 \right) \quad (38)$$

Para el tramo $x_{\text{inf}} \leq x \leq L$:

$$\frac{d^2v_2}{dx^2} = \frac{M - FL + Fx}{EI} \quad (39)$$

$$\frac{dv_2}{dx} = \frac{1}{EI} \left(Mx - FLx + \frac{Fx^2}{2} + C_3 \right) \quad (40)$$

$$v_2 = \frac{1}{EI} \left(\frac{Mx^2}{2} - \frac{FLx^2}{2} + \frac{Fx^3}{6} + C_3x + C_4 \right) \quad (41)$$

Para determinar los valores de las constantes de integración, es necesario conocer las condiciones de borde, las cuales se pueden observar claramente en la *figura 3.7* y son:

- La pendiente en el extremo A es nula.

$$\frac{dv_1(x=0)}{dx} = 0 \quad (42)$$

- La deflexión en el extremo A es nula.

$$v_1(x=0) = 0 \quad (43)$$

Anexos

- La pendiente en el extremo B es nula.

$$\frac{dv_2(x = L)}{dx} = 0 \quad (44)$$

A partir de las expresiones 42 y 43, se determina que $C_1=C_2=0$ y de la ecuación 44, se obtiene el valor de la constante C_3 :

$$C_3 = -ML + \frac{FL^2}{2} \quad (45)$$

Adicionalmente, la curva debe cumplir la condición de continuidad, de esta forma:

$$\frac{dv_1(x = x_{inf})}{dx} = -\frac{dv_2(x = x_{inf})}{dx} \quad (46)$$

$$v_1(x = x_{inf}) = -v_2(x = x_{inf}) \quad (47)$$

De la ecuación 46, se obtiene que el momento M que está actuando en el extremo B es:

$$M = \frac{FL}{2} \quad (48)$$

Y al reemplazar este valor en la expresión 19, se obtiene que el punto de inflexión de la viga es $L/2$. A partir de la ecuación 47, se obtiene que $C_4=0$.

ANEXO 2: CÁLCULO DE CURVA ELÁSTICA PARA GEOMETRÍA DE INERCIA VARIABLE

Aplicando el método de doble integración, para el tramo $0 \leq x \leq L/2$ se tiene:

$$\frac{d^2v_1}{dx^2} = \frac{12L}{Ee^3} \left(\frac{-M + FL - Fx}{zL - 2x(z-a)} \right) \quad (49)$$

$$\begin{aligned} \frac{dv_1}{dx} = \frac{12L}{-2(z-a)Ee^3} & \left[(-M + FL) \ln(zL - 2x(z-a)) \right. \\ & \left. + \frac{F}{2(z-a)} (zL - 2x(z-a) - (zL) \ln(zL - 2x(z-a))) + C_1 \right] \end{aligned} \quad (50)$$

$$\begin{aligned} v_1 = \frac{12L}{-2(z-a)Ee^3} & \left[(-M + FL) \frac{(2x(z-a) - zL)(\ln(zL - 2x(z-a)) - 1)}{2(z-a)} \right. \\ & + \frac{F}{2(z-a)} (zLx - x^2(z-a) \\ & \left. - \frac{zL(2x(z-a) - zL)(\ln(zL - 2x(z-a)) - 1)}{2(z-a)}) + C_1x + C_2 \right] \end{aligned} \quad (51)$$

Para el tramo $L/2 \leq x \leq L$:

$$\frac{d^2v_2}{dx^2} = \frac{12L}{Ee^3} \left(\frac{M - FL + Fx}{aL + (2x - L)(z-a)} \right) \quad (52)$$

$$\begin{aligned} \frac{dv_2}{dx} = \frac{12L}{2(z-a)Ee^3} & \left[(M - FL) \ln(2x(z-a) + L(2a - z)) \right. \\ & + \frac{F}{2(z-a)} (2x(z-a) + L(2a - z) + L(z - 2a) \ln(2x(z-a) \\ & \left. + L(2a - z))) + C_3 \right] \end{aligned} \quad (53)$$

$$v_2 = \frac{12L}{2(z-a)Ee^3} \left[(M - FL) \left(\frac{(2x(z-a) - L(z-2a)) \ln(2x(z-a) - L(z-2a))}{2(z-a)} - x \right) + \frac{F}{2(z-a)} \left(x^2(z-a) + L(2a-z)x + L(z-2a) \left(\frac{(2x(z-a) - L(z-2a)) \ln(2x(z-a) - L(z-2a))}{2(z-a)} - x \right) \right) + C_3x + C_4 \right] \quad (54)$$

Aplicando las mismas condiciones de borde explicadas en el caso anterior, se determinan las constantes C_1 , C_2 y C_3 :

$$C_1 = (M - FL) \ln(zL) - \frac{F}{2(z-a)} (zL - (zL) \ln(zL)) \quad (55)$$

$$C_2 = \frac{(M - FL)(-zL)(\ln(zL) - 1)}{2(z-a)} - \frac{F}{2(z-a)} \left(\frac{z^2 L^2 (\ln(zL) - 1)}{2(z-a)} \right) \quad (56)$$

$$C_3 = (-M + FL) \ln(zL) - \frac{F}{2(z-a)} (zL + L(z-a) \ln(zL)) \quad (57)$$

Con la condición de continuidad de la pendiente de la curva, se comprueba que nuevamente el momento aplicado en el extremo B es $FL/2$ y que el punto de inflexión para este caso, al igual que el anterior es el punto medio de la viga, es decir $L/2$.

Con la condición de continuidad de las deflexiones, se obtiene la constante C_4 :

$$\begin{aligned}
C_4 & & (58) \\
&= L(-M + FL) \left(\frac{2a - 2z + 2a(\ln(zL)) - z(\ln(zL))}{2(z - a)} \right) \\
&+ \frac{FL^2}{2(z - a)} \left(\frac{3z^2 + 3a^2 - 6az + 2a^2(\ln(aL)) + \ln(zL)(z^2 - 4az + 2a^2)}{2(z - a)} \right)
\end{aligned}$$

Finalmente, siguiendo el mismo procedimiento realizado para obtener la rigidez de la geometría con inercia constante, se puede determinar la rigidez para este caso, obteniendo la siguiente expresión:

$$K_{I \text{ var}} = \frac{2Ee^3(z - a)^3}{3L^3(3a^2 + z^2 - 4az + 2a^2(\ln(zL) - \ln(aL)))} \quad (59)$$

ANEXO 3: CÁLCULO DE DESPLAZAMIENTO GENERADO POR CORTE

El factor de forma para cortante será:

$$f_s = \frac{A}{I^2} \int_A \frac{Q^2}{t^2} dA \quad (60)$$

Utilizando la misma nomenclatura de la *figura 3.9*, se tiene:

$$A = e * b(x) \quad (61)$$

$$t = b(x) \quad (62)$$

$$I = \frac{e^3 * b(x)}{12} \quad (63)$$

$$Q = \left(y + \frac{e/2 - y}{2} \right) \left(\frac{e}{2} - y \right) b(x) \quad (64)$$

Reemplazando lo anterior:

$$f_s = \int_{-e/2}^{e/2} \frac{e * b(x) \left[\frac{b(x)}{2} \left(\frac{e^2}{4} - y^2 \right) \right]^2}{\left[\frac{b(x) * e^3}{12} \right]^2 (b(x))^2} b(x) dy = \frac{6}{5} \quad (65)$$

Luego, el desplazamiento por corte está dado por:

$$v_{corte} = \int_0^{L/2} f_s V_1 \left(\frac{\partial V_1}{\partial P} \right) \frac{dx}{GA_1} + \int_{L/2}^L f_s V_2 \left(\frac{\partial V_2}{\partial P} \right) \frac{dx}{GA_2} \quad (66)$$

Siendo:

$$V_1 = \frac{d(M_1(x))}{dx} = -F \quad (67)$$

$$V_2 = \frac{d(M_2(x))}{dx} = F \quad (68)$$

$$A_1 = b_1(x) * e = \left[z - \frac{2x(z - a)}{L} \right] e \quad (69)$$

Anexos

$$A_2 = b_2(x) * e = \left[a + (2x - L) \frac{(z - a)}{L} \right] e \quad (70)$$

Reemplazando e integrando:

$$v_{corte} = \frac{6FL[\ln(z/a)]}{5Ge(z - a)} \quad (71)$$

La expresión anterior es para el caso de inercia variable. Para inercia constante, el factor de forma del cortante también es 6/5 y la expresión para el desplazamiento por corte es:

$$v_{corte I=cte} = \frac{6FL}{5Gbe} \quad (72)$$