

Determinación Numérica de la Respuesta Dinámica de un Pórtico Bidimensional de
Concreto Reforzado con Disipadores Histeréticos de Placas Ranuradas

María Alejandra González Luengas, Daniela Valentina Franco Triana

Trabajo de Grado para Optar el Título de Ingeniera Civil

Director

Oscar Javier Begambre Carrillo

PhD en Ingeniería de Estructuras

Codirector

Angie Paola Mendoza Cuy

Ing. Civil

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingeniería Civil

Bucaramanga

2021

Agradecimientos

A Dios, mi escudo y fortaleza, quien me regalo sabiduría para alcanzar esta meta.

A mis Padres, pilares fundamentales en mi vida y en mi aprendizaje. Gracias a ellos por sus palabras de amor, sabiduría y ser un ejemplo de vida para mí. A mis hermanas por su amor y buena energía para los momentos difíciles. A mi familia en general por ser un apoyo incondicional.

A los amigos que me dio esta etapa de la vida, los que dieron refugio y se convirtieron en familia para esta foránea, gracias por su compañía, su lealtad y sinceridad.

Por último, a mi compañera María González por estar a mi lado desde el día 1 de la carrera hasta el final, por su lealtad, amistad, paciencia, sinceridad y como se lo dije muchas veces: “Gracias por ser mi polo a tierra”.

Daniela Valentina Franco Triana

A Dios por brindarme salud, sabiduría y fortaleza a lo largo de mi vida.

A mis padres por todo su amor, apoyo, sacrificio, consejos y valores transmitidos en cada etapa de mi vida, los cuales me han convertido en la persona que soy hoy en día y de la cual estoy orgullosa.

A mis hermanos por su amor y apoyo ilimitado. A mis sobrinas por llenar mi vida de alegría.

A mi familia en general, que de un modo u otro contribuyeron a mi crecimiento personal y profesional.

A Edwar Ardila por todo su amor, comprensión, apoyo y motivación a lo largo de mi pregrado.

A mis amigos por su amistad genuina y sincera, por las experiencias vividas, sus consejos, ser mi soporte fuera de casa y estar para mí incondicionalmente.

A Gustavo P por su apoyo, por creer siempre en mí y llenarme de motivación para cumplir mis sueños.

A mi compañera Daniela Franco, por ser ese hermoso ser humano, por su amistad, incondicionalidad, compromiso y esfuerzo, no solo en este trabajo, también en toda nuestra carrera.

María Alejandra González Luengas

A nuestra alma mater y los docentes que con sus conocimientos y experiencia aportaron en una formación integral y nos ayudaron a crecer profesional y personalmente.

A el profesor Oscar Begambre y la Ing. Angie Mendoza por el apoyo, por sus consejos, por su dedicación y guía que nos permitieron sacar adelante este proyecto.

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción.....	13
1. Objetivos.....	16
1.1. Objetivo General	16
1.2. Objetivos Específicos.....	16
2. Marco Teórico	17
2.1. Análisis no lineal tiempo historia.....	17
2.2. Método de Newmark.....	18
2.3. Modelo de Amortiguamiento.....	19
2.4. Sistemas de protección sísmica.....	20
2.4.1. Control activo y semiactivo	21
2.4.2. Control Pasivo.....	22
2.5. Disipadores de energía.....	23
2.6. Disipador Histerético de Placas Ranuradas.	25
2.7. Rotulas Platicas	26
3. Metodología.....	27
3.1. Caracterización de la Estructura.	27
3.2. Modelamiento de la Estructura.....	28

3.3. Espectro de Diseño.....	29
3.4. Selección y Ajuste de Acelerogramas.....	31
3.5. Cantidad de Modelos.	34
3.6. Selección y Modelamiento del Disipador.	36
3.7. Asignación de Rotulas Plásticas.	42
3.8. Método de Análisis Dinamico.....	43
4. Resultados.....	44
4.1. Ajuste de Resultados.....	49
4.2. Ciclos Histeréticos de los disipadores.....	64
4.3. Plasticidad de los elementos	65
5. Conclusiones.....	66
Referencias Bibliográficas	69

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1 Parámetros para un suelo tipo c en Bucaramanga Santander, zona de sismicidad alta.....	30
Tabla 2 Periodos de diseño	31
Tabla 3. Sismos de la Zonificación sismogeotécnica indicativa del área metropolitana de Bucaramanga, 2001.....	32
Tabla 4 Cantidad de modelos.....	36
Tabla 5 Propiedades del diseño optimizado del disipador histerético de placas ranuradas.	38
Tabla 6 Desplazamientos horizontales por piso modelo sin disipadores (MSD).	44
Tabla 7 Porcentaje de deriva por piso modelo sin disipadores (MSD).....	45
Tabla 8 Desplazamientos horizontales por piso para los 34 modelos realizados.	45
Tabla 9 Porcentaje de deriva por piso para los 34 modelos realizados.	47
Tabla 10 Factor de ajuste para cada modelo.	50
Tabla 11 Desplazamientos horizontales por piso corregidos para los 34 modelos realizados.	52
Tabla 12 Porcentaje de deriva por piso corregido para los 34 modelos realizados.	54

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Casos espaciales método de Newmark.....	19
Figura 2. Sistemas de control activa.	21
Figura 3. Sistemas semiactivos de protección sísmica.	22
Figura 4. Sistemas Pasivos de control de respuesta.....	23
Figura 5. Disipador Histerético de placa ranuradas.....	25
Figura 6. Momento-curvatura o fuerza-desplazamiento para elemento de acero según FEMA 356.....	27
Figura 7. Pórtico de análisis modelado en MIDAS GEN.....	29
Figura 8. Espectro Elástico de aceleraciones para un tipo de suelo C en Bucaramanga Santander, zona de sismicidad alta.....	30
Figura 9. Acelerograma del sismo Loma Prieta escalado en el software SeismoMatch ..	33
Figura 10. Verificación del primer requisito para los espectros escalados de los sismos seleccionados.....	33
Figura 11 Verificación del segundo requisito para el promedio de los espectros escalados de los sismos seleccionados	34
Figura 12 Representación gráfica para algunos modelos.	35
Figura 13 Diseño optimizado de Disipador Histerético de Placas Ranuradas.....	37
Figura 14 Modelamiento de elementos estructurales tipo Liga en MIDAS Gen.....	39
Figura 15 Asignación de propiedades a los elementos tipo Liga en MIDAS Gen.	40
Figura 16 Ejes locales del disipador en MIDAS Gen.....	40

Figura 17 Pórtico con disipadores y contraventeos ya incorporados en el sistema estructural.....	41
Figura 18 Representación gráfica de los desplazamientos para los mejores modelos con 1,2,3,4,6 y 14 disipadores vs modelo sin disipadores (MSD).....	56
Figura 19 Representación gráfica de las derivas para los mejores modelos con 1,2,3,4,6 y 14 disipadores vs modelo sin disipadores (MSD).....	57
Figura 20 Representación gráfica del desplazamiento del último nivel en función del número de disipadores.....	58
Figura 21 Representación gráfica de la deriva máxima función del número de disipadores.	58
Figura 22 Representación gráfica de la reducción del desplazamiento del último nivel en función del número de disipadores	59
Figura 23 Representación gráfica de la reducción de la deriva máxima en función del número de disipadores.....	60
Figura 24 Historia de los desplazamientos para el último nivel en el modelo sin disipadores y el modelo 4 bajo el sismo de Loma Prieta.	61
Figura 25 Historia de los desplazamientos para el último nivel en el modelo sin disipadores y el modelo 7 bajo el sismo de Loma Prieta.	61
Figura 26 Historia de los desplazamientos para el último nivel en el modelo sin disipadores y el modelo 21 bajo el sismo de Loma Prieta.	62
Figura 27 Historia de los desplazamientos para el último nivel en el modelo sin disipadores y el modelo 24 bajo el sismo de Loma Prieta.	62

Figura 28 Historia de los desplazamientos para el último nivel en el modelo sin disipadores y el modelo 33 bajo el sismo de Loma Prieta.	63
Figura 29 Historia de los desplazamientos para el último nivel en el modelo sin disipadores y el modelo 34 bajo el sismo de Loma Prieta.	63
Figura 30 Histéresis de los disipadores histeréticos de placas ranuradas para cada nivel del modelo 34.....	64
Figura 31 Rótulas plásticas formadas bajo el sismo de Coalinga. a) Modelo sin disipadores b) Modelo con seis disipadores [Modelo 33].....	65

Lista de Apéndices

Ver apéndices adjuntos y pueden ser consultados en la base de datos de la Biblioteca

UIS

Apéndice A. Chequeo de deriva modelo sin disipadores.

Apéndice B. Representación gráfica de los modelos variando la cantidad y disposición de disipadores.

Apéndice C. Análisis no lineal y modelamiento del disipador en el software Midas gen.

Apéndice D. Resultados de derivas y desplazamientos horizontales para cada modelo sin factor de corrección por chequeo de fuerza cortante.

Apéndice E. Resultados de derivas y desplazamientos horizontales para cada modelo con factor de corrección por chequeo de fuerza cortante.

Resumen

Título: Determinación numérica de la respuesta dinámica de un pórtico bidimensional de concreto reforzado con disipadores histeréticos de placas ranuradas*

Autor: María Alejandra González Luengas y Daniela Valentina Franco Triana**

Palabras Clave: Análisis dinámico no lineal, Sistemas de control sísmico, Placas ranuradas, Disipador de energía pasivo, Derivas, Desplazamiento.

Descripción:

Los disipadores histeréticos metálicos de placas ranuradas son dispositivos de control de respuesta sísmica pasivos que se caracterizan por presentar un comportamiento histerético estable, ser de fácil elaboración, bajo costo y no requerir mano de obra altamente calificada ni procedimientos complejos para su utilización. Sin embargo, no se cuenta con suficiente información experimental en el país acerca de la influencia de estos dispositivos en el comportamiento de una estructura, causando una falta de seguridad en ingenieros y arquitectos para incorporar estos dispositivos en las estructuras tanto nuevas como reforzadas. En este contexto, el presente trabajo busca aportar información determinando numéricamente la respuesta dinámica de un pórtico bidimensional de concreto reforzado ante la implementación de disipadores histeréticos de placas ranuradas. Para esto se realiza un análisis dinámico no lineal a 34 modelos en el software de análisis estructural Midas Gen que emplean como variables la cantidad y posición de los disipadores. Mediante la comparación gráfica y numérica de los desplazamientos y derivas obtenidos entre los modelos con y sin disipador, se demuestra que este tipo de dispositivos logran reducir los desplazamientos y derivas máximas hasta un 36% y 27% respectivamente, además, se valida que la cantidad y ubicación de estos, son factores influyentes en la respuesta dinámica de la estructura.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: Oscar Javier Begambre Carrillo. Codirector: Angie Paola Mendoza Cuy

Abstract

Title: Numerical determination of the dynamic response of a two-dimensional reinforced concrete frame with steel slit dampers.*

Author(s): María Alejandra González Luengas y Daniela Valentina Franco Triana ¹

Key Words: Nonlinear dynamic analysis, Seismic control systems, Steel Slit Damper, Passive energy dissipater, Drifts, Displacement

Description:

Steel Slit Dampers are passive seismic response control devices that are characterized by their stable hysteretic behavior, ease of fabrication, low cost and do not require highly skilled labor or complex procedures for their use. However, there is not enough experimental information in the country about the influence of these devices on the behavior of a structure, causing a lack of confidence in engineers and architects to incorporate these devices in both new and reinforced structures. For this purpose, a nonlinear dynamic analysis is performed on 34 models in the structural analysis software Midas Gen that use the quantity and position of the dissipaters as variables. By means of the graphical and numerical comparison of displacements and drifts obtained between models with and without dissipaters, it is demonstrated that this type of devices reduces the maximum displacements and drifts up to 36% and 27% respectively, besides validating that the quantity and location are influential factors in the dynamic response.

* Degree Work

¹Physico-mechanical Engineering Faculty. School of civil engineering. Director Oscar Javier Begambre Carrillo. Codirector: Angie Paola Mendoza Cuy.

Introducción

Los terremotos son eventos naturales que han generado, a lo largo de la historia, un sin número de pérdidas humanas y un retroceso en el crecimiento de las sociedades, especialmente en aquellas en vía de desarrollo (Genatios & Lafuente, 2016). Un ejemplo de esto es el terremoto de 1999 con epicentro en Armenia Quindío, Colombia; el cual dejó, según el DANE, 1.185 muertos, 35.972 viviendas destruidas o inhabitables y daños generales en aproximadamente 2.2 del PIB de 1998 (Servicio Geológico Colombiano, n.d.). Este y muchos otros sucesos a nivel mundial y regional han llevado a la ingeniería sísmica a realizar estudios e investigaciones acerca de técnicas que permitan mejorar la respuesta sísmica de las estructuras y así, poder preservar la vida y el patrimonio de las personas (Genatios & Lafuente, 2016).

Las técnicas de control sísmico se han clasificado en tres tipos: activas, semi activas y pasivas, donde su principal diferencia radica en el uso de una fuente externa de energía para su operación, tal como trabajan las técnicas activas y semi activas. En cuanto a las técnicas pasivas estas presentan menor complejidad en análisis, diseño, mantenimiento y precio respecto a las otras, lo cual ha llevado a un considerable crecimiento en la implementación y desarrollo de este tipo de dispositivos alrededor del mundo (Oviedo & Duque, 2009).

En la actualidad Chile es uno de los países que ha implementado y demostrado que estas tecnologías son efectivas tanto en el diseño de estructuras nuevas como en la rehabilitación y reparación de estructuras existentes; según Zamorano (2015), en Chile la destrucción de infraestructura y pérdidas de vidas han disminuido significativamente ante los últimos sismos de gran magnitud que se han presentado (Oviedo & Duque, 2006; Zamorano, 2015). Así mismo, en

Cali, Colombia las clínicas Comfandi e Imbanaco han implementado aisladores de base y la clínica Farallones se ha reforzado con riostras metálicas (El Tiempo, 2011).

Una de las técnicas de control sísmico pasivo que más destacan y cuyo buen desempeño ante cargas sísmicas ha sido expuesto en numerosas publicaciones son los disipadores histeréticos metálicos (Siso Flores, 2017), en el que el requerimiento de ductilidad es otorgado por la deformación relativa y la disipación de energía histéretica del mismo. Si bien existen diferentes disipadores de este tipo, en particular, el disipador metálico de placas ranuradas, figura 1, es un dispositivo que trabaja a cargas cortantes en dirección paralela a su plano y que está compuesto por una sección de ala ancha y una serie de ranuras en su alma que proporcionan una disipación estable de energía a bajo costo (R. W. K. Chan & Albermani, 2008).

En Colombia se han realizado algunas investigaciones acerca de las técnicas de control de respuesta sísmica como las desarrolladas por Oviedo y Duque en 2008, 2010 y Pimiento en 2014, sin embargo, no se cuenta con suficiente información experimental para comprender a mayor profundidad el comportamiento de estos dispositivos cuando se integran en una estructura. Además, la normativa colombiana de diseño sismorresistente NSR-10 no incluye pautas propias para la integración de disipadores en estructuras y remite a códigos de diseño extranjeros desactualizados (Ministerio Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010). Lo anterior ha provocado una falta de seguridad en ingenieros y arquitectos para incorporar estos dispositivos en las estructuras tanto nuevas como reforzadas (“Caracterización Mecánica y Modelamiento Estructural de Un Disipador Pasivo de Energia de Tipo Arriostamiento Restringido Al Pandeo,” 2012) y uno de los obstáculos a los que se ven enfrentados es la determinación de la cantidad y posición de los disipadores, la cual garantice e incremente su efectividad dentro del sistema estructural, siendo estos, factores que influyen significativamente en la respuesta dinámica de la

estructura (Siso Flores, 2017). En relación con disipadores histeréticos de placas ranuradas las investigaciones son limitadas y hasta la fecha no se conoce de ninguna estructura en el país que incorpore en su sistema estructural este tipo de disipador.

En virtud de lo señalado, el presente trabajo busca aportar información a la problemática mencionada mediante una simulación y análisis de la respuesta dinámica en un pórtico plano de concreto reforzado con disipadores histeréticos de placas ranuradas variando la cantidad y disposición de estos en los vanos y pisos de la estructura. Para esto, se efectúa un análisis dinámico no lineal (ADNL), el cual determina la respuesta estructural en cada paso bajo la aplicación de cargas variables en el tiempo, a 34 modelos y mediante la comparación numérica y grafica de los desplazamientos horizontales y derivas máximas de piso se determina la influencia de la cantidad y distribución de los disipadores en la respuesta dinámica de la estructura. La ejecución de este análisis se realiza por medio del software de análisis estructural basado en elementos finitos Midas Gen (*Midas Gen Software de Análisis y Diseño de Edificaciones*, n.d.).

1. Objetivos

1.1. Objetivo General

Determinar numéricamente la respuesta dinámica de un pórtico bidimensional de concreto reforzado ante la implementación de disipadores histeréticos de placas ranuradas.

1.2. Objetivos Específicos

Proponer diferentes ubicaciones de disipadores histeréticos de placas ranuradas en un pórtico bidimensional de concreto reforzado.

Establecer el procedimiento para incorporar disipadores histeréticos de placas ranuradas en la simulación de un pórtico bidimensional.

Simular las diferentes configuraciones de ubicación y cantidad propuestas de los disipadores histeréticos de placas ranuradas, empleando un software de análisis y diseño basado en elementos finitos.

Comparar los desplazamientos horizontales obtenidos mediante un análisis no lineal tiempo historia del pórtico bidimensional con y sin disipadores histeréticos de placas ranuradas.

2. Marco Teórico

2.1. Análisis no lineal tiempo historia

La respuesta de una estructura bajo determinada carga puede llegar a un punto donde su comportamiento pasa ser lineal o elástico a ser inelástico. Dentro de las situaciones que se pueden presentar en la no linealidad de los elementos estructurales, están las de tipo geométrico y de material que hacen que la rigidez de la estructura cambie. Por consiguiente, el estudio de esta respuesta y la cuantificación de la misma se tornan más complejos, lo que hace necesario emplear modelos numéricos no lineales que describan dicho comportamiento, como el análisis dinámico no lineal tiempo historia.

Este tipo análisis determina en cada paso de tiempo la respuesta de la estructura cuando esta se somete a un historial de cargas. Es así como la ecuación de equilibrio dinámico a solucionar es:

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + f_s(u) = p(t) \text{ o } -m\ddot{u}_g(t) \quad (\text{Ec. 1})$$

Donde m es la matriz de masas, c la matriz de amortiguamiento, f_s es la fuerza restauradora en cada instante y $p(t)$ la fuerza aplicada. De igual manera \ddot{u} , \dot{u} y u corresponden a los vectores de aceleración, velocidad y desplazamiento respectivamente. Entre algunos de los métodos de resolución de esta ecuación se puede encontrar el modal y el de integración directa (Chopra, 2014).

2.2. Método de Newmark

Es un método de integración directa implícito desarrollado por el profesor Nathan M. Newmark en 1959, que a partir de la Ec 1 busca la solución de la misma a través de aproximaciones de velocidad y desplazamiento:

$$\dot{u}_{i+1} = \dot{u}_i + [(1 - \gamma) \Delta t] \ddot{u}_i + (\gamma \Delta t) \ddot{u}_{i+1} \quad (\text{Ec. 2})$$

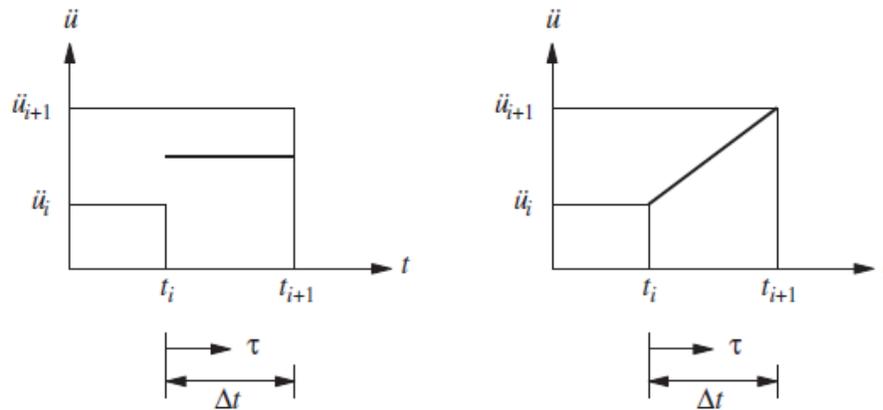
$$u_{i+1} = u_i + (\Delta t) \dot{u}_i + [(0.5 - \beta) (\Delta t)^2] \ddot{u}_i + [\beta (\Delta t)^2] \ddot{u}_{i+1} \quad (\text{Ec. 3})$$

Este método resuelve la ecuación en cada paso de tiempo y calcula \ddot{u}_{i+1} , \dot{u}_{i+1} y u_{i+1} en el tiempo $i+1$, tomado en consideración los valores definidos de \ddot{u} , \dot{u} , u en el tiempo i .

El cambio de la aceleración en el transcurso de un paso de tiempo está definido por los factores β y γ , que a su vez establecen las características de precisión y estabilidad (convergente o divergente) de la solución del método. Usualmente se asignan valores de $1/2$ para γ y valores entre $1/6$ y $1/4$ para β (Chopra, 2014) y en función de estos se identifican dos casos particulares del método de Newmark: el método de la aceleración promedio constante y el método de aceleración lineal. De acuerdo con lo constatado en Chopra (2014), al emplear valores de $\gamma=1/2$ y $\beta=1/4$ se obtiene una aceleración promedio constante y de la misma manera con valores de $\gamma=1/2$ y $\beta=1/6$ se obtiene una aceleración lineal.

Figura 1.

Casos especiales método de Newmark. (a) Aceleración promedio constante, (b) Aceleración lineal.



Nota: Tomado de *Dinámica de estructuras* (p. 175), por Chopra, 2014, PEARSON EDUCACIÓN.

2.3. Modelo de Amortiguamiento.

La matriz de amortiguamiento clásico es adecuada aplicarla si la estructura presenta características similares de amortiguación a lo largo de la misma. Uno de los métodos de elaboración en base a las fracciones de amortiguamiento modal, es el de rayleigh, donde la matriz de amortiguamiento está dada por una unión linealmente proporcional de masa y rigidez (Chopra, 2014), la cual está descrita en la siguiente ecuación:

$$c = a_0 m + a_1 k \quad (\text{Ec. 4})$$

La fracción de amortiguamiento para el n-ésimo modo, en términos de la frecuencia natural w_n es:

$$\zeta_n = \frac{a_0}{2} \frac{1}{w_n} + \frac{a_1}{2} w_n \quad (\text{Ec. 5})$$

Donde, a_0 y a_1 corresponden a constantes de proporcionalidad que se pueden establecer a partir de las fracciones de amortiguamiento ζ_i y ζ_j para los modos i-esimo y j esimo que se representan a través de la siguiente matriz:

$$\frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1/w_i & w_i \\ 1/w_j & w_j \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} a_0 \\ a_1 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \zeta_i \\ \zeta_j \end{Bmatrix} \quad (\text{Ec. 6})$$

Al solucionar la matriz presentada asumiendo que los modos tienen el mismo valor de fracción de amortiguamiento, se tiene que las constantes de proporcionalidad son equivalentes a:

$$a_0 = \zeta \frac{2w_i w_j}{w_i + w_j} \quad a_1 = \zeta \frac{2}{w_i + w_j} \quad (\text{Ec. 7})$$

2.4. Sistemas de protección sísmica.

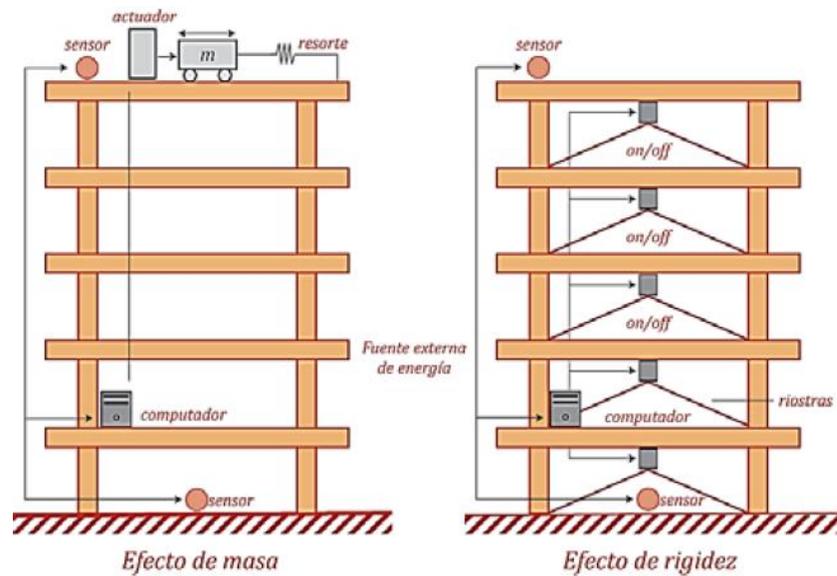
Las técnicas tradicionales de control de respuesta sísmica son aquellas que dependen de la rigidez y capacidad de disipación de energía de la estructura ya sea en concreto reforzado o en otros materiales habituales. En las últimas décadas estas técnicas han agregado mecanismos al sistema estructural con el fin de que la disipación de energía no dependa únicamente de la histéresis propia de la estructura (Oviedo & Duque, 2006). Entre estas técnicas de control de respuesta sísmica, encontramos técnicas pasivas, semi-activas y activas.

2.4.1. Control activo y semiactivo

Se caracterizan por la utilización de fuentes externas para su funcionamiento, así como la instalación de sensores que permiten tratar las variables de control para ajustar la respuesta del dispositivo.

Figura 2.

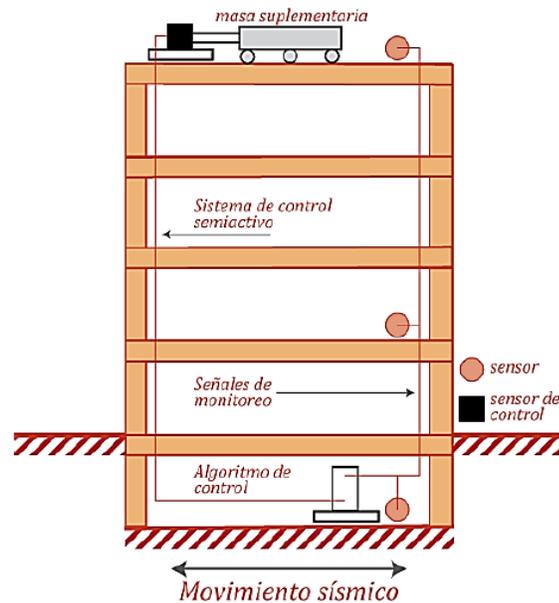
Sistemas de control activa



Nota: Tomado de *Introducción al uso de aisladores y disipadores en estructuras* (p. 42), por Genatios & Lafuente, 2016, *Banco de desarrollo de América Latina*.

Figura 3.

Sistemas semiactivos de protección sísmica.



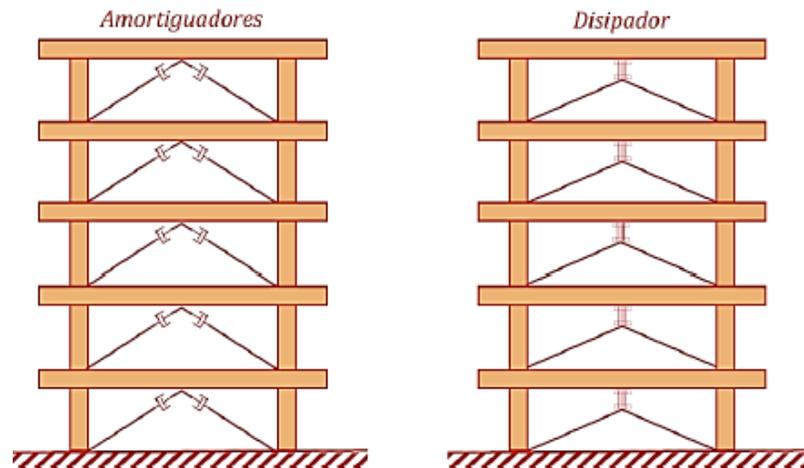
Nota: Tomado de *Introducción al uso de aisladores y disipadores en estructuras* (p. 43), por Genatios & Lafuente, 2016, *Banco de desarrollo de América Latina*.

2.4.2. Control Pasivo.

Los dispositivos utilizados en esta técnica son más simples y no son dependientes de una fuente externa para trabajar. Dicho sistema ofrece múltiples ventajas como: menores costos, simplicidad en procesos de mantenimiento y reemplazo durante su vida útil, así como en los procedimientos de análisis y diseño estructural. Dentro de estas técnicas se encuentran dispositivos como los aisladores y disipadores, los cuales son los más implementados al rededor del mundo (Oviedo & Duque, 2009)

Figura 4.

Sistemas Pasivos de control de respuesta



Nota: Tomado de Introducción al uso de aisladores y disipadores en estructuras (p. 41), por Genatios & Lafuente, 2016, Banco de desarrollo de América Latina.

2.5. Disipadores de energía.

Son dispositivos estratégicamente ubicados en el sistema estructural que tienen como objetivo disipar determinada cantidad de energía que ingresa al sistema por fuerzas externas, disminuyendo en los elementos estructurales el requerimiento de esfuerzos, trasladando la demanda de disipación de energía a los disipadores. Estos se pueden clasificar en dispositivos de: fricción, masas sintonizadas, viscoelásticos, de fluidos, o histeréticos metálicos (Genatios & Lafuente, 2016). En particular, los últimos mencionados brindan mayores ventajas en fabricación, instalación y mantenimiento respecto a otros dispositivos pasivos y de acuerdo a un cuadro comparativo realizado por Oviedo y Duque (2009), en el cual se analizan diferentes aspectos para

el uso de dispositivos pasivos en el diseño y la construcción colombiana, estos se adecuan mejor a las condiciones del país.

El disipador histerético metálico proporciona, a través de la disminución de los desplazamientos, la reducción de la demanda de ductilidad en la estructura. Dicha disminución se debe a la energía disipada por la histéresis del dispositivo y al incremento de rigidez del sistema (ASCE, 2016). La descripción del comportamiento histerético del disipador se puede representar mediante diferentes modelos numéricos, como el modelo descrito por Black et al. 2004 basado en el modelo de Bouc-Wen Wen 1976, en el cual la fuerza se expresa de la siguiente manera:

$$P(t) = \beta Ku(t) + (1 - \beta)Ku_y Z(t) \quad (\text{Ec. 8})$$

Donde, β es la relación de rigidez pos-prefluencia, K es la rigidez de prefluencia, u_y es el desplazamiento de fluencia y $Z(t)$ es una variable evolutiva determinada por:

$$u_y \dot{Z}(t) + \gamma |\dot{u}(t)| |Z(t)| |Z(t)|^{\delta-1} + \eta \dot{u}(t) |Z(t)|^\delta - \dot{u}(t) = 0 \quad (\text{Ec. 9})$$

Donde, γ , δ , η son parámetros adimensionales que establecen la forma del ciclo histerético.

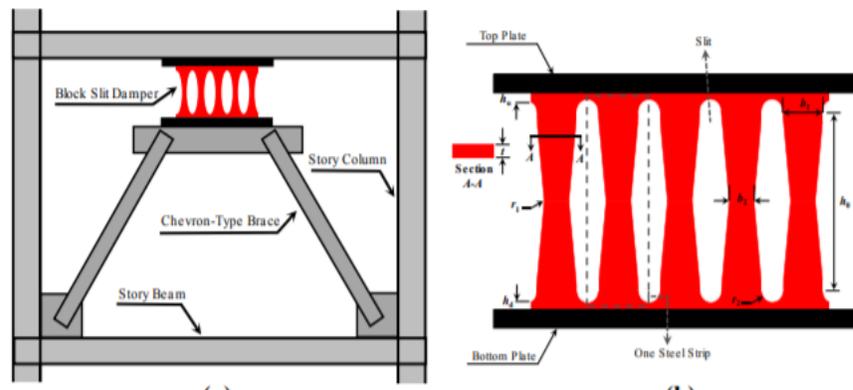
No obstante, el uso de estos dispositivos no garantiza que se reduzca la respuesta de la estructura y deben tenerse en cuenta por lo menos tres aspectos en el diseño: la ubicación de estos en elevación y en planta, la distribución en elevación y en planta, y la cantidad total de disipación agregada, puesto que demasiada cantidad de disipación puede aumentar la rigidez de la estructura y, por ende, incrementar la demanda sísmica, así mismo, poca cantidad de disipación podría producir un bajo efecto en la disminución de la respuesta de la estructura (Pincheira et al., 2017).

2.6. Disipador Histerético de Placas Ranuradas.

Este tipo de disipador consiste en una sección de ala ancha con una serie de ranuras en su alma, las cuales son redondeadas en sus bordes (figura 5). Con el objetivo de evitar las posibles deficiencias que se puedan presentar en relación con las soldaduras, su diseño carece de las mismas (R. W. K. Chan & Albermani, 2008). Estos dispositivos trabajan a cargas cortantes en dirección paralela a su plano y tal como se mencionaba anteriormente, la disipación de energía se da por la fluencia del acero debido la deformación relativa del mismo. Entre sus ventajas están el bajo costo y la buena resistencia a factores ambientales y de temperatura (Pimiento et al., 2014; Pincheira et al., 2017)

Figura 5.

Disipador Histerético de placa ranuradas



Nota: Tomado de Performance-based seismic design and assessment of low-rise steel special moment resisting frames with block slit dampers using endurance time method, por Engineering Structures, 2020.

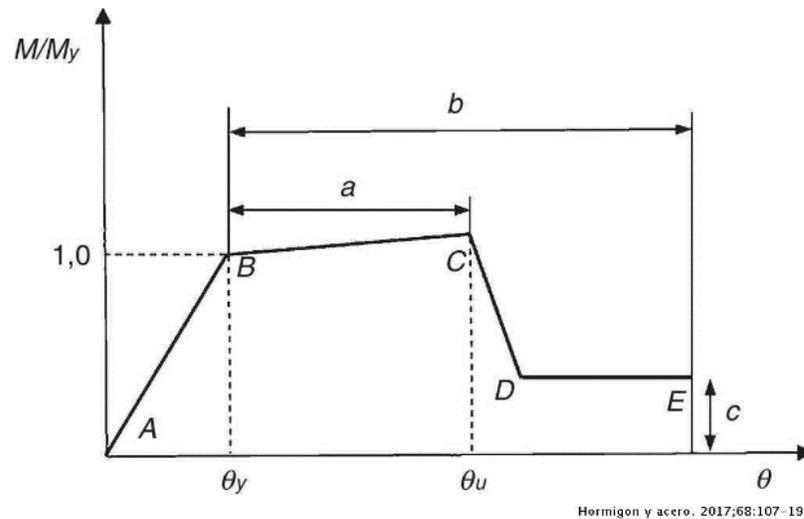
2.7. Rotulas Platicas

Las rotulas plásticas o resortes inelásticos son modelos que se utilizan con el fin de considerar el comportamiento no lineal de los elementos estructurales, permiten disipar energía y se localizan en lugares específicos de los elementos estructurales. Las Rotulas plásticas aparecen en instante en que el momento al que es sometido la sección sobrepasa el momento plástico de dicha sección (García, 2018).

El FEMA 356 surgió con el objetivo predecir el comportamiento no lineal de las estructuras ante la demanda que exponen los sismos y mejorar la precisión de los métodos tradicionales (RodolfoJavier, 2017). Propone un diagrama de momento-curvatura (figura 6), donde se establecen 4 rangos: el rango A-B el cual corresponde a la fase elástica, el rango B-C corresponde al desarrollo de la plasticidad, el rango C-D hace referencia a la fase plástica y el rango D-E a la falla. Así mismo, este define tres niveles de comportamiento estructural los cuales son: Ocupación inmediata (IO) el cual corresponde al 40% del giro de rotura para las vigas y el 25% del giro de rotura para las columnas; seguridad vital (LS) que corresponde al 80% del giro de rotura para las vigas y el 75% del giro de rotura para las columnas y prevención de colapso (CP) equivalente al 100% del giro de rotura para vigas y columnas (López López et al., 2017).

Figura 6.

Momento-curvatura o fuerza-desplazamiento para elemento de acero según FEMA 356.



Nota: Tomado de Respuesta inelástica de marcos de acero con interacción inercial suelo-estructura, por Fernández et all, 2015.

3. Metodología

3.1. Caracterización de la Estructura.

El pórtico seleccionado para esta investigación pertenece a una edificación previamente estudiada en un trabajo de grado desarrollado por Carvajal y Diaz (2018), el cual tiene como título “Evaluación del efecto de amortiguamiento de masa sintonizada en el comportamiento sísmico de

edificaciones regulares de mediana altura”. La estructura se ubica en Bucaramanga, Santander, sobre un suelo tipo C y cuenta con un sistema estructural tipo pórtico resistente a momentos.

Este pórtico está constituido por dos vanos de 4.15 m cada uno y siete niveles de 2.4 m para el primer entrepiso y 2.55 m para los entrepisos restantes, dando a lugar una altura total de 17.7 m. Las columnas tienen una sección transversal de 0.6 m x 0.6 m y las vigas de 0.45 m X 0.35 m.

En relación con los materiales, el concreto presenta una resistencia a la compresión equivalente a $f'c = 21$ Mpa, con un módulo de elasticidad definido por $E = 4700\sqrt{f'c}$ y el acero de refuerzo posee una resistencia a la fluencia igual a $f_y = 420$ Mpa.

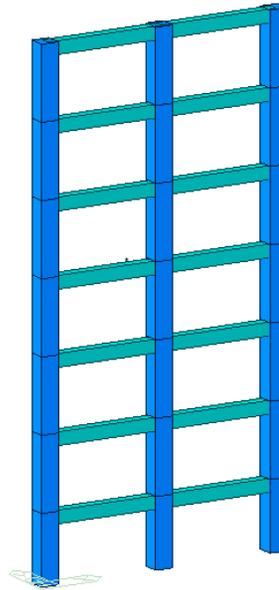
3.2. Modelamiento de la Estructura.

Para la modelación del pórtico en el software de análisis estructural Midas Gen (figura 7) se consideraron las características de la edificación previamente descritas, así como, las solicitaciones de carga. Los valores de carga asignados fueron tomados de las especificaciones presentadas en el título B de la NSR-10, teniendo en cuenta que la estructura es de tipo residencial. Dichos valores corresponden a 1.8 kN/m² para las cargas vivas y 3 kN/m² para las cargas muertas.

Con el respectivo modelo se obtuvo el periodo fundamental de la estructura y se realizó el chequeo de derivas por el método de fuerza horizontal equivalente (FHE) como se muestra en el apéndice A. Cabe resaltar que, la ejecución del método de fuerza horizontal equivalente (FHE), se realizó de forma automática por el software, tomando en cuenta los parámetros definidos la siguiente sección.

Figura 7.

Pórtico de análisis modelado en MIDAS GEN.



3.3. Espectro de Diseño.

El espectro elástico de aceleraciones de diseño es una representación gráfica del periodo (T) versus una fracción de la gravedad (S_a) que permite diseñar las edificaciones en base a las condiciones sísmicas de la zona y las condiciones del subsuelo de fundación (Ministerio Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010).

Considerando las especificaciones establecidas en los apartados A.2.3 y A.2.4 de la NSR-10, además, de las características de la estructura, como su ubicación, tipo de suelo y tipo de uso, se establecieron los parámetros de diseño mostrados en la tabla 1. Con dichos parámetros, se procedió a construir el espectro de diseño que se muestra en la figura 8, calculando los periodos

de diseño mostrados en la tabla 2, acorde a las fórmulas consignadas en el apartado A.2.6.1 de la NSR-10.

Tabla 1

Parámetros para un suelo tipo c en Bucaramanga Santander, zona de sismicidad alta.

Parámetros de diseño	
Coeficiente Aa	0.25
Coeficiente Av	0.25
Coeficiente Fa	1.15
Coeficiente Fa	1.55
Coeficiente de importancia I	1.0

Figura 8.

Espectro Elástico de aceleraciones para un tipo de suelo C en Bucaramanga Santander, zona de sismicidad alta.

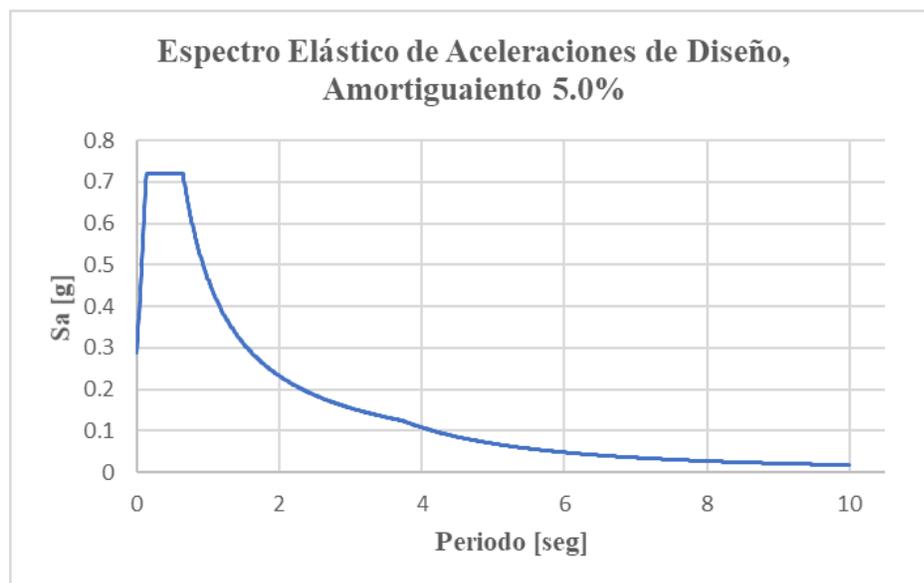


Tabla 2*Periodos de diseño*

Periodos de diseño [s]	
T_o	0.135
T_c	0.647
T_L	3.720

3.4. Selección y Ajuste de Acelerogramas.

Para realizar un análisis dinámico cronológico el reglamento colombiano de construcción sismorresistente NSR-10, específicamente el apartado A.2.7.1 (a), establece que se deben emplear un conjunto de acelerogramas representativos de los movimientos que se puedan presentar en el lugar, tomando en cuenta factores como magnitud, distancias hipo centrales o a la falla causante. También, especifica que para este análisis se deben utilizar un mínimo de 3 acelerogramas diferentes (Ministerio Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010).

En consecuencia, se seleccionaron ocho sismos pertenecientes al estudio de zonificación sismogeotécnica indicativa del área metropolitana de Bucaramanga (Tabla 3), el cual proporciona registros correspondientes a escenarios sísmicos compatibles con las fallas de Bucaramanga-Santa Marta y Frontal de los llanos orientales.

Tabla 3.

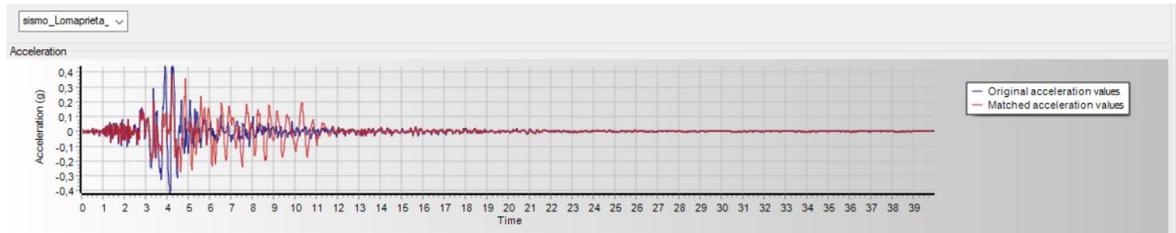
Sismos de la Zonificación sismogeotécnica indicativa del área metropolitana de Bucaramanga, 2001

Nombre Sismo	Estación	Código	Fecha	Hora
Coalinga (As)	Oil Fie	Coalinga	22/07/2021	02:39:54
Loma Prieta	Gilroy 1	Loma Prieta	18/10/1989	00:04:02
Helena	Carr. Coll	Helena	31/10/1935	18:37:49
Mam. Lak (As)	Long Val. D.	Mammoth	27/05/1980	14:50:57
C. Mendocino	Butler Val. 2	Petrolia	25/04/1992	18:06:04
Whittier Nar	Wilson	Whittier	1/10/1987	14:42:20
Umbria-Marche	Nocera Umbra	Umbria	26/09/1997	09:40:30
Montenegro	Herceg Nov.	Montenegro	15/04/1979	06:19:41

A través de la base de datos PEER Strong Motion Database se obtuvo la información respectiva a los registros de aceleración, la cual se ingresó al software SeismoMatch (figura 9) para escalar apropiadamente los sismos al espectro de diseño. De acuerdo con el apartado A.2.7.1 (c) de la NSR-10 se realizó la verificación de los requerimientos estipulados en el mismo (figura 10 y 11), en el cual se indica que dentro de un rango comprendido entre $0.8T$ y $1.2T$ las ordenadas espectrales de los espectros no pueden ser menores al 80% del espectro de diseño y de igual manera el promedio de las ordenadas espectrales no debe ser menor a las del espectro de diseño en un rango $0.2T$ y $1.5T$, siendo T el periodo fundamental de la estructura.

Figura 9.

Acelerograma del sismo Loma Prieta escalado en el software SeismoMatch



Nota: La figura representa el acelerograma del sismo Loma Prieta escalado al espectro de diseño, procedimiento realizado en todos los acelerogramas seleccionados.

Figura 10.

Verificación del primer requisito para los espectros escalados de los sismos seleccionados

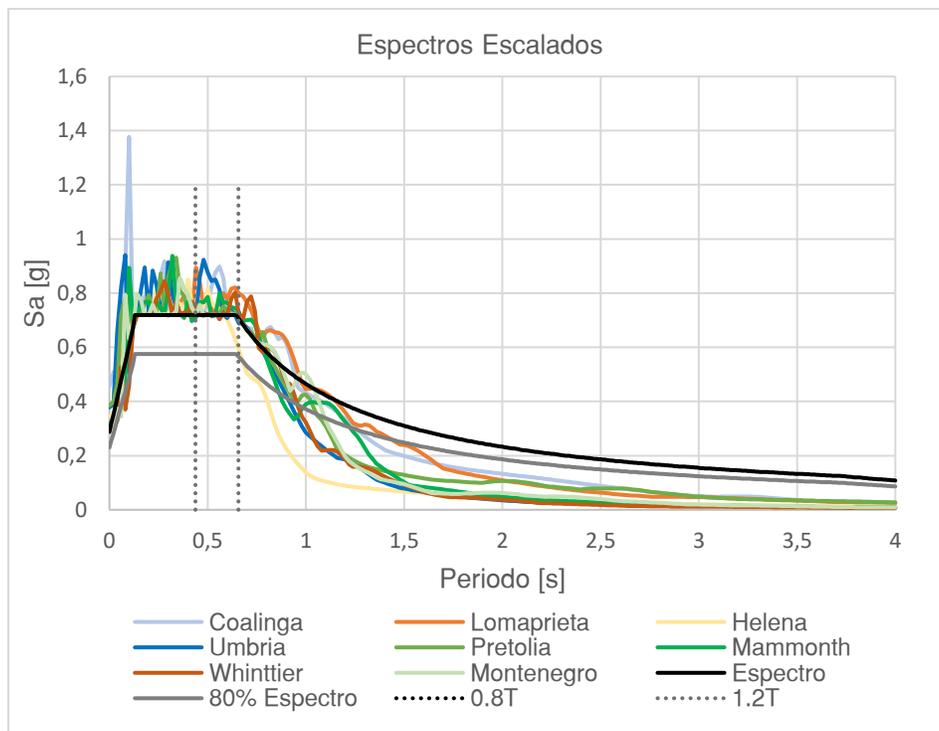
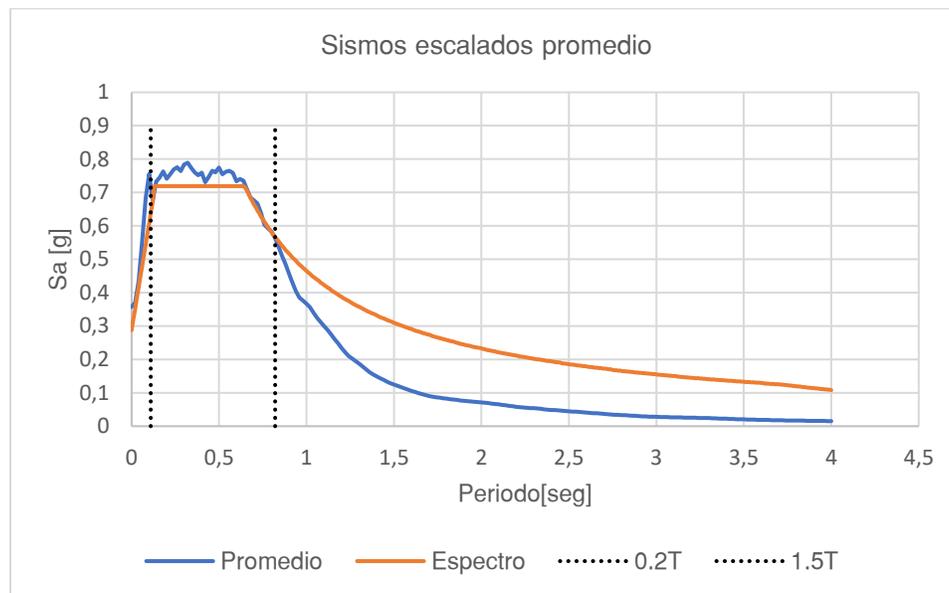


Figura 11

Verificación del segundo requisito para el promedio de los espectros escalados de los sismos seleccionados



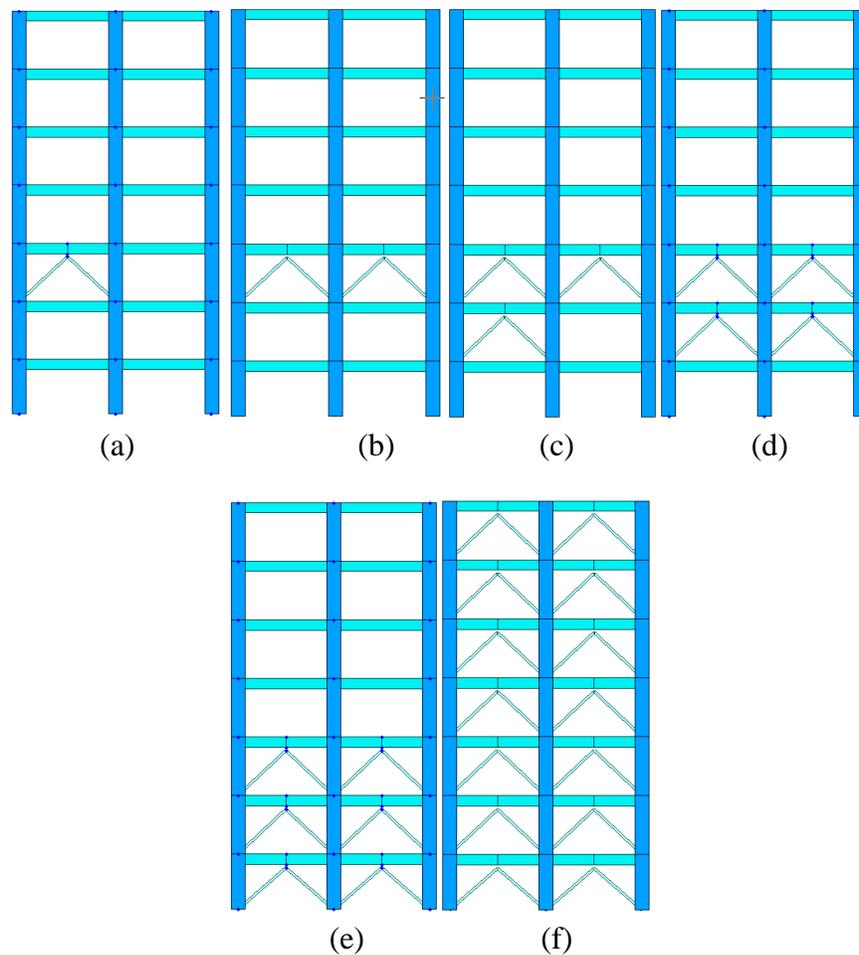
3.5. Cantidad de Modelos.

Con el objetivo de determinar y restringir el número de modelos a realizar, teniendo como variables la posición y cantidad de disipadores históricos de placas ranuradas, se estableció que estos se situarían en los primeros 3 pisos de la estructura, ya que en los niveles inferiores se presentan las fuerzas cortantes más grandes y se planteaba como hipótesis que al incorporar dispositivos en estos niveles se obtendría mejores resultados. Así mismo, se contarían como cantidades constantes 0, 1, 2, 3, 4 y 6 disipadores.

En adición, se determinó un modelo en el cual se tendrían disipadores en cada uno de los pisos del pórtico. En la figura 12 se pueden apreciar algunos ejemplos de los modelos y en el apéndice B se encuentra la representación gráfica de cada modelo.

Figura 12

Representación gráfica para algunos modelos



Nota: La figura corresponde a la representación gráfica de algunos modelos a) Modelo con un disipador [Modelo 4], b) Modelo con dos disipadores [Modelo 7], c) Modelo con 3 disipadores

[Modelo 22], d) Modelo con 4 disipadores [Modelo 24], e) Modelo con 6 disipadores [Modelo 33] y f) Modelo con 14 disipadores [Modelo 34].

De ese modo, se obtuvieron 34 modelos y en la tabla 4 se presenta el número de modelos en función de la cantidad de disipadores.

Tabla 4

Cantidad de modelos

Número de Disipadores	Número de Simulaciones
0	1
1	3
2	9
3	10
4	9
6	1
14	1
Total	34

3.6. Selección y Modelamiento del Disipador.

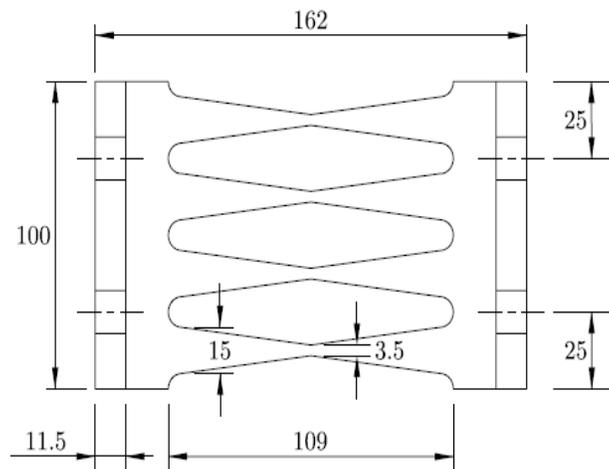
El disipador seleccionado para la ejecución del trabajo corresponde a un diseño optimizado de un disipador de placas ranuradas existente. El disipador original fue desarrollado por Chan &

Albermani (2008) y posteriormente, su geometría fue optimizada por Chan et al (2010). Estos autores utilizaron el algoritmo de optimización topológica y de forma llamado BESO, el cual maximiza la disipación plástica total a través de la eliminación de partes ineficientes y el mejoramiento de las restantes. Este disipador de acero tiene un 37% más de capacidad de disipación de energía respecto a su antecesor, así como, una mayor distribución de la tensión y menor concentración de esfuerzos (R. Chan et al., 2010).

En la figura 13 se puede apreciar la forma óptima del disipador, al igual que sus respectivas dimensiones.

Figura 13

Diseño optimizado de Disipador Histerético de Placas Ranuradas



Nota: La figura representa el disipador seleccionado de forma esquemática donde todas las medidas se encuentran en milímetros. Tomado de *shape optimization of metallic yielding devices*

for passive mitigation of seismic energy (p. 2265), por Chan et al., 2010, Engineering Structures 32.

En la tabla 5 se presentan las propiedades del disipador histerético de placas ranuradas obtenidas del estudio anteriormente mencionado (R. Chan et al., 2010):

Tabla 5

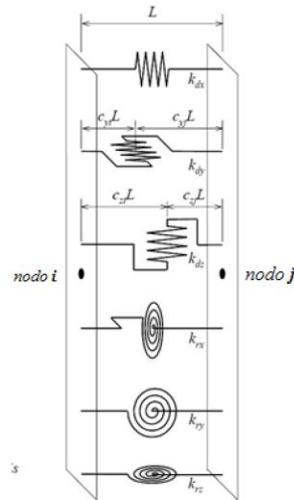
Propiedades del diseño optimizado del disipador histerético de placas ranuradas.

Propiedad	Valor
Masa [kg]	2
Amortiguamiento efectivo	0
Rigidez elástica [kN/mm]	4.22
Fuerza de fluencia [kN]	9.1
Relación de rigidez pos-fluencia	0.01

La modelación de los disipadores en el software Midas Gen se realizó mediante elementos “link” o “liga” (figura 14), los cuales para el modo de análisis empleado en el presente estudio se definieron tipo fuerza. Migas Gen (como se citó en Nangullasmú Hernández & Tena Colunga, 2017) indica que este tipo de definición “reflejan la no linealidad de manera indirecta convirtiendo las fuerzas de los elementos, calculadas a partir de las propiedades no lineales, a fuerzas externas”.

Figura 14

Modelamiento de elementos estructurales tipo Liga en MIDAS Gen.



Nota: Tomado de Modelado de disipadores histéricos de energía en estructuras de concreto reforzado. Diferencia entre análisis en el plano y en tres dimensiones (p.140), por Nangullasmú & Tena, 2017, Revista Internacional de Ingeniería de Estructura.

A estos elementos se le asignaron las propiedades mostradas en la tabla 5 (figura 15) y cabe mencionar que la rigidez ingresada está asociada con la dirección local Z del disipador (dirección horizontal) (figura 16), correspondiente a la dirección X (dirección horizontal) del sistema global.

Figura 15

Asignación de propiedades a los elementos tipo Liga en MIDAS Gen.

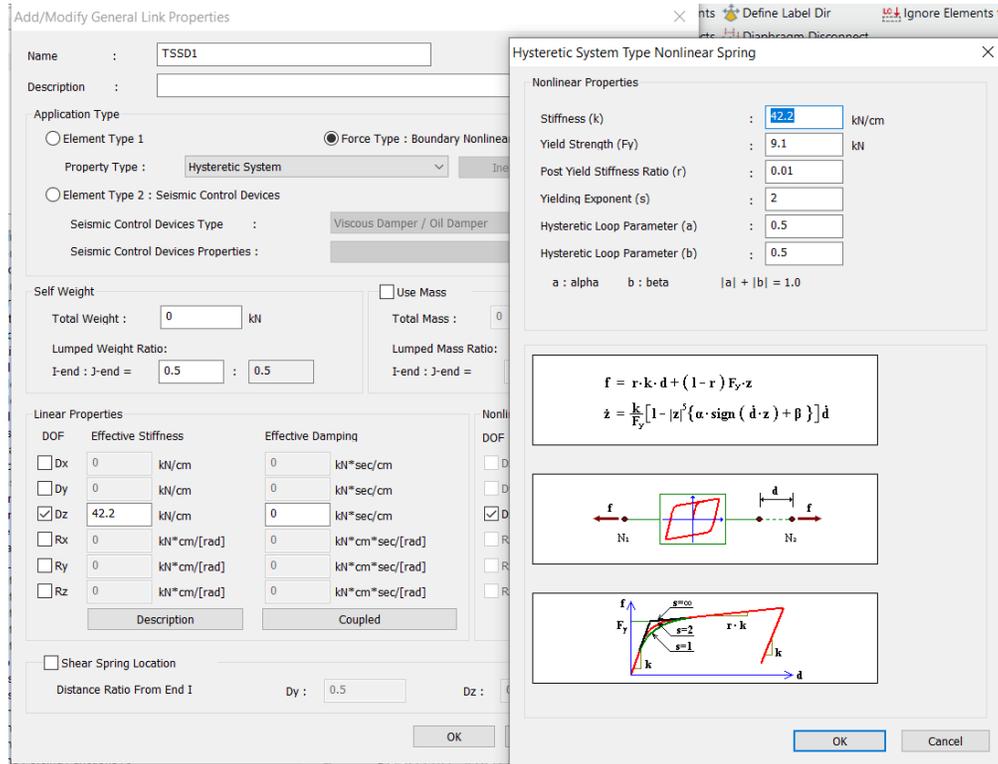
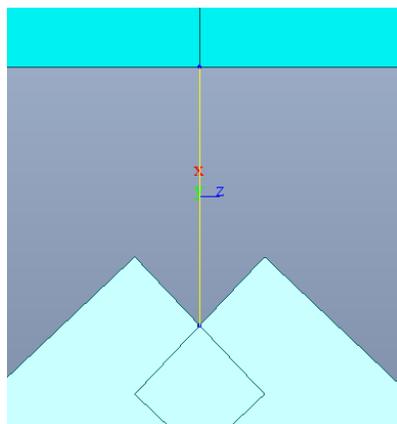


Figura 16

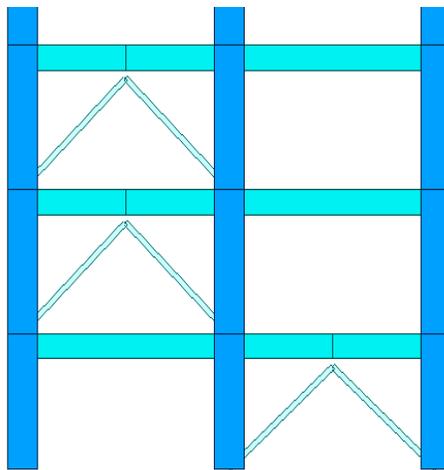
Ejes locales del disipador en MIDAS Gen.



Los disipadores están apoyados sobre un sistema de contraventeo chevrón (figura 17), cuyo material corresponde a un acero A500 con las propiedades correspondientes según el ASTM y su sección transversal es un perfil tipo HSS4X4X0.250.

Figura 17

Pórtico con disipadores y contraventeos ya incorporados en el sistema estructural



La selección de material y sección transversal de los contraventeos se hizo tal que, estos tuvieran una rigidez elástica suficientemente mayor a la rigidez del disipador, para que estos no fallaran tras la aplicación de los sismos.

La descripción detallada acerca del protocolo realizado en el software se encuentra en el apéndice C.

3.7. Asignación de Rotulas Plásticas.

La asignación de las rotulas plásticas a los elementos estructurales se realizó utilizando la tabla 6-7 y la tabla 6-8 del FEMA, las cuales permiten determinar los coeficientes a,b,c, IO, LS y CP. Estos coeficientes están relacionados con la cuantía de acero, el cortante actuante y la carga axial, por lo que se asignó un acero de refuerzo tanto en vigas como en columnas. También fue necesario el momento de fluencia, el cual se calculó por el método de Park mediante la ecuación 10 (Young JL, 1985).

$$M_y = 0.5f'_c b d^2 [(1 + \beta_c - \eta)\eta_0 + (2 - \eta)p_t + (\eta - 2\beta_c)\alpha_c p'_t] \quad (Ec. 10)$$

Donde:

$$\beta_c = \frac{d'}{d}; \quad \eta = \frac{0.75}{1+\alpha_y} \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_0}\right)^{0.7}; \quad \alpha_y = \frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_0}; \quad \eta_0 = \frac{P_0}{b d f'_c}; \quad p_t = \frac{A_s f_y}{b d f'_c}; \quad (Ec. 11)$$

$$p_t = \frac{A_s f_y}{b d f'_c}; \quad p'_t = \frac{A'_s f_y}{b d f'_c}; \quad \varepsilon_c = \phi_y d - \varepsilon_y \leq \varepsilon_u; \quad \alpha_c = (1 - \beta_c) \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_y} - \beta_c - 1$$

$$\phi_y = \left[1.05 + (c_2 - 1.05) \frac{\eta_0}{0.03} \right] \frac{\varepsilon_y}{(1-k)d}; \quad c_2 = 1 + \frac{0.45}{0.84+p_t}$$

$$k = \sqrt{(p_t + p'_t)^2 \frac{1}{4\alpha_y^2} + (p_t + \beta_c p'_t) \frac{1}{\alpha_y} - (p_t + p'_t) \frac{1}{2\alpha_y}}$$

b, d, d' corresponde a la base, la altura efectiva y el recubrimiento del refuerzo que trabaja a compresión respectivamente.

$F_y, \varepsilon_y, f'_c, \varepsilon_0$ corresponde al límite de fluencia del acero, deformación de fluencia, resistencia máxima a la compresión del concreto y la deformación asociada a la resistencia máxima del concreto respectivamente. $P_0, \varepsilon_c, \varepsilon_u, A_s, A'_s$ son la carga axial que tiene el elemento, la

deformación del acero a compresión, la deformación última, área de refuerzo a tracción y área de refuerzo a compresión respectivamente (RodolfoJavier, 2017).

Tras la asignación se evidenció que se presentan rótulas plásticas en el pórtico previo a la incorporación de disipadores. En el apéndice C se encuentra la descripción del modelamiento del pórtico con y sin disipadores y la implementación del análisis dinámico no lineal en el software de análisis estructural Midas Gen

3.8. Método de Análisis Dinámico.

El análisis dinámico tiempo historia se ejecutó empleando el método de integración directa, específicamente, el método de Newmark. Los parámetros de integración tomados en consideración fueron $\gamma=1/2$ y $\beta=1/4$, los cuales corresponden al procedimiento donde se supone que el cambio de la aceleración en un paso de tiempo es lineal.

En relación al amortiguamiento, se empleó el método de Rayleigh o método de masa y rigidez proporcional, en el cual se asume que los valores de las fracciones de amortiguamiento son iguales y equivalentes al 5% para los periodos vinculados al periodo fundamental y al periodo donde se activó el 90 % de la masa. En el apéndice X se presenta el protocolo realizado en software Midas Gen para la ejecución de este análisis.

4. Resultados

Mediante un análisis dinámico no lineal en el software Midas gen, se procedió a obtener los desplazamientos de la estructura para cada acelerograma en los 34 modelos planteados. Para esto, se determinó el tiempo en el que se obtenía el máximo desplazamiento en el último nivel y en ese mismo tiempo se hallaron los desplazamientos en los niveles restantes; dicha metodología se basó en la empleada por Corredor y Ariza (2019).

Según lo establecido en el inciso (a) del capítulo A.2.7.1 de la NSR-10, se calculó el valor promedio de los resultados obtenidos con todos los acelerogramas en vez de los valores máximos con cada uno de estos. En las tablas 6 y 7 se presentan respectivamente los valores de los desplazamientos horizontales y las derivas de piso calculadas para el modelo sin disipadores (MSD).

Tabla 6

Desplazamientos horizontales por piso modelo sin disipadores (MSD)

Desplazamientos horizontales por piso [cm]								
Nivel	0	1	2	3	4	5	6	7
MSD	0.0000	0.406	1.738	3.798	6.012	7.885	9.263	10.197

Tabla 7

Porcentaje de deriva por piso modelo sin disipadores (MSD)

Deriva por piso [%]								
Nivel	0	1	2	3	4	5	6	7
MSD	0.000%	0.169%	0.522%	0.808%	0.868%	0.735%	0.540%	0.367%

Del mismo modo, en la tabla tablas 8 y 9, se presentan respectivamente los resultados de los desplazamientos horizontales y de deriva de piso para todos los modelos. En el apéndice D se pueden apreciar los resultados obtenidos de manera gráfica.

Tabla 8

Desplazamientos horizontales por piso para los 34 modelos realizados.

Desplazamientos horizontales por piso [cm]								
Modelo	Nivel							
	0	1	2	3	4	5	6	7
M2	0.000	0.466	1.853	3.870	5.992	7.795	9.089	9.995
M3	0.000	0.451	1.827	3.850	5.954	7.662	8.758	9.367
M4	0.000	0.404	1.664	3.527	5.458	7.035	8.161	8.999
M5	0.000	0.416	1.776	3.828	5.934	7.609	8.775	9.636
M6	0.000	0.430	1.704	3.642	5.713	7.338	8.305	8.818
M7	0.000	0.511	1.968	3.897	5.771	7.192	8.011	8.450

M8	0.000	0.547	1.454	3.487	5.522	7.294	8.667	9.784
M9	0.000	0.437	1.795	3.780	5.788	7.317	8.262	8.810
M10	0.000	0.430	1.669	3.479	5.357	6.860	7.934	8.748
M11	0.000	0.421	1.766	3.805	5.929	7.625	8.692	9.281
M12	0.000	0.450	1.813	3.795	5.819	7.386	8.330	8.837
M13	0.000	0.457	1.831	3.823	5.795	7.241	8.142	8.541
M14	0.000	0.408	1.499	3.514	5.411	6.959	8.072	8.905
M15	0.000	0.404	1.679	3.604	5.633	7.276	8.279	8.812
M16	0.000	0.419	1.681	3.529	5.411	6.876	7.766	8.237
M17	0.000	0.416	1.735	3.719	5.771	7.396	8.403	8.948
M18	0.000	0.397	1.595	3.376	5.282	6.882	8.042	8.917
M19	0.000	0.441	1.829	3.903	6.008	7.613	8.574	9.092
M20	0.000	0.452	1.828	3.806	5.819	7.385	8.312	8.798
M21	0.000	0.492	1.856	3.683	5.477	6.831	7.625	8.067
M22	0.000	0.456	1.787	3.643	5.511	6.915	7.729	8.189
M23	0.000	0.394	1.652	3.557	5.534	7.152	8.289	9.086
M24	0.000	0.387	1.494	3.099	4.764	6.052	6.846	7.313
M25	0.000	0.416	1.617	3.311	5.089	6.571	7.626	8.408
M26	0.000	0.439	1.781	3.776	5.821	7.365	8.256	8.815
M27	0.000	0.418	1.660	3.431	5.177	6.491	7.280	7.724
M28	0.000	0.456	1.773	3.648	5.551	6.999	7.853	8.315
M29	0.000	0.477	1.847	3.760	5.663	7.089	7.901	8.324

M30	0.000	0.412	1.693	3.594	5.530	7.013	7.887	8.343
M31	0.000	0.474	1.824	3.679	5.482	6.814	7.600	8.043
M32	0.000	0.389	1.590	3.355	5.128	6.468	7.273	7.725
M33	0.000	0.387	1.536	3.196	4.825	6.026	6.767	7.201
M34	0.0000	0.425	1.604	3.207	4.644	5.598	6.157	6.505

Nota: La columna 1, Modelo, hace referencia al modelo según la cantidad y posición de los disipadores que tenga, por ejemplo, M2 hace referencia al modelo 2.

Tabla 9

Porcentaje de deriva por piso para los 34 modelos realizados

Deriva por piso [%]								
Modelo	Nivel							
	0	1	2	3	4	5	6	7
M2	0.000%	0.194%	0.544%	0.791%	0.832%	0.707%	0.507%	0.356%
M3	0.000%	0.188%	0.540%	0.793%	0.825%	0.670%	0.430%	0.240%
M4	0.000%	0.168%	0.494%	0.731%	0.757%	0.618%	0.442%	0.329%
M5	0.000%	0.173%	0.533%	0.805%	0.826%	0.657%	0.457%	0.338%
M6	0.000%	0.179%	0.500%	0.760%	0.812%	0.637%	0.379%	0.201%
M7	0.000%	0.213%	0.571%	0.757%	0.735%	0.557%	0.321%	0.172%
M8	0.000%	0.228%	0.356%	0.798%	0.798%	0.695%	0.538%	0.438%
M9	0.000%	0.182%	0.532%	0.778%	0.787%	0.600%	0.371%	0.215%

M10	0.000%	0.179%	0.486%	0.710%	0.736%	0.589%	0.421%	0.319%
M11	0.000%	0.175%	0.528%	0.799%	0.833%	0.665%	0.419%	0.231%
M12	0.000%	0.187%	0.535%	0.777%	0.794%	0.615%	0.370%	0.199%
M13	0.000%	0.190%	0.539%	0.781%	0.773%	0.567%	0.353%	0.156%
M14	0.000%	0.170%	0.428%	0.790%	0.744%	0.607%	0.437%	0.326%
M15	0.000%	0.168%	0.500%	0.755%	0.795%	0.644%	0.394%	0.209%
M16	0.000%	0.175%	0.495%	0.725%	0.738%	0.575%	0.349%	0.185%
M17	0.000%	0.174%	0.517%	0.778%	0.805%	0.637%	0.395%	0.214%
M18	0.000%	0.166%	0.470%	0.699%	0.747%	0.627%	0.455%	0.343%
M19	0.000%	0.184%	0.544%	0.813%	0.826%	0.629%	0.377%	0.203%
M20	0.000%	0.188%	0.539%	0.776%	0.789%	0.614%	0.363%	0.190%
M21	0.000%	0.205%	0.535%	0.717%	0.703%	0.531%	0.311%	0.173%
M22	0.000%	0.190%	0.522%	0.728%	0.733%	0.551%	0.319%	0.181%
M23	0.000%	0.164%	0.493%	0.747%	0.775%	0.634%	0.446%	0.313%
M24	0.000%	0.161%	0.461%	0.669%	0.693%	0.537%	0.331%	0.194%
M25	0.000%	0.173%	0.471%	0.664%	0.697%	0.581%	0.413%	0.307%
M26	0.000%	0.183%	0.526%	0.782%	0.802%	0.606%	0.349%	0.219%
M27	0.000%	0.174%	0.487%	0.694%	0.685%	0.515%	0.310%	0.174%
M28	0.000%	0.190%	0.517%	0.735%	0.747%	0.568%	0.335%	0.181%
M29	0.000%	0.199%	0.537%	0.750%	0.746%	0.559%	0.319%	0.166%
M30	0.000%	0.172%	0.502%	0.746%	0.759%	0.581%	0.343%	0.179%
M31	0.000%	0.197%	0.529%	0.727%	0.707%	0.523%	0.308%	0.174%

M32	0.000%	0.162%	0.471%	0.692%	0.695%	0.526%	0.316%	0.177%
M33	0.000%	0.161%	0.451%	0.651%	0.639%	0.471%	0.290%	0.170%
M34	0.000%	0.177%	0.462%	0.629%	0.564%	0.374%	0.219%	0.136%

Nota: La columna 1, Modelo, hace referencia al modelo según la cantidad y posición de los disipadores que tenga, por ejemplo, M2 hace referencia al modelo 2.

4.1. Ajuste de Resultados

Tras la realización de un análisis dinámico no lineal, el apartado A.5.5.3 de la NSR-10 indica que es preciso hacer un ajuste a los resultados si el cortante basal obtenido por el análisis dinámico V_{ij} es menor que el cortante basal obtenido por el método de fuerza horizontal equivalente V_s ; en dado caso, los resultados deberán ser multiplicados por el factor presentado en la ecuación 12.

$$F_R = \frac{V_s}{V_{tj}} \quad (Ec. 12)$$

En consideración a lo anterior, se calculó el cortante basal en cada modelo para cada método y en el caso del análisis dinámico no lineal se promediaron los resultados obtenidos con cada acelerograma. A partir de esto, se determinó si es necesario el ajuste para cada modelo como se aprecia en la tabla 10.

Tabla 10*Factor de ajuste para cada modelo.*

Ajuste de resultados											
Modelo	Análisis dinámico no lineal [KN]									FHE	Fr
	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	Vjt	[KN]	
										Prom.	
MSD	627.0	620.2	688.7	586.1	590.3	638.1	625.0	665.4	630.1	985.2	1.56
M2	626.3	628.7	690.3	573.0	633.3	663.0	614.2	671.7	637.6	985.5	1.55
M3	623.3	620.2	716.7	561.3	643.3	672.2	630.0	692.2	644.9	985.8	1.53
M4	622.3	630.0	711.8	564.5	627.7	671.6	626.2	679.4	641.6	985.8	1.54
M5	625.6	635.7	692.6	576.3	657.0	689.2	610.9	678.0	645.7	985.8	1.53
M6	663.1	628.6	736.8	552.0	629.7	660.8	640.2	675.0	648.3	986.5	1.52
M7	684.5	639.2	734.5	558.4	621.2	665.4	641.4	648.7	649.2	986.5	1.52
M8	624.1	627.1	718.6	557.9	631.2	671.5	624.5	694.7	643.7	986.2	1.53
M9	637.7	635.2	716.0	561.0	612.3	665.1	627.9	693.2	643.6	986.2	1.53
M10	672.2	626.1	734.7	554.9	630.1	663.5	638.4	662.8	647.8	986.5	1.52
M11	624.1	627.1	718.6	557.9	631.5	678.7	624.0	694.7	644.6	986.2	1.53
M12	637.7	631.5	713.8	561.0	612.3	672.6	623.7	693.3	643.2	986.2	1.53
M13	668.1	629.1	735.1	554.9	622.4	660.5	639.6	664.1	646.7	986.5	1.53
M14	671.6	632.6	737.2	551.3	622.6	655.5	632.1	666.8	646.2	986.9	1.53
M15	676.3	631.6	736.8	551.3	615.7	665.8	630.7	664.0	646.5	986.9	1.53

M16	658.2	632.7	748.8	545.4	614.0	646.4	648.6	635.2	641.1	987.2	1.54
M17	676.6	632.6	736.5	551.3	622.7	662.9	636.9	666.8	648.3	986.9	1.52
M18	676.4	629.3	737.3	551.3	623.0	655.1	630.4	664.0	645.8	986.9	1.53
M19	636.3	632.0	720.6	554.7	601.4	656.9	617.6	696.8	639.5	986.5	1.54
M20	650.9	635.7	716.5	557.5	611.5	687.1	620.3	695.3	646.8	986.5	1.53
M21	643.7	631.6	751.4	548.6	640.9	649.8	646.5	622.2	641.8	987.2	1.54
M22	685.3	641.9	737.3	554.6	600.2	651.1	641.8	641.5	644.2	986.9	1.53
M23	667.9	632.4	738.2	548.5	629.9	652.2	630.7	677.0	647.1	986.9	1.53
M24	637.3	636.5	757.1	555.3	689.8	638.3	629.3	611.5	644.4	987.9	1.53
M25	682.3	644.1	740.5	550.9	601.4	671.6	641.9	634.8	646.0	987.2	1.53
M26	670.8	635.3	739.7	545.1	620.5	680.4	630.8	671.2	649.2	987.2	1.52
M27	638.6	635.6	753.5	544.7	647.3	657.9	648.4	622.4	643.5	987.6	1.53
M28	650.3	635.0	750.3	541.6	650.5	664.9	647.3	643.3	647.9	987.6	1.52
M29	673.3	634.6	739.2	547.6	593.9	653.1	632.8	664.7	642.4	987.2	1.54
M30	650.3	635.0	750.3	541.6	650.5	664.9	647.3	643.3	647.9	987.2	1.52
M31	650.6	635.0	750.3	541.6	650.5	664.8	641.6	643.2	647.2	987.5	1.53
M32	638.6	633.3	753.5	544.7	647.3	653.8	648.3	622.5	642.7	987.6	1.54
M33	637.8	639.2	757.5	559.1	657.3	661.2	631.4	610.7	644.2	988.6	1.53
M34	649.8	626.1	690.8	557.9	627.7	661.3	632.3	604.6	631.3	994.1	1.57

Nota: La columna 1, Modelo, hace referencia al modelo según la cantidad y posición de los disipadores que tenga, por ejemplo, M2 hace referencia al modelo 2. MSD corresponde al modelo sin disipadores.

En las tablas 11 y 12 se presentan los valores los desplazamientos horizontales por piso y porcentaje de deriva por piso corregidos para los 34 modelos.

Tabla 11

Desplazamientos horizontales por piso corregidos para los 34 modelos realizados.

Desplazamientos horizontales ajustados por piso [cm]								
Nivel	0	1	2	3	4	5	6	7
MSD	0,000	0,635	2,717	5,938	9,399	12,327	14,482	15,943
M2	0,000	0,720	2,865	5,982	9,262	12,050	14,049	15,450
M3	0,000	0,689	2,793	5,886	9,102	11,713	13,388	14,323
M4	0,000	0,621	2,557	5,420	8,387	10,809	12,538	13,827
M5	0,000	0,635	2,711	5,845	9,061	11,617	13,398	14,713
M6	0,000	0,654	2,594	5,542	8,694	11,166	12,638	13,419
M7	0,000	0,776	2,990	5,923	8,771	10,930	12,175	12,842
M8	0,000	0,837	2,227	5,342	8,460	11,175	13,278	14,989
M9	0,000	0,670	2,750	5,792	8,869	11,213	12,661	13,501
M10	0,000	0,655	2,542	5,298	8,158	10,446	12,081	13,322
M11	0,000	0,644	2,702	5,821	9,072	11,665	13,298	14,200
M12	0,000	0,689	2,780	5,818	8,921	11,324	12,771	13,549
M13	0,000	0,696	2,792	5,831	8,839	11,045	12,419	13,028
M14	0,000	0,623	2,290	5,367	8,264	10,627	12,327	13,599
M15	0,000	0,616	2,562	5,502	8,598	11,105	12,637	13,451

M16	0,000	0,645	2,589	5,434	8,331	10,587	11,958	12,684
M17	0,000	0,634	2,642	5,661	8,785	11,258	12,791	13,622
M18	0,000	0,607	2,437	5,159	8,071	10,516	12,289	13,626
M19	0,000	0,680	2,821	6,020	9,268	11,743	13,225	14,024
M20	0,000	0,689	2,787	5,805	8,875	11,263	12,677	13,417
M21	0,000	0,757	2,854	5,665	8,424	10,507	11,728	12,408
M22	0,000	0,698	2,738	5,581	8,443	10,594	11,840	12,545
M23	0,000	0,601	2,519	5,425	8,440	10,907	12,641	13,856
M24	0,000	0,593	2,290	4,751	7,303	9,277	10,495	11,211
M25	0,000	0,636	2,472	5,060	7,777	10,043	11,654	12,849
M26	0,000	0,668	2,709	5,741	8,851	11,201	12,554	13,404
M27	0,000	0,641	2,548	5,265	7,944	9,960	11,172	11,852
M28	0,000	0,695	2,703	5,560	8,461	10,669	11,969	12,674
M29	0,000	0,733	2,839	5,778	8,702	10,894	12,142	12,792
M30	0,000	0,633	2,602	5,526	8,504	10,783	12,127	12,828
M31	0,000	0,723	2,783	5,613	8,364	10,398	11,596	12,272
M32	0,000	0,597	2,443	5,154	7,878	9,938	11,175	11,870
M33	0,000	0,594	2,358	4,904	7,403	9,247	10,383	11,049
M34	0,000	0,669	2,525	5,050	7,313	8,815	9,695	10,242

Nota: La columna 1, Modelo, hace referencia al modelo según la cantidad y posición de los disipadores que tenga, por ejemplo, M2 hace referencia al modelo 2. MSD corresponde al modelo sin disipadores.

Tabla 12*Porcentaje de deriva por piso corregido para los 34 modelos realizados*

Deriva ajustadas por piso [%]								
Nivel	0	1	2	3	4	5	6	7
M2	0,000%	0,265%	0,816%	1,263%	1,357%	1,148%	0,845%	0,573%
M3	0,000%	0,300%	0,841%	1,222%	1,286%	1,093%	0,784%	0,550%
M4	0,000%	0,287%	0,825%	1,213%	1,261%	1,024%	0,657%	0,367%
M5	0,000%	0,259%	0,759%	1,123%	1,164%	0,950%	0,678%	0,505%
M6	0,000%	0,264%	0,814%	1,229%	1,261%	1,003%	0,698%	0,516%
M7	0,000%	0,272%	0,761%	1,156%	1,236%	0,969%	0,577%	0,306%
M8	0,000%	0,323%	0,868%	1,150%	1,117%	0,847%	0,488%	0,262%
M9	0,000%	0,349%	0,545%	1,222%	1,222%	1,065%	0,825%	0,671%
M10	0,000%	0,279%	0,816%	1,193%	1,207%	0,919%	0,568%	0,329%
M11	0,000%	0,273%	0,740%	1,081%	1,122%	0,897%	0,641%	0,486%
M12	0,000%	0,268%	0,807%	1,223%	1,275%	1,017%	0,640%	0,354%
M13	0,000%	0,287%	0,820%	1,191%	1,217%	0,942%	0,567%	0,305%
M14	0,000%	0,290%	0,822%	1,192%	1,180%	0,865%	0,539%	0,239%
M15	0,000%	0,260%	0,654%	1,207%	1,136%	0,927%	0,667%	0,499%
M16	0,000%	0,257%	0,763%	1,153%	1,214%	0,983%	0,601%	0,319%
M17	0,000%	0,269%	0,762%	1,116%	1,136%	0,885%	0,537%	0,285%
M18	0,000%	0,264%	0,787%	1,184%	1,225%	0,970%	0,601%	0,326%
M19	0,000%	0,253%	0,718%	1,067%	1,142%	0,959%	0,695%	0,524%

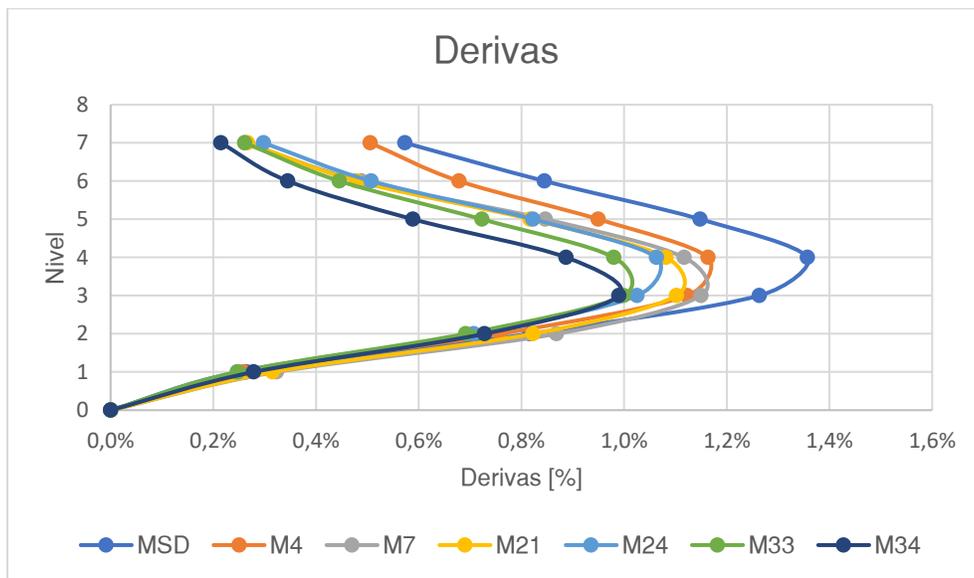
M20	0,000%	0,283%	0,839%	1,255%	1,274%	0,971%	0,581%	0,313%
M21	0,000%	0,287%	0,823%	1,183%	1,204%	0,937%	0,554%	0,290%
M22	0,000%	0,315%	0,822%	1,102%	1,082%	0,817%	0,479%	0,267%
M23	0,000%	0,291%	0,800%	1,115%	1,122%	0,843%	0,489%	0,277%
M24	0,000%	0,250%	0,752%	1,140%	1,182%	0,968%	0,680%	0,477%
M25	0,000%	0,247%	0,707%	1,025%	1,063%	0,823%	0,508%	0,298%
M26	0,000%	0,265%	0,720%	1,015%	1,066%	0,888%	0,632%	0,469%
M27	0,000%	0,278%	0,800%	1,189%	1,220%	0,922%	0,530%	0,333%
M28	0,000%	0,267%	0,748%	1,066%	1,051%	0,791%	0,475%	0,267%
M29	0,000%	0,290%	0,787%	1,120%	1,138%	0,866%	0,510%	0,276%
M30	0,000%	0,305%	0,826%	1,153%	1,147%	0,860%	0,490%	0,255%
M31	0,000%	0,264%	0,772%	1,147%	1,168%	0,894%	0,527%	0,275%
M32	0,000%	0,301%	0,808%	1,110%	1,079%	0,797%	0,470%	0,265%
M33	0,000%	0,249%	0,724%	1,063%	1,068%	0,808%	0,485%	0,273%
M34	0,000%	0,248%	0,692%	0,998%	0,980%	0,723%	0,446%	0,261%

Nota: La columna 1, Modelo, hace referencia al modelo según la cantidad y posición de los disipadores que tenga, por ejemplo, M2 hace referencia al modelo 2. MSD corresponde al modelo sin disipadores.

Con base a los resultados ajustados se realizó un análisis gráfico entre los modelos con y sin disipadores (ver apéndice E), en donde se evidencia la influencia que tiene la ubicación de los disipadores en la respuesta dinámica de la estructura, puesto que en los modelos en los que se

Figura 19

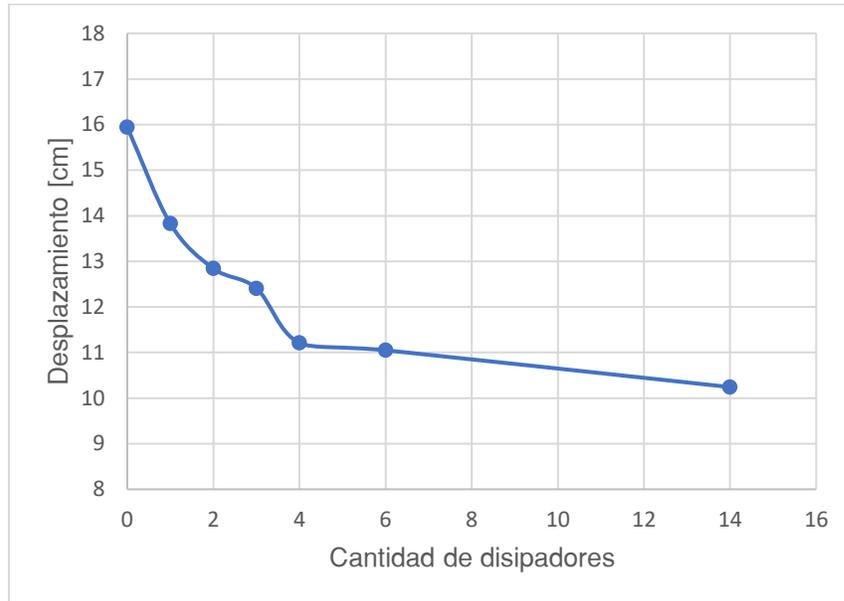
Representación gráfica de las derivas para los mejores modelos con 1,2,3,4,6 y 14 disipadores vs modelo sin disipadores (MSD).



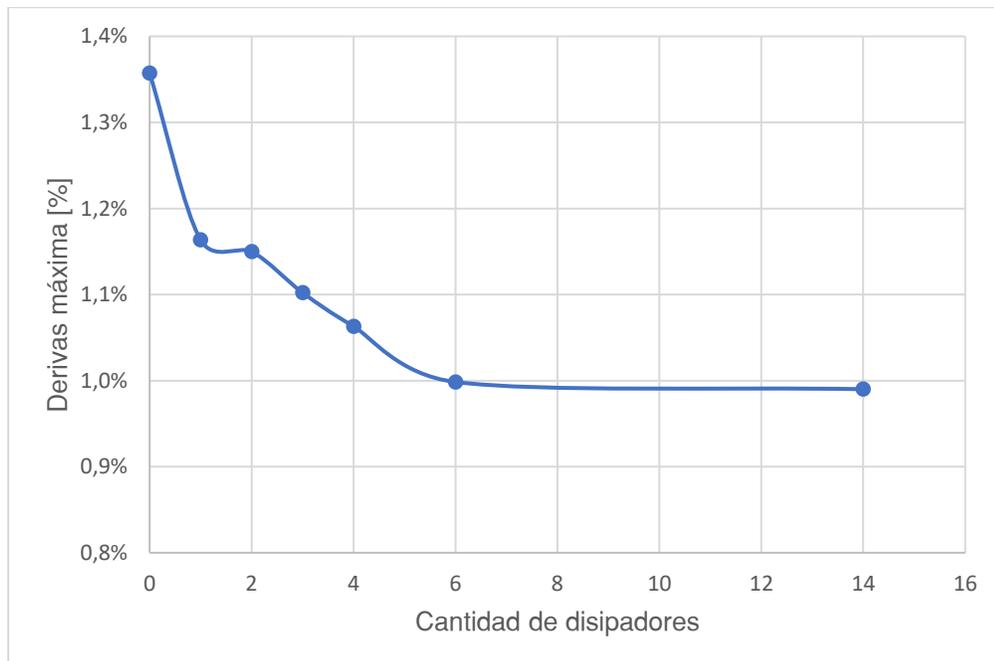
En las figuras 20 y 21 se presentan los desplazamientos y derivas máximas en función del número de disipadores asignados en los modelos previamente seleccionados. Los desplazamientos corresponden a los resultados obtenidos en el último nivel, puesto que allí es donde la estructura presenta los máximos valores. Tanto en la gráfica 20 y 21 se observa que existe una notable reducción en los valores desde 0 hasta 4 disipadores, en comparación con la reducción presentada con más de 4 disipadores, la cual tiende a ser constante.

Figura 20

Representación gráfica del desplazamiento del último nivel en función del número de disipadores.

**Figura 21**

Representación gráfica de la deriva máxima función del número de disipadores.



Con el objetivo de visualizar de manera efectiva la reducción mencionada anteriormente, se presentan mediante diagramas de barras (figura 22 y figura 23) los porcentajes de reducción de derivas máximas y desplazamientos, los cuales, tienen como punto de comparación el modelo sin disipadores.

Figura 22

Representación gráfica de la reducción del desplazamiento del último nivel en función del número de disipadores

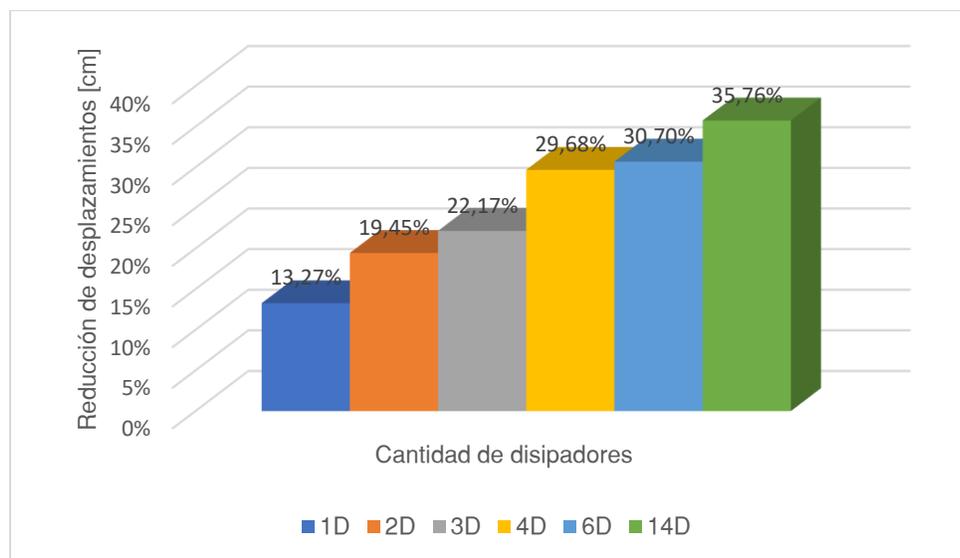
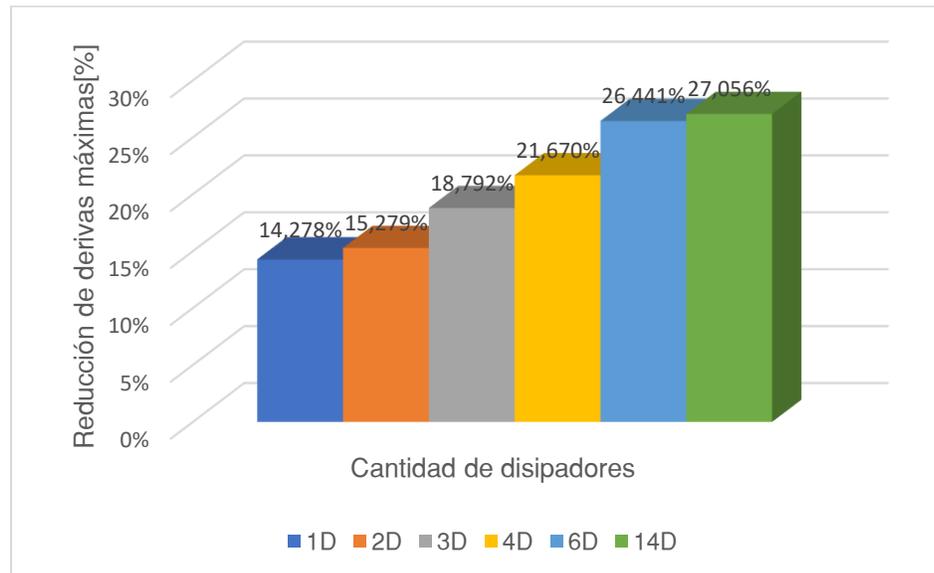


Figura 23

Representación gráfica de la reducción de la deriva máxima en función del número de disipadores.

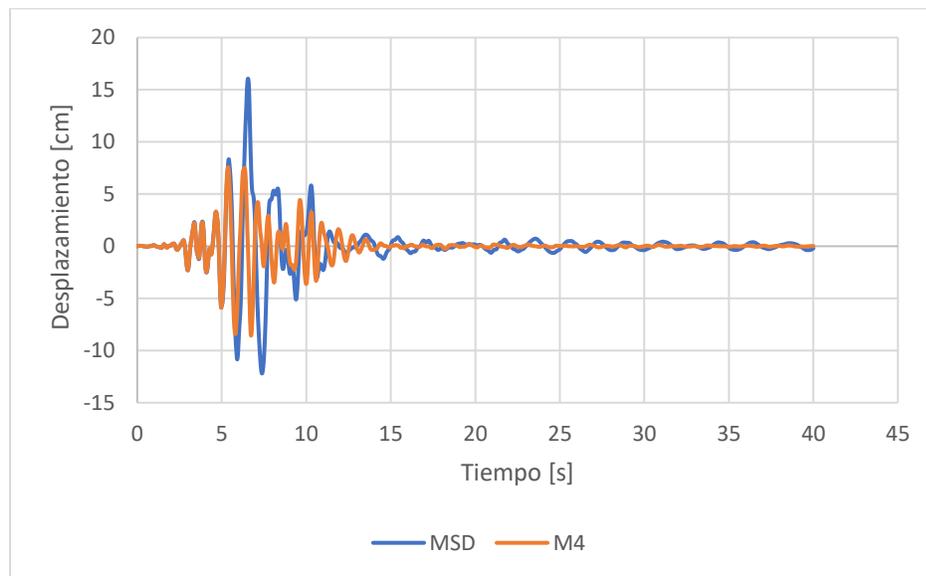


En general, se puede observar una reducción de la deriva máxima del pórtico desde un 14% cuando se incorporan un disipador hasta un 27% cuando se incorporan 14 disipadores. En cuanto a los desplazamientos horizontales la reducción varía de 13% hasta 36%. Es preciso destacar que, para la muestra de estudio de los modelos de pórticos con disipadores, los modelos 24 con 4 disipadores, 33 con 6 disipadores y 34 con 14 disipadores fueron los que presentaron la mayor reducción de derivas y desplazamientos horizontales.

Como información adicional, se analizó mediante gráficas en estos mismos modelos la historia del desplazamiento para el último nivel ante el sismo de Loma prieta, en comparación con la historia obtenida en el modelo sin disipadores (MSD) para el mismo sismo de estudio. Desde la figura 24 hasta la figura 29 se presentan dichos resultados.

Figura 24

Historia de los desplazamientos para el último nivel en el modelo sin disipadores y el modelo 4 bajo el sismo de Loma Prieta

**Figura 25**

Historia de los desplazamientos para el último nivel en el modelo sin disipadores y el modelo 7 bajo el sismo de Loma Prieta

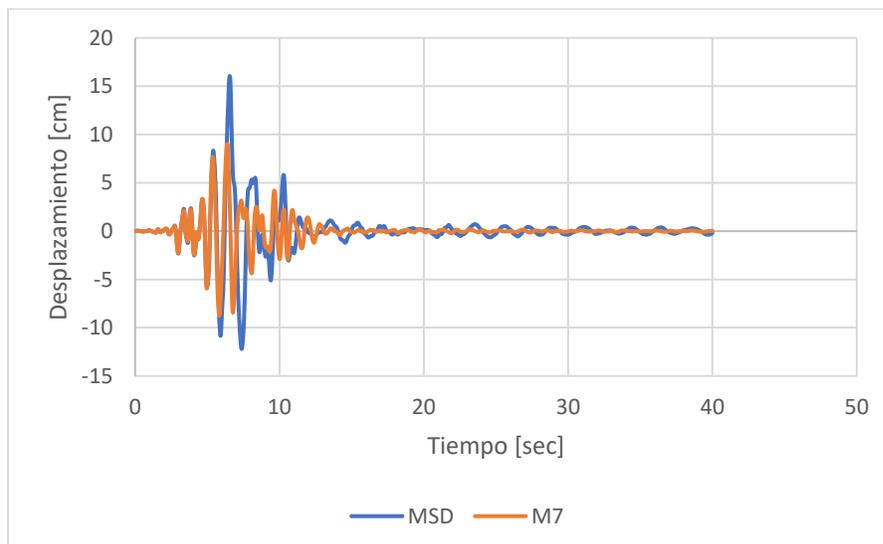
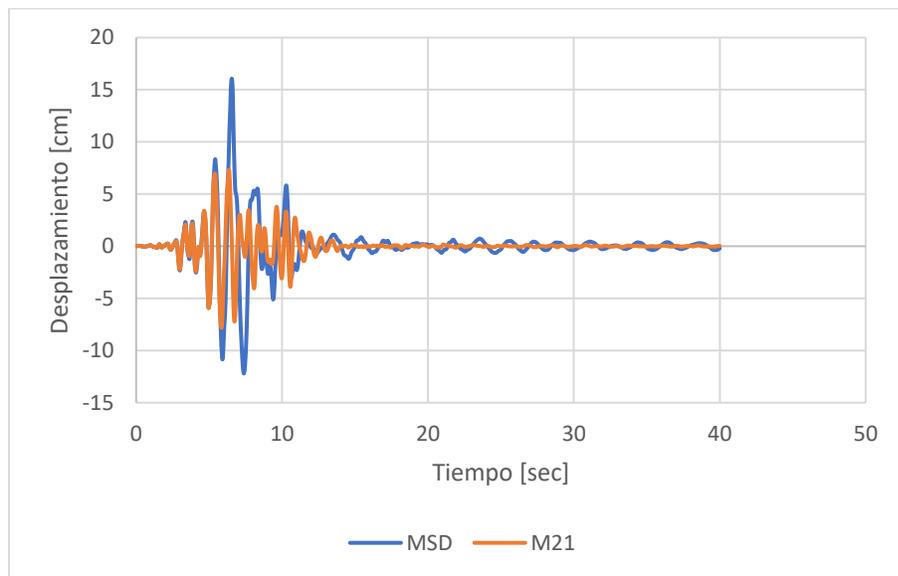


Figura 26

Historia de los desplazamientos para el último nivel en el modelo sin disipadores y el modelo 21 bajo el sismo de Loma Prieta

**Figura 27**

Historia de los desplazamientos para el último nivel en el modelo sin disipadores y el modelo 24 bajo el sismo de Loma Prieta

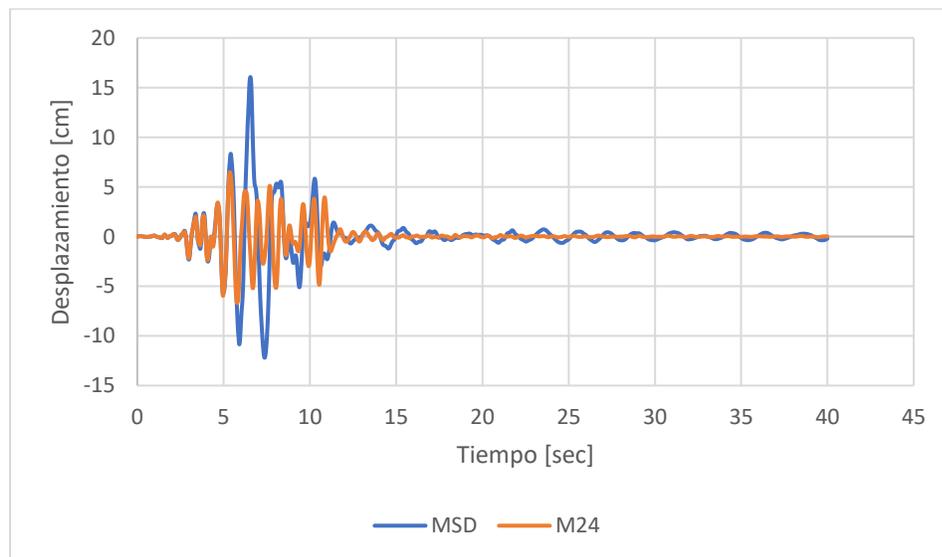
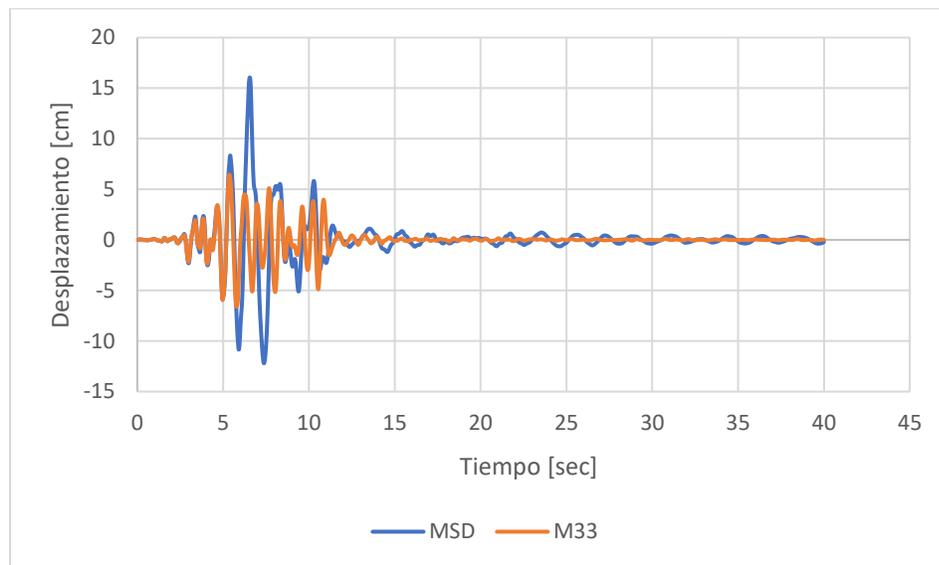
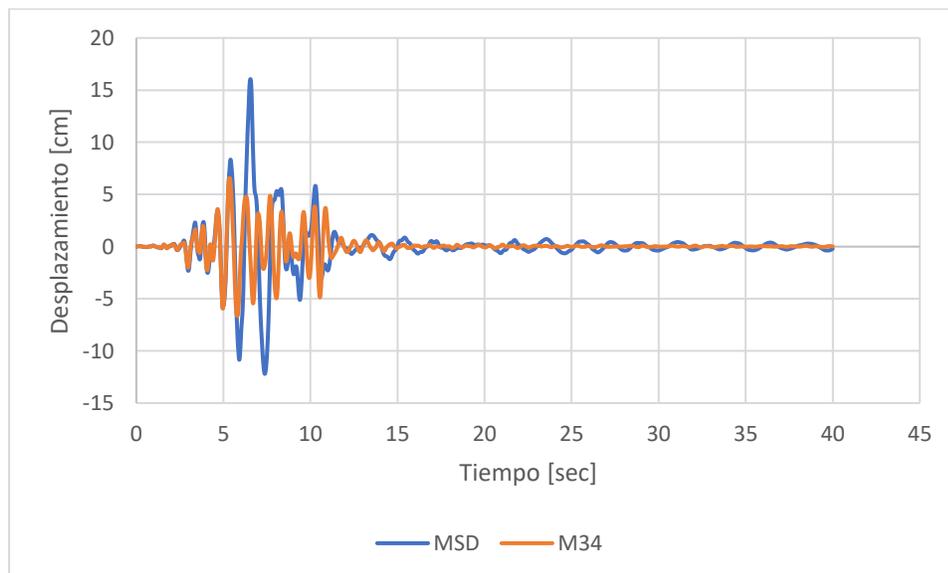


Figura 28

Historia de los desplazamientos para el último nivel en el modelo sin disipadores y el modelo 33 bajo el sismo de Loma Prieta

**Figura 29**

Historia de los desplazamientos para el último nivel en el modelo sin disipadores y el modelo 34 bajo el sismo de Loma Prieta

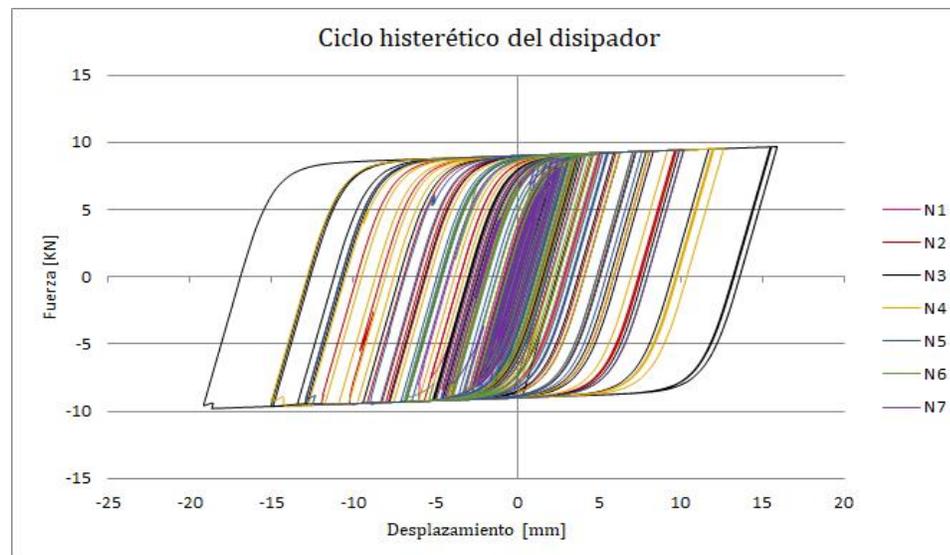


4.2. Ciclos Histeréticos de los disipadores.

La energía absorbida por el disipador se puede ver representada a través de los ciclos histeréticos del mismo, por lo que se analizó, cómo era el comportamiento de los disipadores usados en el estudio ante un determinado sismo. Para ello, se tomó el modelo en el que se pudiera apreciar la disipación de energía por los dispositivos en cada nivel, es decir, se eligió el modelo con disipadores a lo largo del pórtico (M34) y a este se le asignó el sismo de Montenegro. Aunque el disipador cuente con las mismas propiedades, en la figura 30 se observa que la energía disipada varía para cada nivel, esta va aumentando hasta un nivel medio y luego vuelve a disminuir.

Figura 30

Histéresis de los disipadores histeréticos de placas ranuradas para cada nivel del modelo 34.

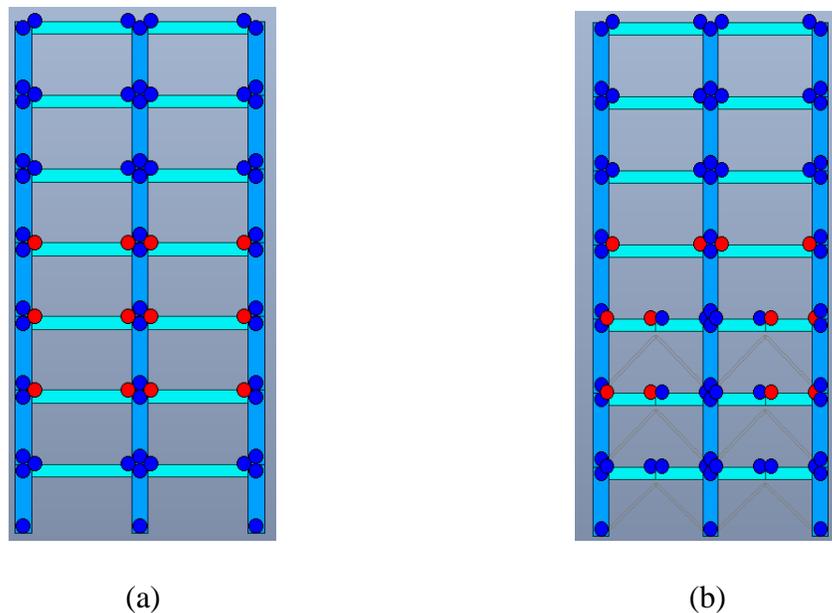


4.3. Plasticidad de los elementos

En la figura 31 se muestra el comportamiento de las rótulas plásticas en el modelo sin disipadores y el modelo 33 (6 disipadores), bajo el sismo de Coalinga. En esta se aprecia que previo a la incorporación de los disipadores se presentan rótulas en color rojo, es decir, en estado de falla. Posterior a la incorporación, se observa que, aunque determinadas vigas pasan de un color rojo a un color azul, es decir, de un estado de falla a un estado comprendido entre el rango lineal, aún prevalece la plastificación en otras vigas.

Figura 31

Rótulas plásticas formadas bajo el sismo de Coalinga. a) Modelo sin disipadores b) Modelo con seis disipadores [Modelo 33].



5. Conclusiones

Tras realizar un análisis dinámico no lineal y obtener una respuesta numérica del comportamiento de un pórtico bidimensional de concreto reforzado ante la implementación de disipadores histeréticos de placas ranuradas, se llegó a las siguientes conclusiones:

Se propusieron un total de 34 combinaciones de ubicación y cantidad de disipadores en un pórtico bidimensional de siete niveles y dos vanos, cada una se analizó bajo el efecto de ocho sismos debidamente escalados. Las características se describen la sección 3.5 del presente documento.

Se seleccionó de la literatura un disipador de placas ranuradas cuyas características fueron estudiadas de manera experimental y se incorporó a la estructura como un elemento tipo link mediante un sistema de contraventeos tipo chevron en el software Midas Gen. En la sección 3.6 del presente se describe las propiedades de disipador y en el apéndice C el protocolo aplicado en el software.

Se determinó que al incorporar disipadores histeréticos de placas ranuradas como dispositivo de control de respuesta sísmica al pórtico, existe una reducción en la deriva máxima de hasta 26% y en cuanto a los desplazamientos horizontales del último nivel se observa una reducción de 31%; esto cuando se incorporan 6 disipadores en los primeros 3 niveles de la estructura, es decir, dos disipadores por nivel. Así mismo, se determinó que, al implementar disipadores histeréticos de placas ranuradas en todos los niveles del pórtico, es decir implementando 14 disipadores la reducción de la deriva máxima y el desplazamiento en el último nivel en comparación con el pórtico sin disipadores es de 27 % y de 36% respectivamente.

Se considera que, debido a el porcentaje de reducción de desplazamientos y derivas, los modelos 24, 33 y 34 son los que mejor comportamiento presentan, otorgando respuestas muy similares. El modelo 24 representaría la opción óptima en este estudio, teniendo en cuenta que utiliza una menor cantidad dispositivos; sin embargo, este modelo no cumple con el criterio de deriva máxima por lo que se elige el modelo 33 como el modelo óptimo de los 34 modelos totales.

Las figuras 20 y 21 muestran que existe una estabilización de la respuesta dinámica después de incorporar cierto número de disipadores al pórtico. Específicamente, al asignar más de 4 disipadores, las derivas máximas y los desplazamientos en el último nivel no presentan una reducción significativa, lo que sugiere, que incorporar un gran número de disipadores a la estructura no garantiza una eficiencia en la respuesta sísmica y por el contrario en un aspecto constructivo y económico podría no ser viable.

Al comparar los resultados de deriva y desplazamiento se observó que las reducciones más notables se presentaban en los modelos que tienen ubicados los disipadores en el segundo y tercer nivel, especialmente en el tercer nivel. Así mismo, la figura 30 muestra a través de los ciclos de histéresis, cómo la disipación de energía va aumentando con el nivel, sin embargo, llega a un punto de disipación máxima cuando el disipador se ubica en los niveles medios de la estructura y a partir de ahí vuelve a disminuir la disipación de energía, siendo incluso menor que la disipación en los primeros niveles. Esto permite ratificar que la disposición de los disipadores en la estructura tiene una gran influencia en la respuesta dinámica de la misma, absorbiendo mayor energía cuando se disponen en niveles inferiores.

La influencia del disipador de placas ranuradas en la respuesta dinámica se empieza apreciar transcurrido un tiempo del sismo, en donde los desplazamientos y las cargas dinámicas

aplicadas a la estructura son significativas. Esto puede indicar que este disipador empieza a aportar rigidez cuando la estructura se encuentra en un rango inelástico.

El disipador de placas ranuradas utilizado en el presente proyecto, si bien ayuda a la disminución de los desplazamientos y derivas, se sigue presentando plastificación en los elementos estructurales, específicamente las vigas.

La respuesta dinámica del pórtico varía según el acelerograma bajo el cual se realice el estudio, lo cual destaca la importancia de emplear en un análisis dinámico, un considerable número de registros sísmicos compatibles con la zona de estudio, ya que esto proporciona una mayor precisión y confiabilidad a los resultados obtenidos.

Referencias Bibliográficas

- ASCE, A. S. of C. E. (2016). ASCE STANDARD ASCE/SEI 7-16 Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures. In *ANSI/ASCE Standard* (Issue 7 98).
- Caracterización mecánica y modelamiento estructural de un disipador pasivo de energía de tipo arriostramiento restringido al pandeo. (2012). *Román Andrés, Cancelado*, 156. [http://internal-pdf//Caracterización mecánica y modelamiento estructural de un disipador pasivo de energía de tipo arriostramiento restringido al pandeo.pdf](http://internal-pdf//Caracterización%20mecánica%20y%20modelamiento%20estructural%20de%20un%20disipador%20pasivo%20de%20energía%20de%20tipo%20arriostramiento%20restringido%20al%20pandeo.pdf)
- Chan, R., Ghabraie, K., Huang, X., & Xie, Y. M. (2010). Shape optimization of metallic yielding devices for passive mitigation of seismic energy. *Engineering Structures*, 32, 2258–2267. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2010.03.028>
- Chan, R. W. K., & Albermani, F. (2008). Experimental study of steel slit damper for passive energy dissipation. *Engineering Structures*, 30(4), 1058–1066. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2007.07.005>
- Chopra, A. K. (2014). *Dinámica de estructuras* (4th ed.).
- El Tiempo. (2011, December 2). *Cali tiene la primera clínica antisísmica de Colombia - Archivo Digital de Noticias de Colombia y el Mundo desde 1.990 - eltiempo.com*. El Tiempo. <https://www.eltiempo.com/archivo/documento/MAM-5004019>
- García, M. A. (2018). *Estudio sobre la efectividad del factor de sobrerresistencia del criterio columna fuerte-viga débil en el diseño sísmico de pórticos de hormigón mediante el análisis dinámico no lineal*. 105.

- Genatios, C., & Lafuente, M. (2016). *INTRODUCCIÓN AL USO DE AISLADORES Y DISIPADORES EN ESTRUCTURAS* (B. de D. de A. Latina, P. Maragno, M. Almiñana, C. Genatios, & M. Lafuente (Eds.)). <https://doi.org/10.1088/1751-8113/44/8/085201>
- López López, A. T., Tomás Espín, A., & Sánchez Olivares, G. (2017). Influencia del tipo de rótula plástica en el análisis no lineal de estructuras de hormigón armado. *Hormigón y Acero*, 68(282), 107–119. <https://doi.org/10.1016/j.hya.2017.04.006>
- Midas Gen software de análisis y diseño de edificaciones*. (n.d.). Retrieved September 28, 2021, from <https://www.midasoft.com/es/latinoamerica/productos/ingenieriaestructural/midasgen>
- Ministerio Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial. (2010). Título A - Requisitos Generales de Diseño y Construcción Sismo Resistente. *Nsr-10, Título A*, 1–174.
- Oviedo, J. A., & Duque, M. del P. (2006). Disipadores Histeréticos Metálicos como Sistemas De Control De Respuesta Sísmica En Edificaciones. *Revista EIA*, 11, 105–120. <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=a9h&AN=45266819&lang=es&site=ehost-live>
- Oviedo, J. A., & Duque, M. del P. (2009). DISIPADORES HISTERÉTICOS METÁLICOS COMO TÉCNICA DE CONTROL DE RESPUESTA SÍSMICA EN EDIFICACIONES COLOMBIANAS J uan A ndrés O viedo * METALLIC HYSTERETIC DAMPERS AS A SEISMIC RESPONSE CONTROL. *Revista EIA*, 51–63.
- Pimiento, J., Salas, A., & Ruiz, D. (2014). Seismic performance of frames with passive energy dissipation steel slit plates | Desempeño sísmico de un pórtico con disipadores de energía pasivos de placas ranuradas de acero. *Revista Ingenieria de Construccion*, 29(3), 283–298.
- Pincheira, E., Maureira, N., & Sanhueza, F. (2017). *Diseño óptimo de disipadores metálicos en un edificio de acero de 28 pisos*. 1–20.

- RodolfoJavier, G. T. (2017). *Aspectos metodologicps del diseño de estructuras altas en concreto reforzado: comparación entre el método de análisis modal espectral y el método de análisis dinamico no lineal.*
- Servicio Geológico Colombiano. (n.d.). *Sismicidad Histórica de Colombia*. Retrieved September 12, 2021, from <http://sish.sgc.gov.co/visor/sesionServlet?metodo=irAInfoDetallada&idSismo=62>
- Siso Flores, O. V. (2017). Metodología Para La Optimización De Pórticos Planos En Acero Controlados Con Disipadores Histeréticos Metálicos Basada En Algoritmos Genéticos De Codificación Binaria. *Pontificia Universidad Javeriana*.
- Young JL, P. (1985). *seismic damage analysis and damage-limiting design for R/C structures*. <http://hdl.handle.net/2142/69946>
- Zamorano, A. (2015, September 17). *Terremotos en Chile: el secreto de sus construcciones antisísmicas* - *BBC News Mundo*. BBC MUNDO. https://www.bbc.com/mundo/noticias/2014/04/140402_chile_terremoto_edificios_az