



Pontificia Universidad
JAVERIANA
Cali

EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO SÍSMICO DE ESTRUCTURAS DE ACERO
MEDIANTE LA INSTALACIÓN DE DISIPADORES DE ENERGÍA DE FLUIDO VISCOSO
COMERCIALIZADOS EN COLOMBIA.

Programa de Maestría en Ingeniería Civil con Énfasis en Ingeniería Estructural

Presentado por:

Daniel Eduardo Meneses Solarte

Directora:

M.Sc. María Victoria Mondragón Maca

Pontificia Universidad Javeriana Cali

Facultad de Ingeniería y Ciencias

Septiembre de 2024



TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	9
2. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	10
2.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	10
2.2. PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN	10
2.3. ALCANCE DEL TRABAJO DE GRADO	10
3. OBJETIVOS.....	11
3.1. OBJETIVO GENERAL	11
3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	11
4. JUSTIFICACIÓN DEL TRABAJO DE GRADO	12
5. MARCO DE REFERENCIA	13
5.1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA - ANTECEDENTES	13
5.2. MARCO TEÓRICO (CONCEPTUAL).....	16
5.2.1. <i>Análisis Modal Espectral</i>	16
5.2.2. <i>Selección y escalado de sismos</i>	18
5.2.3. <i>Análisis cronológico lineal sin disipadores</i>	19
5.2.4. <i>Selección de disipadores de fluido viscoso comercializados en Colombia</i>	20
5.2.5. <i>Predimensionamiento disipadores de fluido viscoso</i>	20
5.2.6. <i>Análisis cronológico no lineal con disipadores</i>	25
6. DESCRIPCIÓN DE ESTRUCTURAS.....	26
7. SELECCIÓN Y PROCESADO DE ACELEROGRAMAS.	33
8. ANÁLISIS ESTRUCTURA SIN DISIPADORES	40



8.1.	ANÁLISIS MODAL ESPECTRAL CON EL 75% DE LA DEMANDA SÍSMICA.....	40
8.2.	ANÁLISIS CRONOLÓGICO LINEAL.....	47
9.	DISIPADORES DE FLUIDO VISCOSO COMERCIALIZADOS EN COLOMBIA.....	49
10.	ANÁLISIS ESTRUCTURA CON DISIPADORES	50
10.1.	PREDIMENSIONAMIENTO DISIPADORES DE FLUIDO VISCOSO	50
10.2.	ANÁLISIS CRONOLÓGICO NO LINEAL	53
11.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	57
12.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	62
13.	LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN	64
14.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	65
15.	GLOSARIO	67



LISTA DE TABLAS

Tabla 1 <i>Combinaciones de carga según B.2.4.2. de la NSR-10.</i>	17
Tabla 2 <i>Valores del parámetro λ.</i>	24
Tabla 3 <i>Avalúo de cargas según Titulo B de la NSR-10 para las dos estructuras.</i>	30
Tabla 4 <i>Losa equivalente en concreto para modelado en software ETABS v.20.3 de las dos estructuras.</i>	31
Tabla 5 <i>Cálculo del coeficiente de capacidad de disipación de energía según NSR-10.</i>	31
Tabla 6 <i>Parámetros amenaza sísmica de la ciudad de Popayán, NSR-10.</i>	32
Tabla 7 <i>Descripción de las señales seleccionadas en la zonificación de respuesta sísmica de Popayán.</i>	33
Tabla 8 <i>Corrección por cortante basal estructura 4 y 6 pisos.</i>	42
Tabla 9 <i>Corrección por cortante basal, estructura de 4 pisos, para análisis cronológico lineal.</i>	47
Tabla 10 <i>Corrección por cortante basal, estructura de 6 pisos, para análisis cronológico lineal.</i>	48
Tabla 11 <i>Derivas obtenidas del análisis cronológico lineal para las estructuras sin disipadores.</i>	48
Tabla 12 <i>Características y dimensiones disipador RESTON SA de Mageba.</i>	49
Tabla 13 <i>Relación de HAZUS, deriva-daño, según el tipo de estructura.</i>	50
Tabla 14 <i>Cálculo deriva objetivo y amortiguamiento efectivo y viscoso.</i>	51
Tabla 15 <i>Datos de entrada y cálculos preliminares para el coeficiente de amortiguamiento.</i>	51
Tabla 16 <i>Cálculos modales preliminares de la estructura de 4 pisos en sentido X, para el coeficiente de amortiguamiento.</i>	52
Tabla 17 <i>Cálculos modales preliminares de la estructura de 6 pisos en sentido X, para el coeficiente de amortiguamiento.</i>	52
Tabla 18 <i>Coeficiente de amortiguamiento teórico y luego de iterar.</i>	53
Tabla 19 <i>Análisis cronológico no lineal para las estructuras con disipadores.</i>	54
Tabla 20 <i>Características y propiedades de disipadores para la estructura de 4 pisos – Sentido X.</i>	56
Tabla 21 <i>Características y propiedades de disipadores para la estructura de 6 pisos – Sentido X.</i>	57
Tabla 22 <i>Comparativa derivas con y sin disipadores.</i>	58



Tabla 23 <i>Balance energético estructura de 4 pisos - Sentido X</i>	59
Tabla 24 <i>Balance energético estructura de 6 pisos - Sentido X</i>	59
Tabla 25 <i>Disipación de energía por la estructura y dispositivos - Estructura 4 pisos - Sentido X</i>	60
Tabla 26 <i>Disipación de energía por la estructura y dispositivos - Estructura 6 pisos - Sentido X</i>	60
Tabla 27 <i>Comparativa fuerza cortante de la columna 28 con y sin disipadores – Sentido X</i>	61



LISTA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1 Configuración en planta de las dos estructuras, edificios 4 y 6 pisos.	27
Ilustración 2 Distribución de pórticos gravitacionales y pórticos resistentes a momento, edificios 4 y 6 pisos.	28
Ilustración 3 Pórtico 1 estructura de 4 pisos y distribución de pórticos PG y PRM edificio de 4 pisos.	29
Ilustración 4 Pórtico 1 estructura de 6 pisos y distribución de pórticos PG y PRM edificio de 4 pisos.	29
Ilustración 5 Espectros de aceleración para diseño	32
Ilustración 6 Registros sísmicos sin escalar dirección E-W.	35
Ilustración 7 Registros sísmicos sin escalar dirección N-S.	35
Ilustración 8 Registros sísmicos escalados con el DBE dirección E-W.	36
Ilustración 9 Registros sísmicos escalados con el DBE dirección N-S.	36
Ilustración 10 Registros sísmicos escalados con el MCE dirección E-W.	37
Ilustración 11 Registros sísmicos escalados con el MCE dirección N-S.	37
Ilustración 12 Espectro objetivo DBE y espectro promedio escalado dirección E-W.	38
Ilustración 13 Espectro objetivo DBE y espectro promedio escalado dirección N-S.	38
Ilustración 14 Espectro objetivo MCE y espectro promedio escalado dirección E-W.	39
Ilustración 15 Espectro objetivo MCE y espectro promedio escalado dirección N-S.	39
Ilustración 16 Vista 3D de las estructuras en ETABS v.20.3.	41
Ilustración 17 Chequeo vigas del piso 1, estructura de 4 pisos.	43
Ilustración 18 Chequeo vigas del piso 1, estructura de 6 pisos.	44
Ilustración 19 Chequeo índices de sobreesfuerzo columnas de la estructura de 4 pisos.	45
Ilustración 20 Chequeo índices de sobreesfuerzo columnas de la estructura de 6 pisos.	46
Ilustración 21 Curvas de histéresis disipador K13 - Registro Japan IWTH04 Este-Oeste 2011 - Sentido X.	54
Ilustración 22 Balance energético - Registro Japan IWTH04 Este-Oeste 2011 - Sentido X.	55
Ilustración 23 Gráfica comparativa derivas con y sin disipadores.	58
Ilustración 24 Comparativa gráfica fuerza cortante en la columna 28 con y sin disipadores.	61



Agradecimientos

Expreso mi agradecimiento a Dios, quién permite que se culmine mi proceso de maestría. A mi hermano y a mi madre, por su apoyo integral. A mi directora Victoria, quién ha sido pilar fundamental en mi crecimiento personal y profesional. Al profesor Orlando Cundumi, por compartir toda su gran experiencia y conocimiento en el tema. Este proceso también me permitió conocer a mi novia, Paola Andrea, a quién le agradezco su apoyo amoroso e incondicional. A mis compañeros de maestría, por compartir todo su conocimiento siempre con la mejor disposición.



Resumen: La presente investigación realiza el análisis de dos estructuras de acero regulares de 4 y 6 pisos ubicadas en la ciudad de Popayán, siguiendo las recomendaciones de la NSR-10 y la ASCE 7-22. Se realiza un análisis cronológico lineal para la estructura sin disipadores y un análisis cronológico no lineal para la estructura con disipadores. Los registros sísmicos son tomados de la zonificación sísmica de Popayán. Además, se establece contacto con la empresa colombiana Efe-Prima-Ce, que colabora con Mageba, distribuidora de los disipadores en Colombia. Los resultados muestran que los disipadores disminuyen la deriva en un promedio del 50% y pueden disipar hasta el 79% de la energía sísmica total de las estructuras.

Palabras clave: Disipadores de fluido viscoso, estructuras de acero, MCE, DBE, registros sísmicos, ASCE 7-22, NSR-10.

Abstract: The present study analyzes two regular steel structures, 4 and 6 stories high, located in the city of Popayán, following the guidelines of NSR-10 and ASCE 7-22. A linear time-history analysis is conducted for the structure without dampers, while a nonlinear time-history analysis is performed for the structure with dampers. Seismic records are sourced from the seismic zoning of Popayán. Additionally, contact was established with the Colombian company Efe-Prima-Ce, which collaborates with Mageba, a distributor of dampers in Colombia. The results indicate that the dampers reduce drift by an average of 50% and dissipate up to 79% of the total seismic energy in the structures.

Keywords: Fluid viscous dampers, steel structures, MCE, DBE, ground motion, ASCE 7-22, NSR-10.



1. Introducción

El diseño sismorresistente tradicional basado en la ductilidad tiene como objetivo principal evitar el colapso de las estructuras durante sismos severos, poniendo en primer lugar la seguridad de las personas mediante la disipación de energía a través del daño intencional y controlado en los elementos estructurales. No obstante, los daños ocasionados suelen implicar altos costos de reparación, la necesidad de suspender temporalmente el funcionamiento del edificio o, en algunos casos, incluso su demolición. La presente investigación revisa antecedentes sobre el uso de disipadores de fluido viscoso en Colombia, encontrando que solo un estudio previo los aplica en estructuras de acero, y en una zona de amenaza sísmica intermedia. En este estudio, se implementan disipadores en estructuras de acero de 4 y 6 pisos con configuración regular, ubicadas en una zona de amenaza sísmica alta, la ciudad de Popayán. Se seleccionan registros sísmicos de la zonificación sísmica de Popayán (2020) y se procesan primero en PRISM y luego en SeismoMatch. Se realiza una búsqueda de empresas distribuidoras de disipadores en Colombia, de fácil acceso. Se lleva a cabo un análisis cronológico lineal en estructuras sin disipadores. Finalmente, se comparan los resultados con el análisis cronológico no lineal en las estructuras equipadas con estos dispositivos. El predimensionamiento de los disipadores sigue el método descrito en FEMA 274, y el análisis estructural se basa en las recomendaciones de la NSR-10 y la ASCE 7-22.



2. Definición del problema de investigación

2.1. Planteamiento del problema

Según Krawinkler y Nassar (1992), el diseño sismorresistente basado en ductilidad puede resultar en una degradación de la rigidez estructural y generar concentraciones de esfuerzos, incrementando el riesgo de daños localizados. Además, depende de la capacidad de los materiales para soportar deformaciones plásticas, lo que puede ser un reto durante sismos prolongados o intensos. Es fundamental evaluar sistemas que eviten la disipación de energía a través de los elementos principales del sistema de resistencia sísmica, como vigas y columnas, y redirijan esa función a dispositivos específicos. Asimismo, es importante identificar empresas que gestionen su distribución en Colombia.

2.2. Pregunta de investigación

De acuerdo con lo anterior, en este proyecto se pretende dar respuesta a la siguiente pregunta de investigación: ¿Cómo es la respuesta sísmica de estructuras de acero con la incorporación de disipadores de energía sísmica de fluido viscoso comercializados en Colombia?

2.3. Alcance del trabajo de grado

Se evalúa la respuesta sísmica de dos edificios de acero estructural de diferente altura, utilizando disipadores de energía de fluido viscoso seleccionados entre los comercializados en Colombia, mediante análisis cronológico no lineal, conforme a las recomendaciones de la ASCE 7-22 y la NSR-10. Esta respuesta se compara con la de las estructuras sin disipadores, la cual es analizada mediante un análisis cronológico lineal.



3. Objetivos

A continuación, se describen los objetivos que se pretenden desarrollar con la presente propuesta.

3.1. Objetivo General

Evaluar el comportamiento sísmico de dos estructuras de acero mediante la instalación de disipadores de energía de fluido viscoso comercializados en Colombia.

3.2. Objetivos específicos

- Modelar dos estructuras de acero en un software basado en elementos finitos.
- Seleccionar los distribuidores comerciales de disipadores de fluido viscoso en Colombia.
- Comparar la respuesta sísmica de las estructuras de acero sin disipadores y con la implementación de disipadores de fluido viscoso comercializados en Colombia.



4. Justificación del trabajo de grado

La ingeniería estructural desempeña un papel fundamental en garantizar la seguridad e integridad de las edificaciones y en la preservación de vidas humanas y activos económicos, especialmente en regiones sísmicas como Colombia. En este contexto, es esencial buscar soluciones innovadoras y efectivas para mejorar la capacidad de respuesta de las estructuras ante eventos sísmicos.

Los disipadores de energía sísmica, y en particular los de fluido viscoso, han demostrado ser una tecnología prometedora para mitigar los efectos de los terremotos en edificaciones (Taylor, 2024). Su capacidad para absorber y disipar la energía generada por un sismo puede reducir significativamente las fuerzas y deformaciones a las que están expuestas las estructuras, contribuyendo así a su seguridad y durabilidad. Sin embargo, a pesar de los avances en la investigación sobre disipadores de energía sísmica en estructuras de concreto, existe una brecha de conocimiento en lo que respecta a su aplicación en estructuras de acero en Colombia. Las estructuras de acero son ampliamente utilizadas en el país debido a su versatilidad, pero la implementación de disipadores de energía en este tipo de construcciones es aún imperceptible (Gómez, 2020).

Esta investigación se justifica en virtud de la necesidad de llenar este vacío de conocimiento y proporcionar información valiosa sobre el comportamiento sísmico de estructuras de acero equipadas con disipadores de energía sísmica de fluido viscoso disponibles en el mercado colombiano. La evaluación de su desempeño en condiciones de un sismo de diseño permitirá profundizar en la comprensión de su impacto en las estructuras de acero, y fomentar una mayor



adopción de esta tecnología en proyectos de construcción futuros y existentes en Colombia.

Además, esta investigación contribuirá a generar conocimiento que promueva mejores prácticas de diseño y reforzamiento en el país, mediante el uso de herramientas numéricas que mejoren la respuesta sísmica de las edificaciones, fortaleciendo la seguridad de la población y la protección de los activos económicos en zonas de amenaza sísmica alta en Colombia.

5. Marco de referencia

El marco de referencia está organizado en dos partes. La primera es una revisión del estado del arte. Y la segunda, el desarrollo del marco teórico.

5.1. Revisión bibliográfica - Antecedentes

El diseño sismorresistente tradicional por ductilidad se ha enfocado en prevenir el colapso de las estructuras durante sismos severos, priorizando la seguridad de las personas mediante la disipación de energía a través del daño controlado en sus elementos estructurales. Sin embargo, la reparación de los daños generados puede ser bastante costosa, requerir la salida temporal de operación o incluso la demolición del edificio.

Por consiguiente, las investigaciones recientes se han enfocado en el desarrollo de tecnologías para minimizar el daño estructural y garantizar la continuidad operativa de edificaciones consideradas activos económicos importantes o esenciales tales como, hospitales, torres de control, centros de emergencia, instituciones, entre otras. En este contexto, los FVD se destacan por su capacidad para reducir desplazamientos y fuerzas internas sin alterar la rigidez estructural. Además, son dispositivos pasivos de bajo mantenimiento, efectivos tanto en nuevas construcciones como en rehabilitaciones, aportando hasta un 30% adicional de amortiguamiento a



la estructura (Taylor, 2024).

En Colombia, aún no se han incorporado disipadores viscosos en el diseño de edificaciones, debido principalmente a los costos iniciales adicionales que conlleva su implementación (Gómez, 2020). Sin embargo, se han hecho investigaciones y profundizaciones sobre todo en estructuras de concreto reforzado con la implementación de estos dispositivos en el país.

Lamprea & Garzón (2017), se centran en el uso e implementación de disipadores de fluido viscoso no lineales (FVD), tomando en cuenta dos valores para el exponente de amortiguamiento, α , de 0.25 y 0.50, en un edificio hospitalario típico en concreto reforzado de la ciudad de Bogotá, ubicado en una zona de amenaza sísmica intermedia. Finalmente, identifican que el edificio de estudio presenta un mejor comportamiento en la dirección Y con los disipadores, y que su uso reduce la demanda de ductilidad, así como los desplazamientos y, por lo tanto, las derivas. La estructura cumple con las recomendaciones de diseño para disipadores de fluido viscoso de la ASCE 7-10 y la NSR-10.

Gómez (2020), identifica que la NSR-10 no incluye coeficientes R para estructuras con estos sistemas, la investigación propone determinar dicho coeficiente en cinco edificaciones de concreto reforzado con diferentes alturas (4 a 20 pisos). El análisis sigue los lineamientos de los reglamentos NSR-10 y ASCE 7-16, utilizando un método dinámico no lineal validado con análisis estático. Este estudio busca promover el uso de estos sistemas en Colombia.

Guerrero & Edson (2019), analizan una edificación en concreto reforzado de seis pisos en Bucaramanga, zona de amenaza sísmica alta, utilizando disipadores de fluido viscoso. El diseño sigue las normativas NSR-10 y ASCE 7-16, empleando una metodología basada en el desempeño



y evaluada con el software ETABS v.16. El sistema de disipación logra aproximarse al límite del 1.0% según la NSR-10 para estructuras convencionales.

Ordoñez, Parra & Silva (2021), comparan una estructura convencional y otra con disipadores viscosos en un edificio residencial en concreto reforzado de cinco pisos en Popayán, siguiendo la NSR-10 y la ASCE 7-16. Emplean un análisis modal espectral para el diseño convencional y un análisis no lineal tiempo-historia para el diseño con disipadores, considerando sismos de falla activa y subducción. Los resultados muestran que los disipadores absorben hasta el 68% de la energía sísmica. Esta investigación se centra en cumplir la deriva del 1.0% establecida en la NSR-10, en lugar de un nivel de daño específico.

López & Pinzón (2021), evaluaron una edificación de 30 pisos en Bogotá, zona de amenaza sísmica intermedia, utilizando un sistema estructural en acero y comparando su comportamiento con y sin disipadores de fluido viscoso. El estudio sigue los lineamientos de la NSR-10 y emplea modelos en ETABS v.18. Para el diseño de los disipadores, se consideran las normativas ASCE 7-10 y FEMA 273, así como los registros sísmicos del PEER Ground Motion Database. Los resultados indican que los disipadores, dispuestos en arreglo diagonal, reducen los desplazamientos de entrepiso entre un 80% y 90%, aunque su implementación implica un incremento en los costos de construcción de la edificación.

La publicación descrita anteriormente, es la única identificada en la revisión de literatura que aborda el análisis de estructuras de acero con disipadores de fluido viscoso en Colombia, y presenta limitaciones en la aplicación de las recomendaciones de la norma ASCE 7-10 para el diseño de disipadores. La presente investigación profundiza en estas recomendaciones, basándose



en la normativa más reciente emitida por la American Society of Civil Engineering.

Además, se destaca como el primer estudio que emplea los sismos de la Zonificación de Popayán para realizar un análisis cronológico. Asimismo, se revisa qué empresas tienen la capacidad de distribuir los disipadores en Colombia, con el fin de mejorar la viabilidad práctica de su implementación y promover su uso en el diseño de estructuras de acero en el país.

5.2. Marco teórico (Conceptual)

5.2.1. Análisis Modal Espectral

El análisis modal espectral está reglamentado a través de un procedimiento en la norma sismorresistente colombiana NSR-10. Primero, se define un modelo detallado de la estructura con todas sus propiedades mecánicas y geométricas. Luego, se selecciona el espectro de respuesta de diseño con el DBE basado en la zona sísmica y tipo de suelo. A continuación, se realiza un análisis modal para obtener los modos de vibración principales, calculando la participación modal de cada uno. Posteriormente, se aplica el espectro de respuesta a cada modo y se combinan las respuestas utilizando el método CQC (Complete Quadratic Combination). Las derivas de piso se verifican para cumplir con los límites de la NSR-10. Para el diseño de los elementos estructurales, se emplea el método LRFD (Load and Resistance Factor Design), que utiliza combinaciones de carga para incrementar las demandas y factores de reducción para la capacidad de los elementos estructurales.

Finalmente, se realizan ajustes en el diseño si es necesario para cumplir con las disposiciones normativas. Los aspectos normativos que rigen principalmente el análisis y diseño estructural son los siguientes:

- La zona de amenaza sísmica en la que se encuentra ubicada la estructura y el tipo de suelo.



- La irregularidad de la estructura afecta directamente en el coeficiente de capacidad de disipación de energía para ser empleado en el diseño.
- La corrección por cortante basal descrita en A.5.4.5 de la NSR-10.
- La norma ASCE 7-22, en el numeral 18.2.1.1, establece que el sistema de resistencia sísmica debe cumplir un valor mínimo de demanda sísmica para la estructura sin disipadores:

$$V_{min} = \text{máx} \left(\frac{1}{B} V; 0.75V \right)$$

- Según B.2.4.2. de la NSR-10: “El diseño de las estructuras, sus componentes y cimentaciones debe hacerse de tal forma que sus resistencias de diseño iguallen o excedan los efectos producidos por las cargas mayoradas en las siguientes combinaciones (ver Tabla 1):

Tabla 1

Combinaciones de carga según B.2.4.2. de la NSR-10.

Enumeración NSR-10	Combinación de Carga
B.2.4-1	1.4D
B.2.4-2	1.2D + 1.6L + 0.5L _r
B.2.4-3	1.2D + 1.6L _r + L
B.2.4-4	1.2D + 1.0L + 0.5L _r
B.2.4-5	1.2D + 1.0E + 1.0L
B.2.4-6	0.9D
B.2.4-7	0.9D + 1.0E



- Los elementos estructurales se diseñan utilizando las combinaciones de carga mencionadas anteriormente, tanto para los pórticos de gravedad, como para los pórticos resistentes a momento, los cuales tienen una capacidad especial de disipación de energía (DES).

5.2.2. Selección y escalado de sismos

Para llevar a cabo un análisis cronológico lineal y no lineal, es necesario seleccionar registros sísmicos que cumplan con características como magnitud, distancia, tipo de falla, entre otras, asegurando que representen adecuadamente los sismos esperados en el sitio y sean compatibles con el espectro de diseño objetivo.

El procesamiento de los registros sísmicos implica tres pasos: corrección de línea base, filtrado Butterworth y escalado. La corrección por línea base ajusta desplazamientos no deseados causados por errores instrumentales, garantizando una línea base cercana a cero. El filtrado Butterworth elimina ruidos de alta y baja frecuencia, preservando la información relevante del sismo con una respuesta suave. Finalmente, el escalado ajusta la intensidad de los registros a niveles específicos del espectro de respuesta objetivo. Estos pasos aseguran que los registros sean precisos y representativos del movimiento sísmico real.

Los dos tipos de sismo, definidos en la ASCE 7-22 son: (1) sismo básico de diseño (DBE), con un 10% de probabilidad de ocurrencia en un periodo de 50 años; y (2) sismo máximo de diseño (MCE), cuya probabilidad es del 2% en el mismo intervalo de tiempo. El numeral 11.4.6 de la ASCE 7-22 describe que, en caso de que sea necesario un espectro de respuesta para el MCE, este se obtendrá multiplicando por 1.5 el DBE.



El numeral 16.2.2. de la ASCE 7-22 establece que se deben seleccionar un conjunto de no menos de 11 pares de registros sísmicos. Los registros sísmicos deben consistir en pares de componentes horizontales ortogonales (Este-Oeste y Norte-Sur). Para cada registro sísmico utilizado en el análisis cronológico, se analizan cuatro casos por separado, aplicando en cada uno un efecto ortogonal del 30%, los casos son:

- Caso 1: La componente E-W actúa al 100% en el sentido X y la componente N-S actúa al 30% en el sentido Y.
- Caso 2: La componente N-S actúa al 100% en el sentido Y, con la componente E-W al 30% en el sentido X.
- Caso 3: La componente N-S actúa al 100% en el sentido X y la componente E-W actúa al 30% en el sentido Y.
- Caso 4: La componente E-W actúa al 100% en el sentido Y, con la componente N-S al 30% en el sentido X.

5.2.3. Análisis cronológico lineal sin disipadores

En el análisis cronológico lineal, se aplican los registros sísmicos al modelo estructural como aceleraciones en la base, en una o ambas direcciones horizontales (y vertical si es necesario). Esto permite simular el movimiento del terreno y su impacto sobre la estructura.

Posteriormente, se calculan las respuestas dinámicas de las estructuras, como desplazamientos, aceleraciones, fuerzas internas y momentos en cada instante de tiempo, tomando el promedio de los máximos del conjunto de registros sísmicos escalados con el DBE. Este análisis se realiza en las estructuras sin disipadores con el propósito de comparar las respuestas dinámicas



obtenidas posteriormente con aquellas de las estructuras equipadas con disipadores.

5.2.4. Selección de disipadores de fluido viscoso comercializados en Colombia

Es importante investigar las características técnicas de los disipadores de energía disponibles en el mercado colombiano, con el fin de recopilar toda la información necesaria para llevar a cabo el análisis de las estructuras equipadas con estos dispositivos. Los parámetros técnicos más importantes son la fuerza axial y el desplazamiento máximo.

5.2.5. Predimensionamiento disipadores de fluido viscoso

FVD son dispositivos dependientes de la velocidad que se utilizan en los edificios para disipar energía sísmica. En general, a mayor amortiguamiento efectivo en un edificio, menores serán las respuestas (fuerzas, desplazamientos, tensiones y relaciones de deriva). En edificios típicos, se espera un coeficiente de amortiguamiento inherente del 2% a 5% del crítico. Los FVD pueden distribuirse a lo largo de la altura del edificio para proporcionar una cantidad mayor de amortiguamiento efectivo. A continuación, se detallan sus características:

- Los FVD son dispositivos independientes de la frecuencia sin un componente de rigidez. Por lo tanto, a diferencia de los amortiguadores sintonizados, no se requiere ajustar los FVD a una frecuencia específica. El hecho de que los FVD no aporten rigidez a la estructura también significa que el período del edificio (T) permanece inalterado.
- Los FVD son dependientes de la velocidad, y las fuerzas de salida generadas están principalmente fuera de fase con los máximos esfuerzos en la estructura del edificio.
- Los FVD se clasifican como dispositivos pasivos, sin necesidad de una fuente de energía externa para activarlos. Los disipadores se activan cuando hay movimiento relativo entre



los dos extremos de la unidad, la energía sísmica se convierte en calor y se disipa de manera segura en la atmósfera.

- Los FVD no requieren mantenimiento regular y, en aplicaciones típicas, no se observa una degradación del rendimiento por el uso o variaciones típicas de temperatura.
- Los FVD no necesitan instalarse en cada nivel del edificio y a menudo se colocan en ubicaciones estratégicas para maximizar su eficiencia o cumplir con otras restricciones de diseño.
- Los FVD se activan por el movimiento relativo en los dos extremos del amortiguador y funcionan mejor para mitigar la respuesta dinámica de edificios más flexibles, como pórticos de acero o concreto, resistentes a momento.
- Los FVD son ideales para abordar irregularidades en los edificios. En construcciones con un piso débil, la colocación de disipadores solo en este nivel puede reducir significativamente su respuesta, sin disminuir el período de la estructura ni afectar el cortante basal total. En edificios con irregularidades en planta, la ubicación de amortiguadores en el lado más rígido puede ayudar a reducir la amplificación torsional de la estructura durante el movimiento (Taylor, 2024).
- Los FVD también son eficientes para resolver problemas de separación entre edificios, reduciendo las derivas.

En el predimensionamiento de los FVD, es fundamental establecer los parámetros técnicos que aseguren su correcto desempeño bajo las condiciones de diseño sísmico. Para obtener la fuerza generada por cada disipador, se utiliza la siguiente ecuación (Taylor, 2024):



$$F = CV^\alpha$$

Donde:

F = fuerza generada por el disipador,

C = coeficiente de amortiguamiento,

V = velocidad relativa del movimiento entre los extremos del disipador,

α = exponente que depende del tipo de disipador, varía entre 0.4 y 0.6 para edificaciones.

El factor de reducción, B, se obtiene al dividir la deriva máxima calculada a partir del análisis sin disipadores, entre la deriva objetivo de diseño. Esto se representa mediante la siguiente ecuación:

$$B = \frac{D_{m\acute{a}x}}{D_{objetivo}}$$

Donde:

$D_{m\acute{a}x}$ = Deriva máxima promedio de los sismos escalados con el DBE obtenida del análisis cronológico lineal,

$D_{objetivo}$ = Deriva objetivo, propuesta por la metodología HAZUS.

La FEMA (Federal Emergency Management Agency), en su documento “Multihazard Loss Estimation Methodology” HAZUS, ha investigado la relación entre la deriva y el daño estructural. En dicho documento, se presentan los tipos de daño junto con sus derivas correspondientes según el sistema estructural.

El valor del amortiguamiento se calcula por medio de la ecuación:

$$B = \frac{2.31 - 0.41 \ln(\beta_0)}{2.31 - 0.41 \ln(\beta_{eff})}$$



El amortiguamiento inherente (β_0) para estructuras, por lo general, se establece en un valor del 5%. Con este parámetro definido, y una vez calculado el factor de reducción (B), se determina el amortiguamiento efectivo (β_{eff}).

El valor del amortiguamiento viscoso objetivo (β_{visc}) se obtiene de la siguiente manera:

$$\beta_{visc} = \beta_{eff} - \beta_0$$

Para el cálculo del coeficiente de amortiguamiento para disipadores no lineales, se utiliza la siguiente ecuación establecida en el FEMA 274:

$$\sum C_j = \frac{\beta_{visc} 2\pi D_{roof}^{1-\alpha} \omega^{2-\alpha} \sum_i m_i \phi_i^2}{\lambda (\phi_{rj}^{1+\alpha} \cos^{1+\alpha} \theta_j)}$$

$$D_{roof} = \frac{T^2}{4\pi^2} * \frac{S_a \phi_{roof} \sum_i m_i \phi_i}{B \sum_i m_i \phi_i^2}$$

Donde:

β_{visc} = Amortiguamiento viscoso de la estructura,

T = Período del primer modo de vibración,

λ = Parámetro lambda dependiente del exponente de velocidad (ver Tabla 2),

C_j = Coeficiente de amortiguamiento del disipador j,

ϕ_{rj} = Desplazamiento horizontal modal relativo entre los extremos del disipador j,

θ_j = Ángulo de inclinación del disipador j,

m_i = Masa del nivel i,

D_{roof} = Amplitud de desplazamiento en la cubierta (primer modo de vibración),

ω = Frecuencia angular (primer modo de vibración),



ϕ_i = Desplazamiento modal del primer modo de vibración en el nivel i ,

S_a = Aceleración espectral, correspondiente al periodo fundamental, espectro DBE,

ϕ_{roof} = Desplazamiento modal en el último nivel (primer modo de vibración),

B = Factor de modificación de respuesta debido al amortiguamiento.

El rango del valor del coeficiente de amortiguamiento “C” está influenciado por las condiciones de la estructura, tales como el período, la regularidad, el número de niveles, entre otros factores. Por otro lado, el parámetro λ depende del valor del exponente de velocidad α . El FEMA 274 proporciona una tabla con los valores correspondientes para estos parámetros (ver Tabla 2).

Tabla 2

Valores del parámetro λ .

Exponente α	Parámetro λ
0.25	3.7
0.5	3.5
0.75	3.3
1	3.1
1.25	3
1.5	2.9
1.75	2.8
2	2.7

Fuente: FEMA PUBLICATION 274

Es importante tener en cuenta que la rigidez axial del dispositivo es menor que la del brazo al cual está conectado. Para calcular esta rigidez, se emplea la siguiente expresión, que permite determinar la rigidez del brazo metálico que se une a la estructura principal:



$$K = \frac{EA}{L}$$

Donde:

E = *Módulo de elasticidad del material,*

A = *Área de la sección del brazo metálico,*

L = *Longitud del brazo metálico.*

5.2.6. Análisis cronológico no lineal con disipadores

El análisis no lineal cronológico con FVD evalúa la respuesta dinámica de una estructura sometida a cargas sísmicas, considerando la no linealidad en los disipadores. El análisis se realiza con registros sísmicos corregidos y escalados con el DBE, y se aplican como aceleraciones en la base. Se comparan los resultados con y sin FVD, evaluando la reducción de derivas y fuerzas internas.

El numeral 18.4.2 de la ASCE 7-22 establece que los disipadores y sus conexiones deben dimensionarse para resistir las fuerzas, desplazamientos y velocidades generadas por los movimientos del suelo del sismo máximo de diseño (MCE).

Es importante verificar el correcto funcionamiento de los disipadores asegurándose de que sus curvas de histéresis muestren la forma característica de los FVD. Estos ciclos tienden a ser semi-elípticos y más “redondeados” en condiciones normales, pero a medida que aumenta la velocidad de carga, la curva se aproxima a una forma más cuadrada. Este cambio indica una mayor capacidad de disipación de energía en cada ciclo, aunque la curva conserva su forma elíptica básica.



Esta verificación confirma que los disipadores estén trabajando adecuadamente para maximizar la eficiencia de disipación sin aumentar la rigidez estructural.

Con base en las propiedades técnicas proporcionadas por los distribuidores de disipadores en Colombia, se seleccionan los disipadores adecuados y se recopila la información esencial para su fabricación.

6. Descripción de estructuras

Se plantearon dos estructuras de acero con configuración regular para uso institucional (grupo de uso III), ambas con la misma configuración en planta (ver Ilustración 1). Se clasifican dos tipos de pórticos: los pórticos resistentes a momento (PRM) y los pórticos gravitacionales (PG) (ver Ilustración 2). Las edificaciones tienen cinco vanos de cinco metros de longitud en ambas direcciones. Las estructuras tienen cuatro y seis pisos, la altura del primer piso en ambas estructuras es de 3.2 metros, mientras que los pisos superiores tienen una altura de 2.8 metros. En las Ilustraciones 3 y 4, se muestran los pórticos 1 de las estructuras de cuatro y seis pisos, respectivamente. Las columnas y vigas de los PRM son perfiles WF GERDAU, mientras que las columnas y vigas de los PG son perfiles HEA e IPE, respectivamente. Todos estos perfiles son comercializados por empresas como CYRGO en Colombia y están fabricados en acero ASTM A 572 Grado 50.



Ilustración 1

Configuración en planta de las dos estructuras, edificios 4 y 6 pisos.

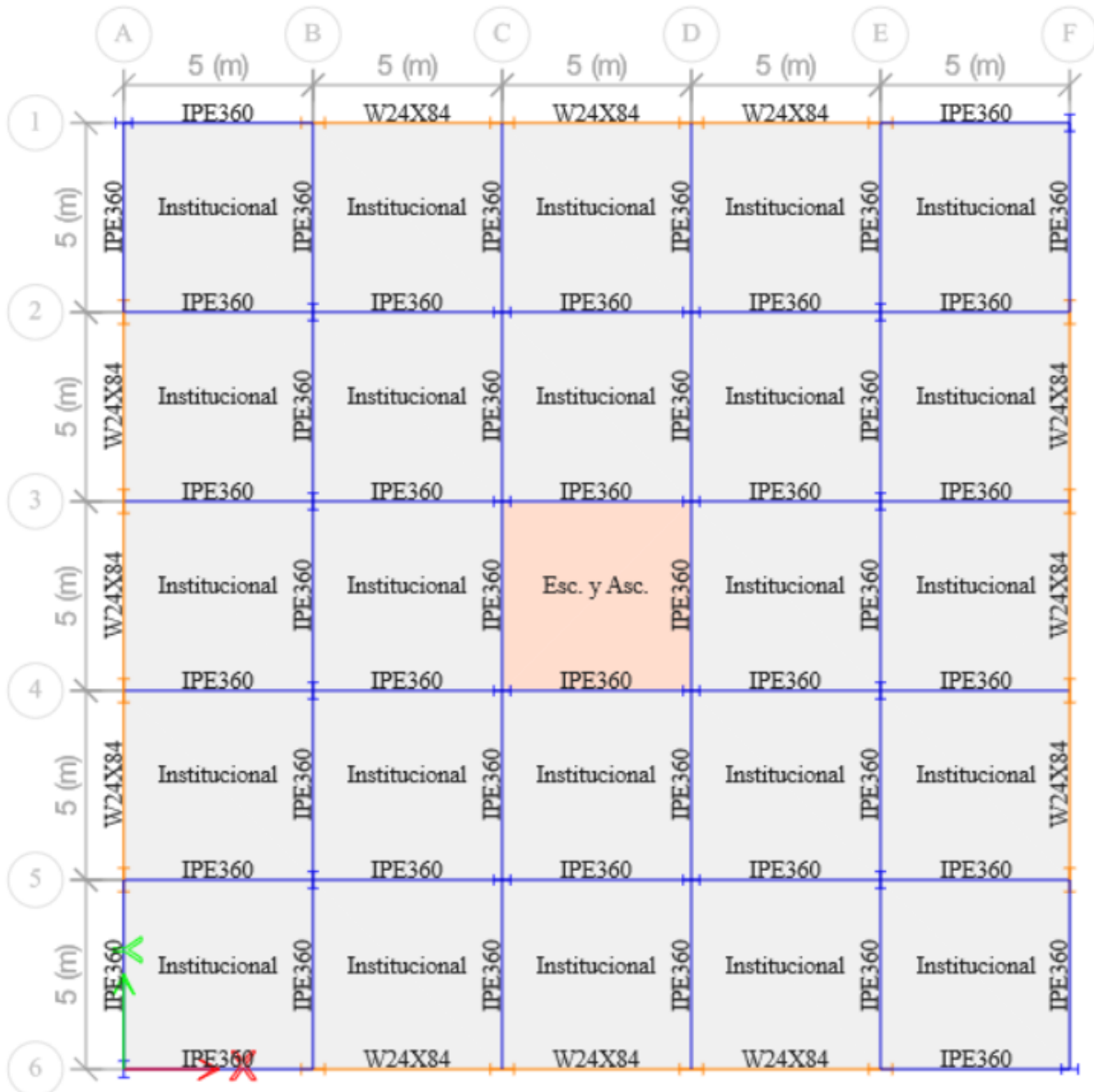
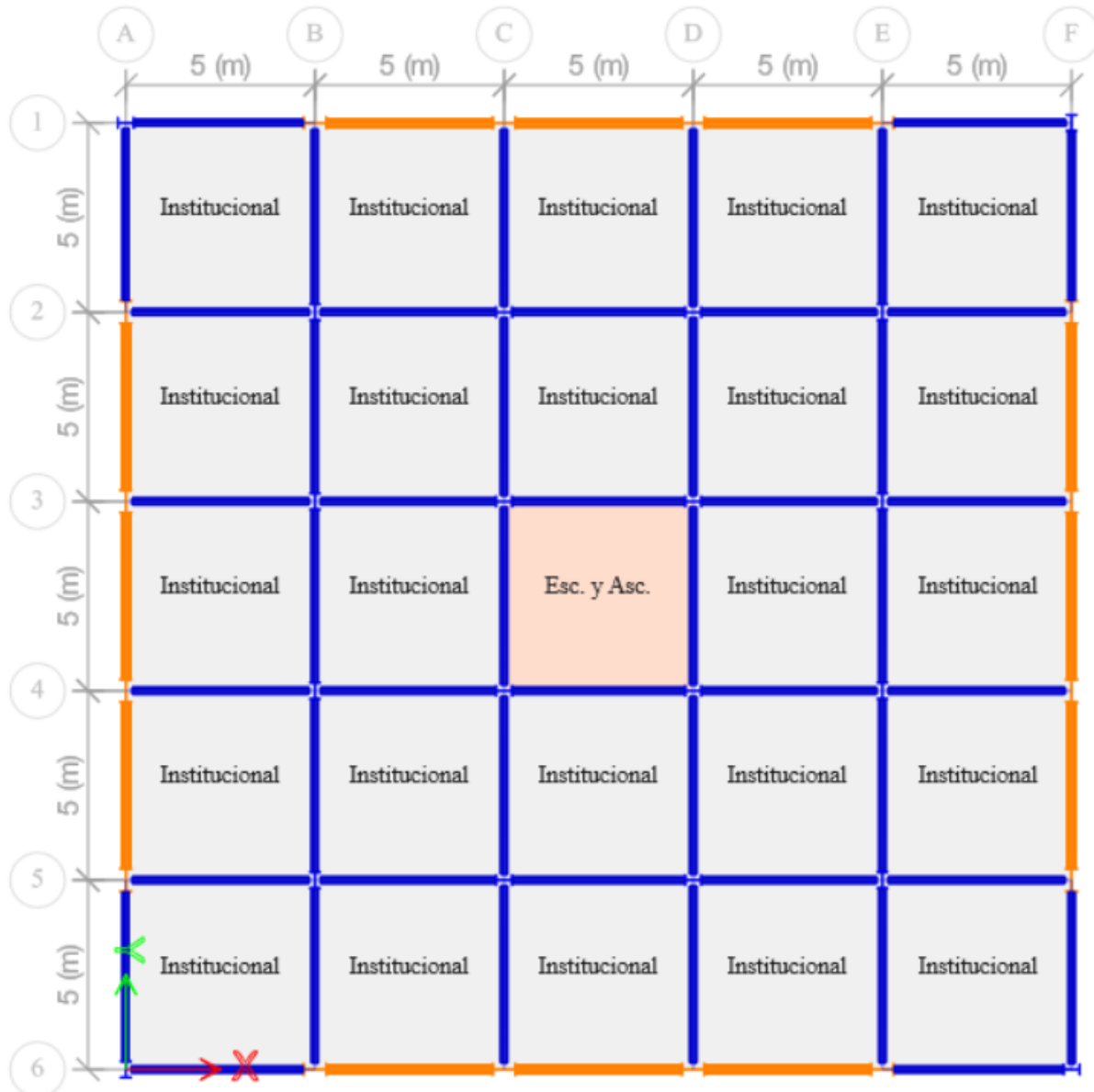




Ilustración 2

Distribución de pórticos gravitacionales y pórticos resistentes a momento, edificios 4 y 6 pisos.



Nota: Los PRM se identifican con el color naranja y los PG en color azul.



Ilustración 3

Pórtico 1 estructura de 4 pisos y distribución de pórticos PG y PRM edificio de 4 pisos.

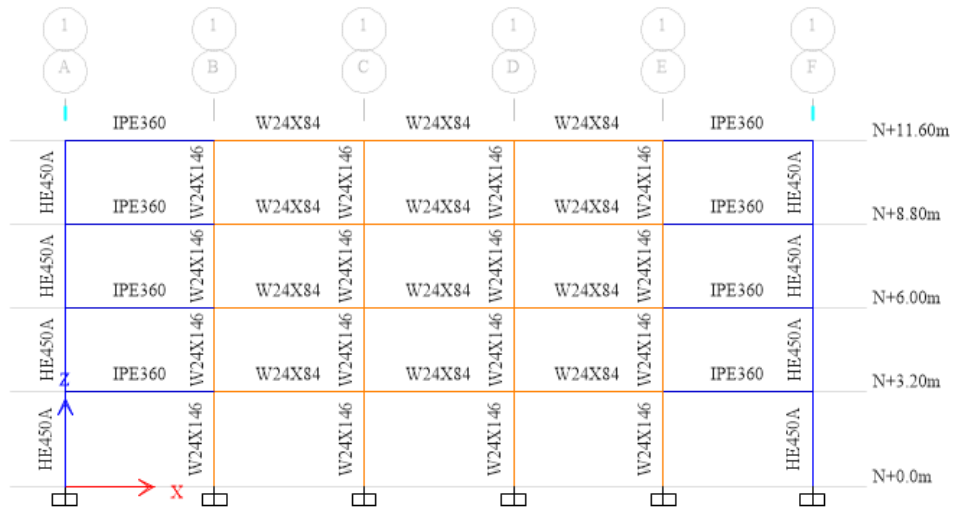
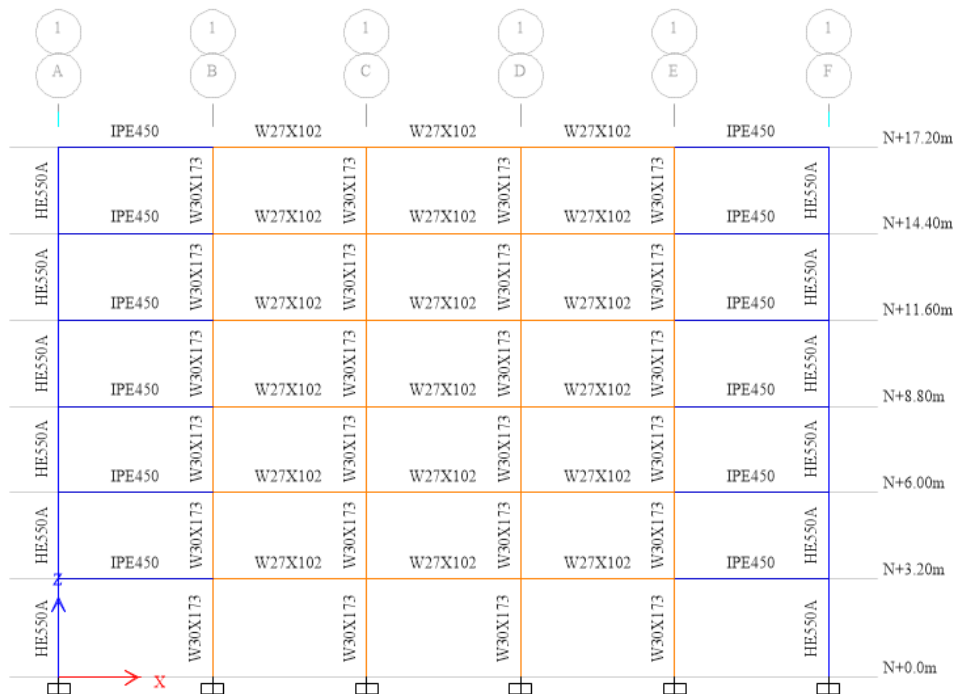


Ilustración 4

Pórtico 1 estructura de 6 pisos y distribución de pórticos PG y PRM edificio de 4 pisos.





En la Tabla 3 se presenta el avalúo de cargas, el cual se realizó conforme al Título B de la NSR-10, considerando el uso institucional previsto para ambas estructuras. La masa sísmica del edificio incluye la totalidad del peso propio de los elementos estructurales, así como la carga sobreimpuesta.

Tabla 3

Avalúo de cargas según Título B de la NSR-10 para las dos estructuras.

Concepto	Cantidad
1. Entrepiso	
Lámina Colaborante C.20 + losa concreto 12cm	221 kgf/m ²
Viguetas tipo cajón 2P12-11. Separación=1.25m	12.6 kgf/m ²
Peso propio	233.6 kgf/m ²
Fachada y particiones	200 kgf/m ²
Afinado de piso y cubierta	150 kgf/m ²
Carga sobreimpuesta	350 kgf/m ²
Carga muerta total	583.6 kgf/m ²
Carga viva (salones de clase)	200 kgf/m ²
Carga viva (corredores y escaleras)	500 kgf/m ²
2. Cubierta	
Estructura metálica cubierta	100 kgf/m ²
Peso propio	100 kgf/m ²
Carga viva	50 kgf/m ²

Para el análisis en ETABS v.20.3, se define una losa equivalente en concreto reforzado que representa únicamente el peso propio de la losa, constituida por una lámina colaborante C.20 combinada con una capa de concreto de 12 cm de espesor y viguetas tipo cajón 2P12-11 con una



separación de 1.25 metros (ver Tabla 4). La losa trabaja en dos direcciones, de modo que las viguetas se distribuyen en ambos sentidos.

Tabla 4

Losa equivalente en concreto para modelado en software ETABS v.20.3 de las dos estructuras.

Peso volumétrico concreto	2400 kgf/m ³
Espesor equivalente entrepiso	9.73 cm
Espesor equivalente cubierta	4.17 cm

El cálculo del coeficiente de disipación de energía (ver Tabla 5), toma en cuenta que ninguna de las estructuras presenta irregularidades en altura, en planta o por ausencia de redundancia; sin embargo, este coeficiente se ve afectado por las soldaduras realizadas en el sistema de resistencia sísmica.

Tabla 5

Cálculo del coeficiente de capacidad de disipación de energía según NSR-10.

Coeficiente	Sentido X	Sentido Y
$R_0 =$	7	7
$\phi_a =$	1	1
$\phi_p =$	1	1
$\phi_r =$	1	1
$\phi_s =$	0.9	0.9
$R =$	6.3	6.3

En este proyecto se analizaron las estructuras siguiendo los criterios establecidos en la NSR-10 para la ciudad de Popayán, Cauca. Los parámetros del suelo para caracterizar la respuesta sísmica del sitio se presentan en la Tabla 6.



Tabla 6

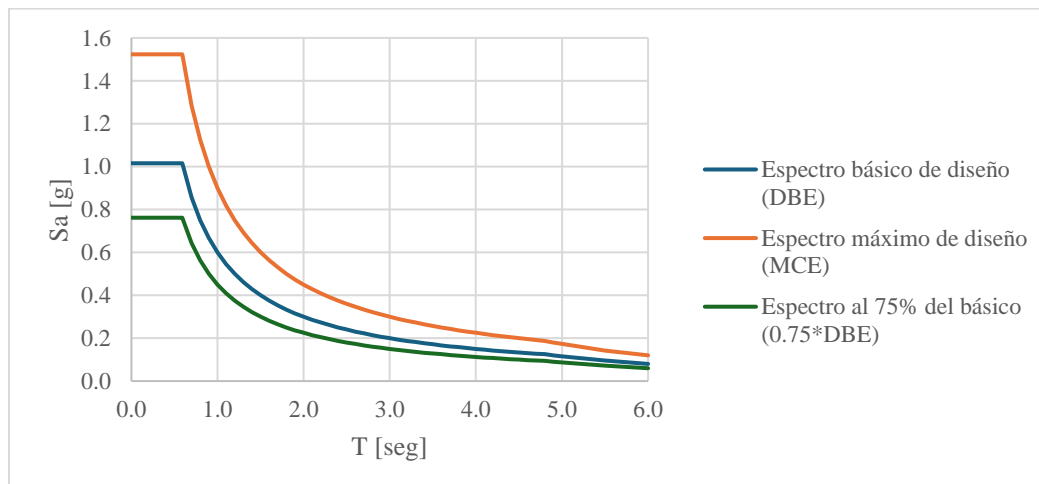
Parámetros amenaza sísmica de la ciudad de Popayán, NSR-10.

Tipo de Suelo	D
Grupo de uso estructuras	III
Coefficiente de Importancia	1.25
A _a	0.25
F _a	1.30
A _v	0.20
F _v	2.00
T _c	0.59
T _L	4.80

En la Ilustración 5 se presentan los espectros de aceleración para diseño; el espectro calculado con el sismo básico de diseño (DBE), el espectro calculado con el 150% del sismo de diseño (denominado MCE), y el espectro calculado con el 75% del DBE; todos están expresados como fracción de la gravedad (g).

Ilustración 5

Espectros de aceleración para diseño





7. Selección y procesado de Acelerogramas.

En la zonificación de respuesta sísmica de Popayán (versión de discusión, 2020), se identifican los sismos compatibles con las características geotécnicas específicas de la ciudad.

Tabla 7

Descripción de las señales seleccionadas en la zonificación de respuesta sísmica de Popayán.

Grupo	Señal	Nombre	Estación	Año	Magnitud	Obs.	PGA [g]	Distancia [km]	Int. Arias [m/s]
1 ^a	PGA [0.1g] señal 1	Morgan Hill	Gilroy Array #1	1984	6.19	EW	0.09	14.9	0.06
1 ^a	PGA [0.1g] señal 2	Hollister-03	Gilroy Array #1	1984	5.14	NS	0.1	9.9	0.03
1 ^a	PGA [0.1g] señal 3	San Fernando	Pasadena - Old Seismo Lab	1971	6.61	NS	0.1	21.5	0.11
2 ^a	PGA [0.1g] señal 4	Japan - 2003	KSRH10	2003	6.8	EW	0.09	180	0.01
2 ^a	PGA [0.1g] señal 5	Japan - 2013	KSRH05	2013	6.5	EW	0.09	90	0.01
2 ^a	PGA [0.1g] señal 6	Japan - 2011	IWTH04	2011	7.1	EW	0.1	118	0.02
2 ^a	PGA [0.1g] señal 7	Nueva Zelanda	JACS	2003	7.2	-	0.08	185	0.02
1B	PGA [0.25g] señal 1	Tottori, Japan	SMNH10	2000	6.61	NS	0.16	15.6	0.2
1B	PGA [0.25g] señal 2	Tottori, Japan	SMNH10	2000	6.61	EW	0.23	15.6	0.48
1B	PGA [0.25g] señal 3	Parkfield-02	PARKFIELD - TURKEY FLAT	2004	6	NS	0.25	4.6	0.17
1B	PGA [0.25g] señal 4	Parkfield-02	PARKFIELD - TURKEY FLAT	2004	6	EW	0.26	4.6	0.17
2B	PGA [0.25g] señal 5	URAKAWA	HKD109	2003	8	EW	0.19	117	0.22
2B	PGA [0.25g] señal 6	IWANUMA	MYG015	2005	7.2	EW	0.16	124	0.13
2B	PGA [0.25g] señal 7	URAKAWA	HKD109	2003	8	NS	0.18	117	0.2
1C	PGA [0.35g] señal 1	Friuli	Tolmezzo-Diga Ambiesta	1976	6.5	NS	0.46	28.4	0.77
1C	PGA [0.35g] señal 2	Loma Prieta	Gilroy Array #1	1989	6.93	?	0.48	8.48	1.06
1C	PGA [0.35g] señal 3	Loma Prieta	Gilroy Array #1	1989	6.93	NS	0.48	8.48	1.69
2C	PGA [0.35g] señal 4	TAIKI	HKD098	2003	8	NS	0.23	103	0.5
2C	PGA [0.35g] señal 5	TAIKI	HKD098	2003	8	NS	0.23	103	0.49
1D	PGA [0.7g] señal 1	Landers	Lucerne	1992	7.28	NS	0.79	2.19	6.58
1D	PGA [0.7g] señal 2	Landers	Lucerne	1992	7.28	EW	0.75	2.19	6.52
2D	PGA [0.7g] señal 3	Duzce, Turkey	IRIGM 496	1999	7.14	EW	0.75	4.21	0.56
2D	PGA [0.7g] señal 4	Japan-07-04-11	IWT009	2011	6.7	137	0.87	4.87	2.8
2D	PGA [0.7g] señal 5	Japan-07-04-11	MYGH04	2011	7.4	EW	0.63	192.2	5.51

Fuente: Zonificación de respuesta sísmica de Popayán (versión de discusión, 2020)



En la Tabla 7, se presentan los registros sísmicos internacionales correspondientes. Los registros sísmicos se descargaron de las bases de datos PEER Ground Motion Database, K-Net, Kik-Net, Institute of Geological and Nuclear Sciences Ltd. New Zealand y Center for Engineering Strong Motion Data.

Chaparro (2017), recomienda el uso del software libre PRISM para el procesamiento de sismos. Primero, se verificó si los registros sísmicos ya cuentan con la corrección de línea base y el filtrado Butterworth; en caso de que no tengan este procesamiento, se les aplicó en el software.

Posteriormente, los acelerogramas se escalaron en el software SeismoMatch, utilizando tanto el espectro básico de diseño (DBE) como el espectro máximo de diseño (MCE). Se seleccionan 7 pares de registros sísmicos:

- Japan-2003
- Japan-2013
- Japan-2011
- Totorri, Japan
- Parkfield-02
- TAIKI
- Duzce, Turkey

Esta selección se hace debido a que, en el software SeismoMatch, sus gráficos de aceleración, velocidad y desplazamiento oscilan alrededor del eje de las abscisas, mientras que los demás tienden a desviarse hacia arriba o hacia abajo. En las Ilustraciones 6 y 7, se presentan los registros sísmicos seleccionados en las direcciones Este-Oeste y Norte-Sur, respectivamente.



Ilustración 6

Registros sísmicos sin escalar dirección E-W.

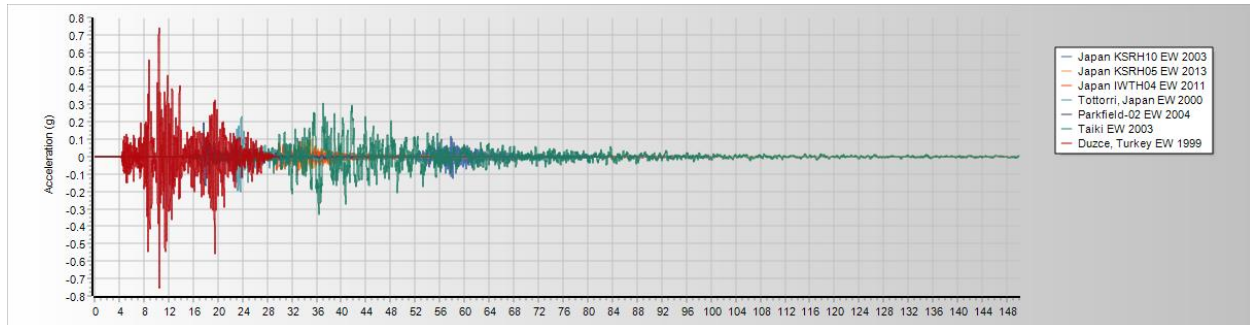
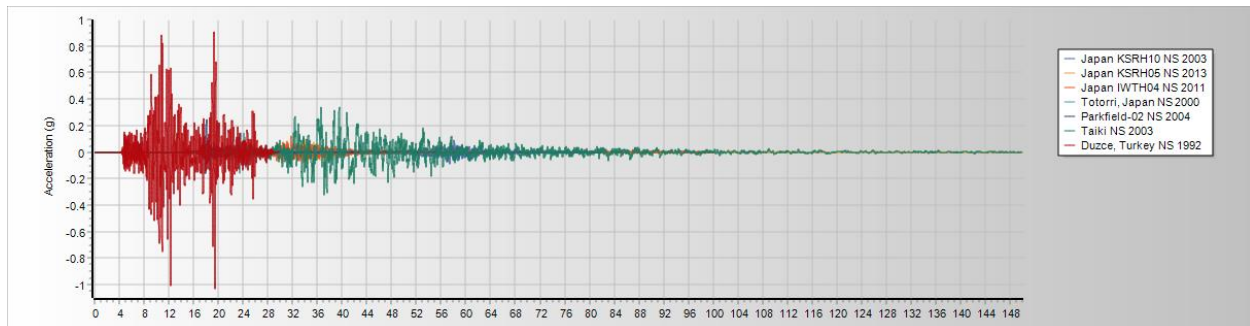


Ilustración 7

Registros sísmicos sin escalar dirección N-S.



En las Ilustraciones 8 y 9, se presentan los registros escalados ajustados para coincidir con el espectro básico de diseño (DBE).



Ilustración 8

Registros sísmicos escalados con el DBE dirección E-W.

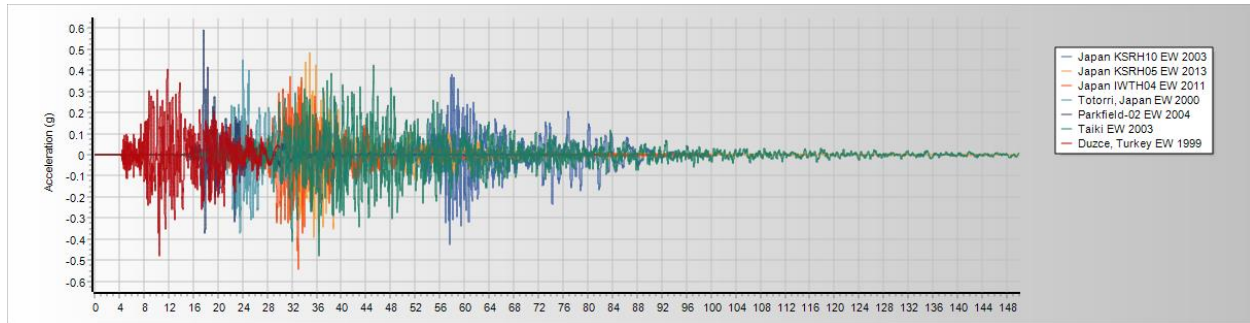
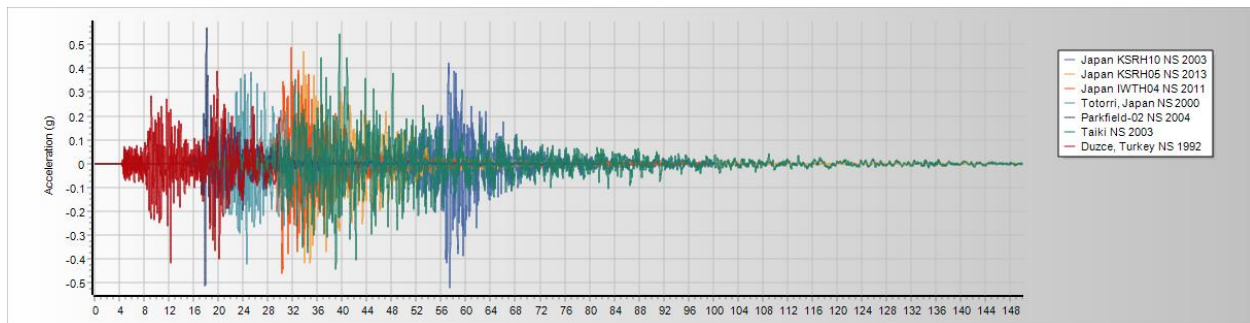


Ilustración 9

Registros sísmicos escalados con el DBE dirección N-S.



En las Ilustraciones 10 y 11, se presentan los registros escalados ajustados para coincidir con el espectro máximo de diseño (MCE).



Ilustración 10

Registros sísmicos escalados con el MCE dirección E-W.

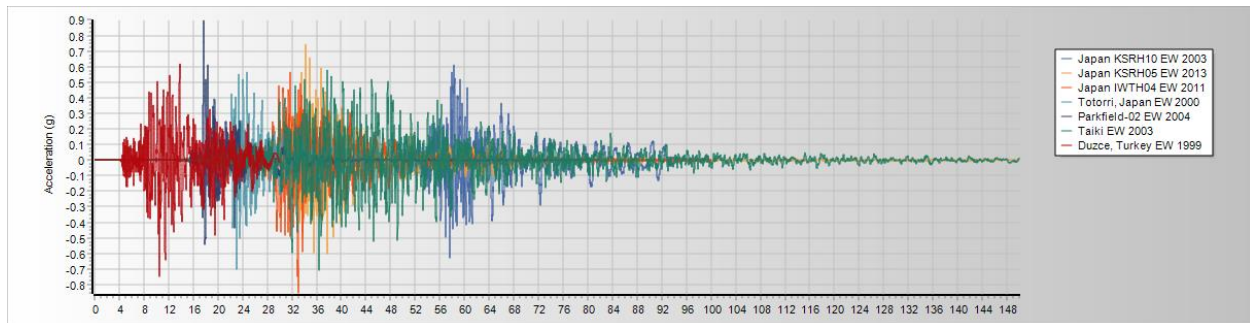
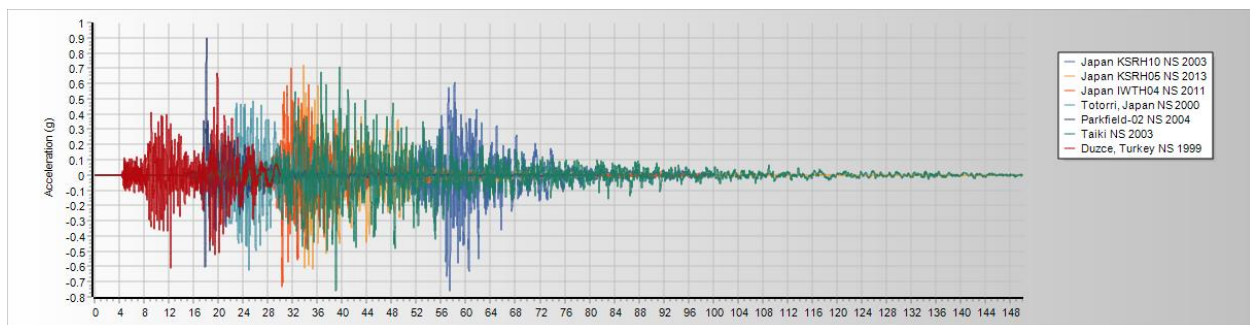


Ilustración 11

Registros sísmicos escalados con el MCE dirección N-S.



En las Ilustraciones 12 y 13, se presentan el espectro DBE y el promedio de los 7 pares de registros escalados en las direcciones Norte-Sur y Este-Oeste, respectivamente. De igual manera, en las Ilustraciones 14 y 15, muestran el espectro MCE y el promedio de los registros escalados en ambas direcciones. Se observa que el proceso de escalado es consistente, ya que los registros escalados se alinean correctamente con los espectros objetivo.



Ilustración 12

Espectro objetivo DBE y espectro promedio escalado dirección E-W.

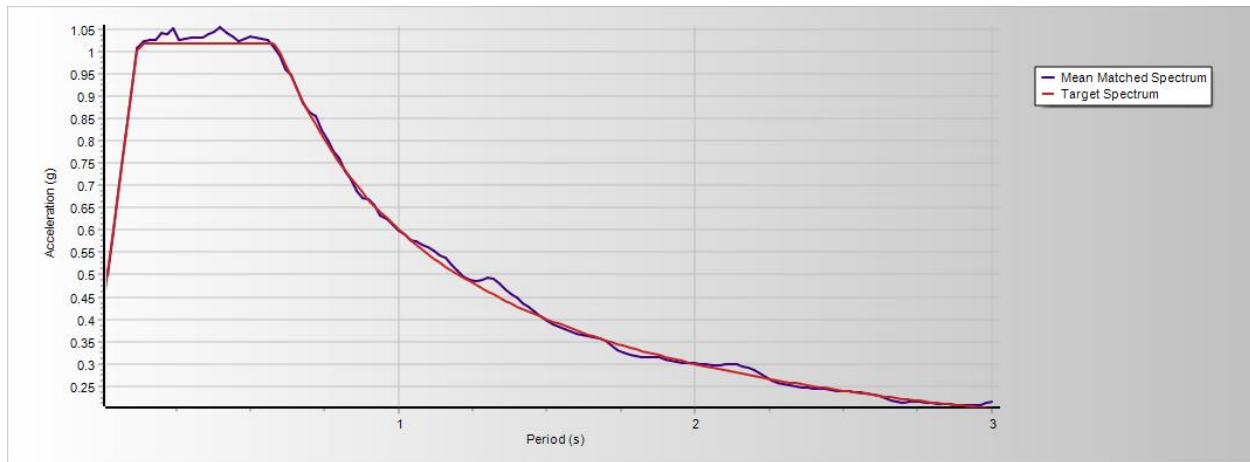


Ilustración 13

Espectro objetivo DBE y espectro promedio escalado dirección N-S.

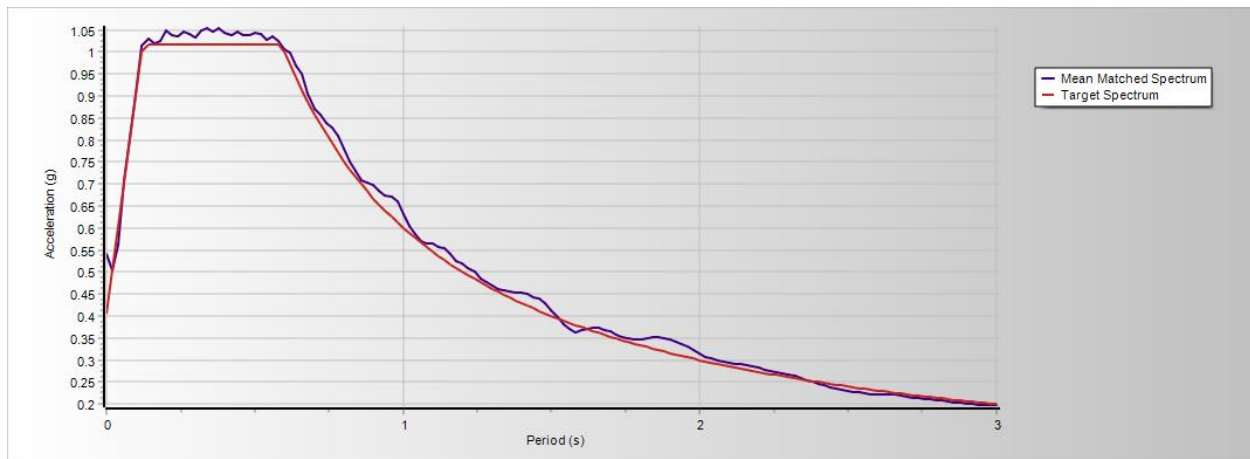




Ilustración 14

Espectro objetivo MCE y espectro promedio escalado dirección E-W.

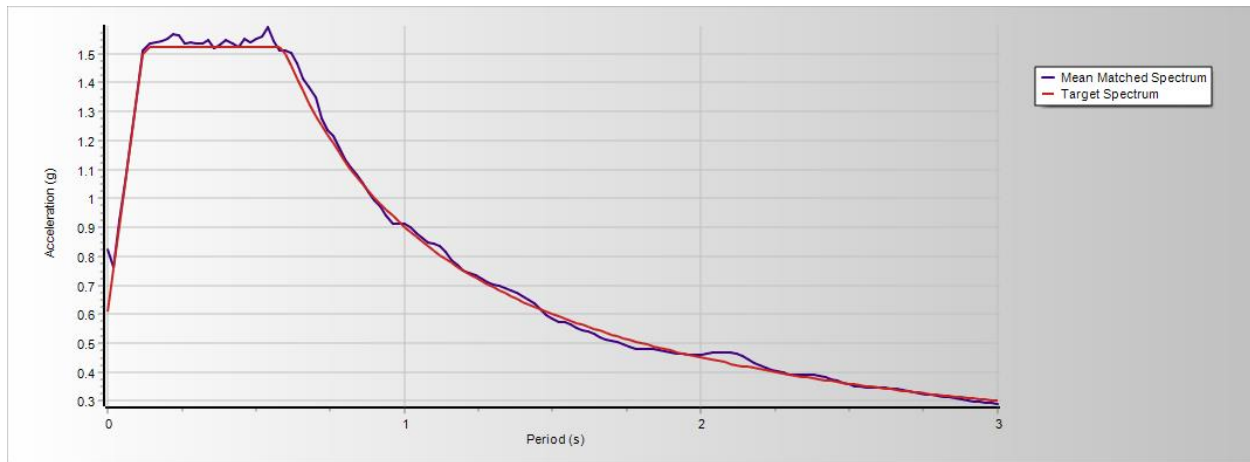
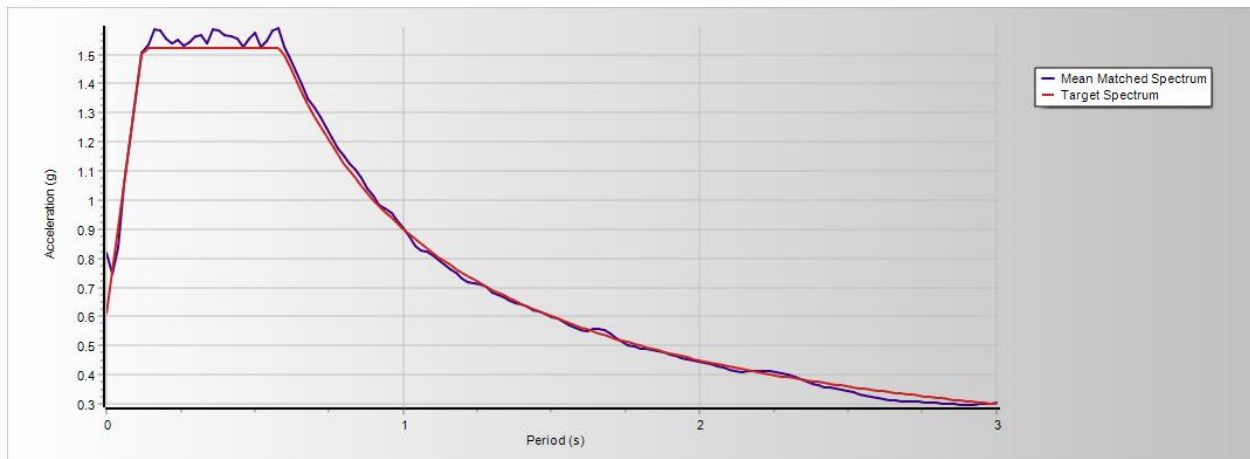


Ilustración 15

Espectro objetivo MCE y espectro promedio escalado dirección N-S.





8. Análisis estructura sin disipadores

8.1. Análisis modal espectral con el 75% de la demanda sísmica

Según la ASCE 7-22, la estructura sin disipadores debe ser diseñada considerando la máxima demanda sísmica entre $1/B$ y 0.75 . En el Capítulo 10, se calcula el factor de reducción (B) para cada dirección de ambas estructuras, siendo el valor mínimo registrado de 1.85. De acuerdo con lo anterior, el diseño debe cumplir la máxima demanda sísmica de una de las siguientes condiciones:

$$V_{min} = \text{máx} \left(\frac{1}{B} V; 0.75V \right)$$

$$V_{min} = \text{máx} \left(\frac{1}{1.85} V; 0.75V \right)$$

$$V_{min} = \text{máx}(0.54V; 0.75V)$$

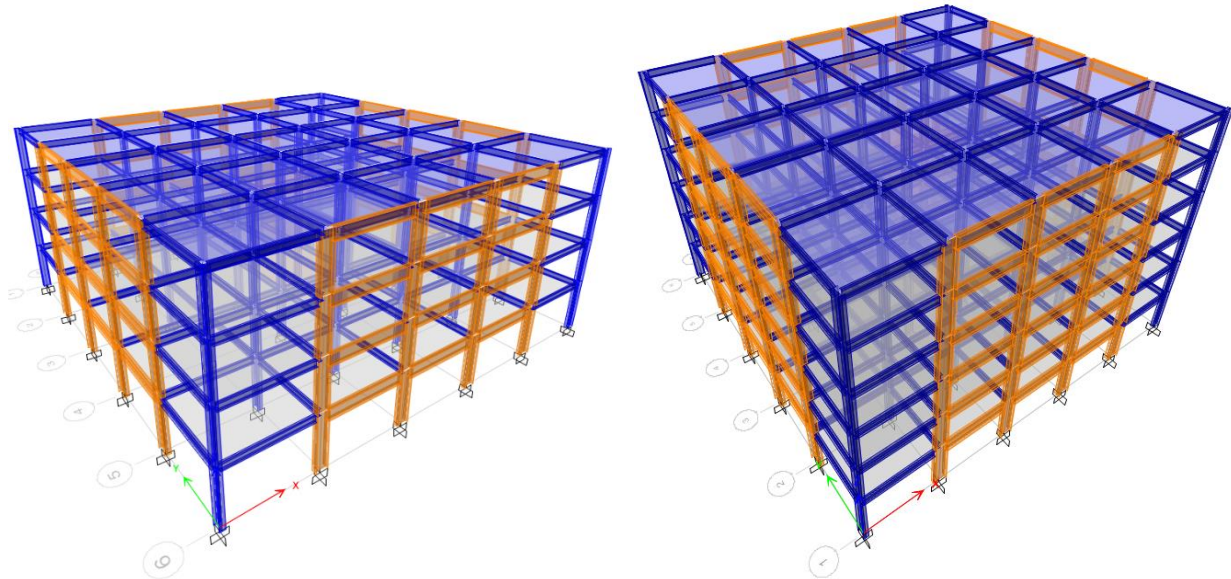
En este caso, ambas estructuras sin disipadores deben diseñarse para la mayor demanda sísmica descrita anteriormente, que corresponde al 75% de la demanda sísmica total.

El modelado de las dos estructuras de acero se realizó en el software ETABS v.20.3. En la Ilustración 16.a se presenta la estructura de 4 pisos, y en la Ilustración 16.b se muestra la estructura de 6 pisos. El período fundamental de la estructura de 4 pisos es 0.551 segundos y 0.588 segundos para la de 6 pisos. En la Tabla 8 se presenta la corrección por cortante basal para ambas estructuras de acero.



Ilustración 16

Vista 3D de las estructuras en ETABS v.20.3.



a. Estructura 4 pisos en vista 3D software ETABS b. Estructura 6 pisos en vista 3D software ETABS

v.20.3.

v.20.3.

El diseño de los elementos estructurales se llevó a cabo utilizando las combinaciones de carga establecidas en la sección 5.2.1. Los PRM se verificaron bajo el tipo de pórtico SMF (Special Moment Frame), mientras que los PG se verificaron con el tipo de pórtico OMF (Ordinary Moment Frame), ya que, para los pórticos gravitacionales, la ductilidad no es un requisito crítico. En las Ilustraciones 17 y 18, se muestra el chequeo de las vigas del primer nivel de las estructuras de 4 y 6 pisos, respectivamente. Asimismo, todas las vigas de los edificios presentan un índice de sobreesfuerzo inferior a 1.0.



Tabla 8

Corrección por cortante basal estructura 4 y 6 pisos.

Concepto	Estructura 4 pisos	Estructura 6 pisos
Carga muerta base Etabs	1306.88 tonf	2165.21 tonf
Carga viva base Etabs	0.00 tonf	0.00 tonf
Peso estructura Etabs	1306.88 tonf	2165.21 tonf
Gravedad	9.8067 m/s ²	
T _x = T ₂	0.551 s	0.588 s
T _y = T ₁	0.551 s	0.588 s
Cu*Ta (Cumple Chequeo)	0.650 s	0.890 s
Sax	0.762	0.588
Say	0.762	0.588
Tipo Estructura	Regular	Regular
Ajuste	0.80	0.80
Peso estructura X FHE	796.7 tonf	1018.5 tonf
Peso estructura Y FHE	796.7 tonf	1018.5 tonf
Sismo X Etabs	839.8 tonf	1061.1 tonf
Sismo Y Etabs	839.8 tonf	1061.1 tonf
Factor escalamiento X	1.0000	1.0000
Factor escalamiento Y	1.0000	1.0000
Aceleración para Chequeo de Derivas		
SX AJ	9.8067	9.8067
SY AJ	9.8067	9.8067
Aceleración para Diseño		
EX	1.5566	1.5566
EY	1.5566	1.5566



Ilustración 17

Chequeo vigas del piso 1, estructura de 4 pisos.

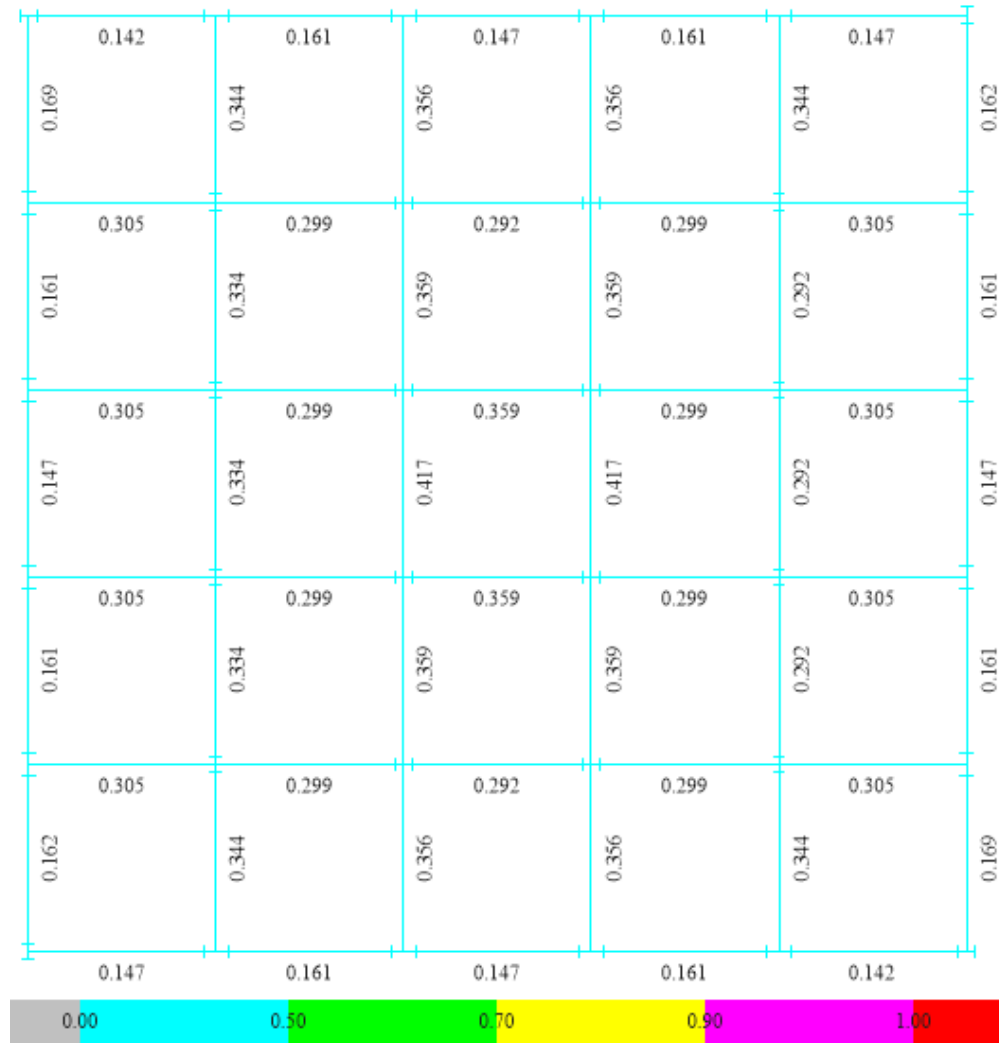
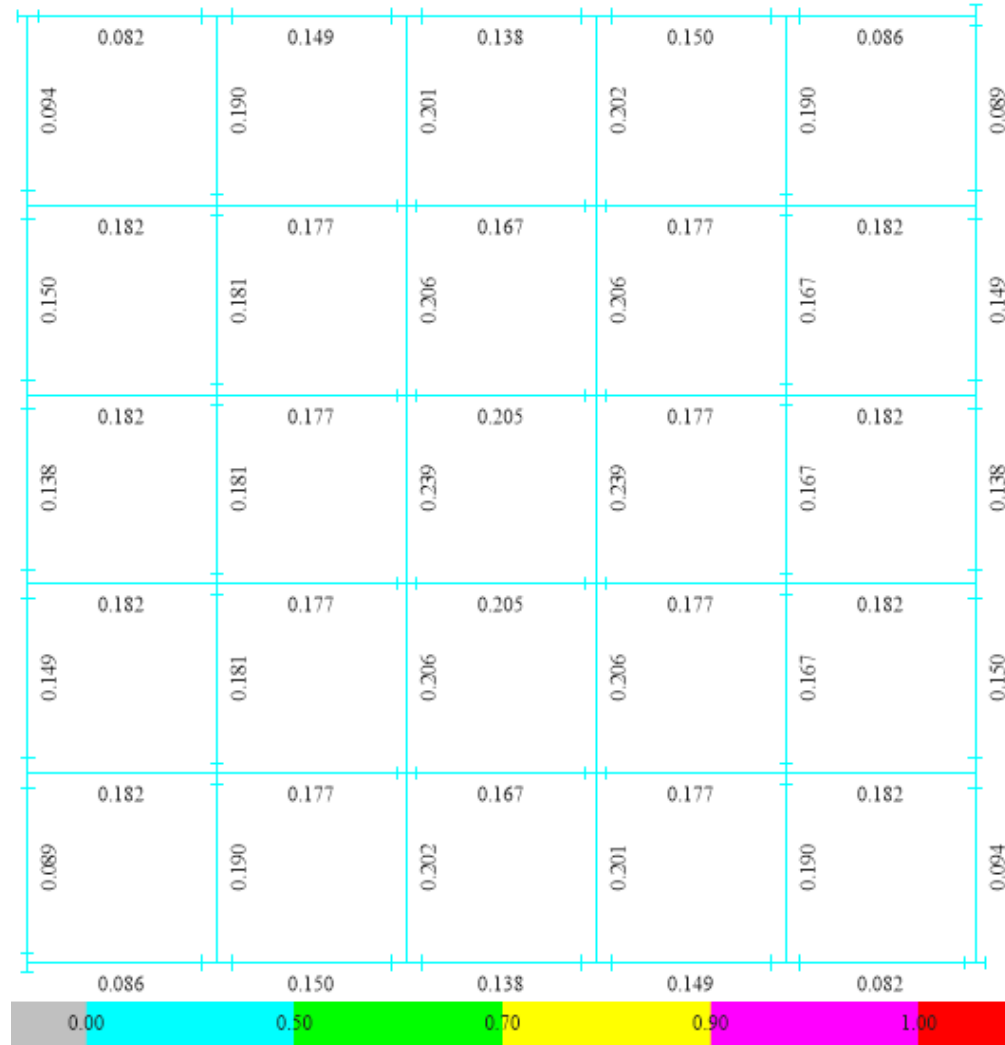




Ilustración 18

Chequeo vigas del piso 1, estructura de 6 pisos.



En las Ilustraciones 19 y 20, se presenta el chequeo de las columnas de las estructuras de 4 y 6 pisos, respectivamente. Verificando que todos los tramos tienen un índice de sobreesfuerzo menor a 1.0.



Ilustración 19

Chequeo índices de sobreesfuerzo columnas de la estructura de 4 pisos.

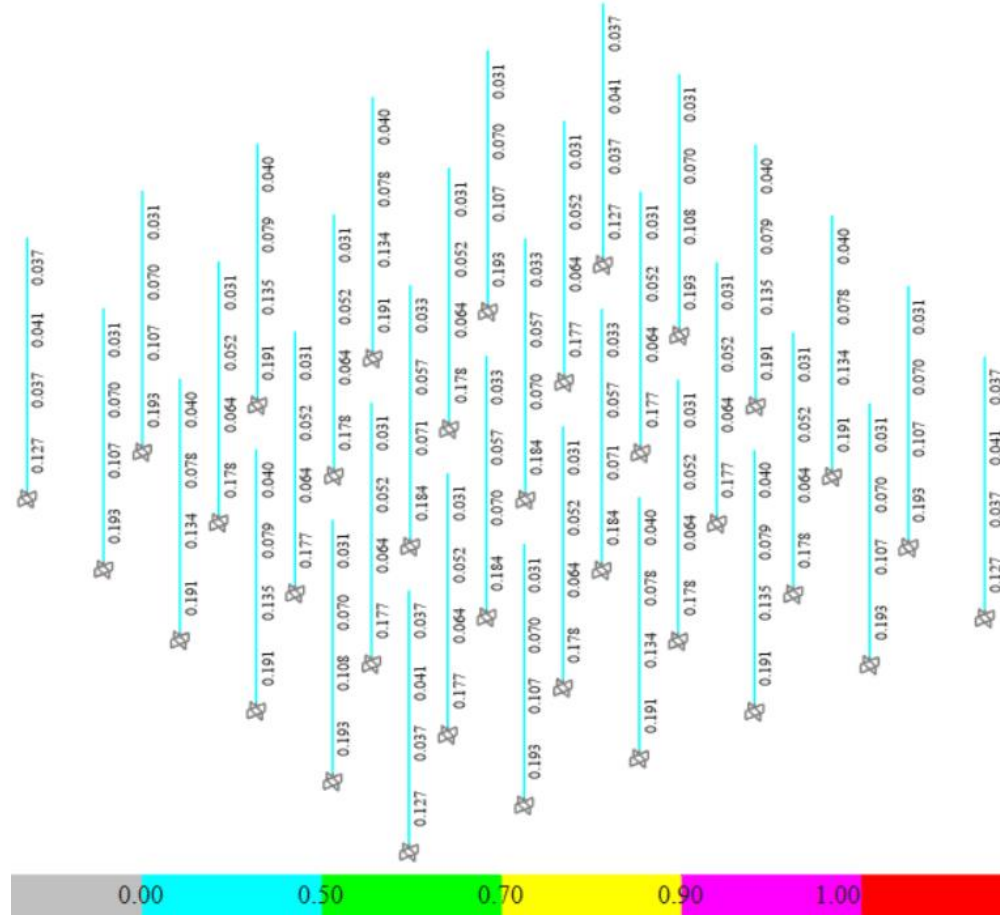




Ilustración 20

Chequeo índices de sobreesfuerzo columnas de la estructura de 6 pisos.





8.2. Análisis cronológico lineal

Para el análisis cronológico lineal, se consideraron los siguientes casos de aplicación de la carga sísmica:

- Caso 1: Los registros sísmicos E-W actúan al 100% en el sentido X, con su componente N-S al 30% en el sentido Y.
- Caso 2: Los registros sísmicos N-S actúan al 100% en el sentido Y, con su componente E-W al 30% en el sentido X.

En este análisis, se evaluó si es necesaria la corrección por cortante basal para asegurar que el valor del cortante dinámico total en la base de cada registro sísmico no sea inferior al cortante sísmico calculado mediante el método de la fuerza horizontal equivalente. En este caso, el cortante dinámico es superior al estático, por lo que no es necesario aplicar factores de corrección. En la Tabla 9, se presentan el cortante basal dinámico y estático obtenidos para la estructura de 4 pisos, y en la Tabla 10, se muestran para la estructura de 6 pisos.

Tabla 9

Corrección por cortante basal, estructura de 4 pisos, para análisis cronológico lineal.

Registro sísmico	Vex [tonf]	Vey [tonf]	Vdx [tonf]	Vdy [tonf]
DBE Duzce Turkey 1999	796.7	796.7	1156.3	1178.0
DBE Japan IWTH04 2011	796.7	796.7	1090.5	1184.1
DBE Japan KSRH05 2013	796.7	796.7	1152.9	1222.2
DBE Japan KSRH10 2003	796.7	796.7	1260.7	1153.2
DBE Parkfield California 2004	796.7	796.7	1125.8	1128.9
DBE Taiki Japan 2003	796.7	796.7	1148.2	1273.4
DBE Totorri Japan 2000	796.7	796.7	1139.1	1148.8



Tabla 10

Corrección por cortante basal, estructura de 6 pisos, para análisis cronológico lineal.

Registro sísmico	Vex [tonf]	Vey [tonf]	Vdx [tonf]	Vdy [tonf]
DBE Duzce Turkey 1999	1018.5	1018.5	1464.9	1415.9
DBE Japan IWTH04 2011	1018.5	1018.5	1427.2	1365.4
DBE Japan KSRH05 2013	1018.5	1018.5	1399.4	1453.4
DBE Japan KSRH10 2003	1018.5	1018.5	1408.3	1413.4
DBE Parkfield California 2004	1018.5	1018.5	1533.5	1478.9
DBE Taiki Japan 2003	1018.5	1018.5	1349.4	1437.4
DBE Totorri Japan 2000	1018.5	1018.5	1407.8	1833.9

La estructura sin disipadores debe alcanzar una deriva tal que, al calcular la deriva objetivo para la estructura con disipadores para el nivel de daño moderado, el amortiguamiento efectivo máximo del 35% establecido en la ASCE 7-22, no sea excedido. En el Capítulo 10 del presente documento, se demuestra que, con las derivas obtenidas para la estructura sin disipadores, es posible alcanzar un nivel de daño moderado con un amortiguamiento efectivo de aproximadamente 34%, cumpliendo así con el límite máximo permitido. Si este chequeo no se cumple, sería necesario rediseñar la estructura sin disipadores. En la Tabla 11, se presentan las derivas obtenidas del análisis cronológico lineal sin disipadores.

Tabla 11

Derivas obtenidas del análisis cronológico lineal para las estructuras sin disipadores.

Piso	Estructura 4 pisos		Estructura 6 pisos	
	Deriva X	Deriva Y	Deriva X	Deriva Y
6	-	-	0.46%	0.46%
5	-	-	0.77%	0.76%
4	0.63%	0.61%	1.09%	1.10%
3	1.06%	1.04%	1.27%	1.31%
2	1.31%	1.31%	1.27%	1.32%
1	0.88%	0.90%	0.76%	0.79%



9. Disipadores de fluido viscoso comercializados en Colombia

En Colombia todavía no existen edificaciones que incorporen disipadores de fluido viscosos en su diseño. Esto se debe, en gran parte, a los costos iniciales adicionales que su implementación implica. Sin embargo, no se considera que, al reducir los daños causados por un evento sísmico, también se disminuyen significativamente los costos de reparación de la edificación. La empresa Efe-Prima-Ce tiene vinculación con Mageba, una compañía internacional reconocida, especializada en el diseño y fabricación de apoyos estructurales, juntas de dilatación, sistemas de protección antisísmica y monitoreo estructural. En la Tabla 12 se detallan las características y propiedades de los disipadores RESTON SA de Mageba.

Tabla 12

Características y dimensiones disipador RESTON SA de Mageba.

Tipo	Fuerza axial tonf	Desplazamiento máximo s [+/- mm]			
		50		100	
		D [mm]	L [mm]	D [mm]	L [mm]
SA 50	5	110	720	110	1020
SA 100	10	120	750	120	1050
SA 200	20	180	780	180	1080
SA 500	51	195	820	195	1120
SA 750	76	215	835	215	1135
SA 1000	102	235	855	235	1155
SA 1250	127	280	920	280	1220
SA 1500	153	295	990	295	1290
SA 1750	178	325	1045	325	1345
SA 2000	204	365	1190	365	1490
SA 2500	255	405	1270	405	1570
SA 3000	306	455	1385	455	1685
SA 4000	408	505	1505	505	1805

Nota: Los valores de fuerza axial en la tabla original están en kN y se han convertido a tonf.

Fuente: (Mageba, 2024)



10. Análisis estructura con disipadores

10.1. Predimensionamiento disipadores de fluido viscoso

Para el predimensionamiento de los FVD, se establece el nivel de daño en función del uso de la estructura. En este caso, la estructura es de uso institucional (Grupo III), lo que corresponde a un nivel de daño moderado. En la Tabla 13, se muestra que, para pórticos de acero resistentes a momento, la deriva objetivo para la estructura con disipadores, con nivel de daño moderado, es 0.69%.

Tabla 13

Relación de HAZUS, deriva-daño, según el tipo de estructura.

Propiedades de la Edificación			Deriva según estado de daño			
Edificación	Tipo	Altura (m)	Leve	Moderado	Extenso	Completo
Pórticos de acero a momento	Bajo	7.2	0.0060	0.0104	0.0235	0.06
	Medio	18	0.0040	0.0069	0.0157	0.04
	Alto	46.8	0.0030	0.0052	0.0118	0.03
Pórticos de acero arriostrados	Bajo	7.2	0.0050	0.0087	0.0233	0.06
	Medio	18	0.0033	0.0058	0.0156	0.04
	Alto	46.8	0.0025	0.0043	0.0117	0.03
Pórticos de concreto armado	Bajo	6	0.0050	0.0087	0.0233	0.06
	Medio	15	0.0033	0.0058	0.0156	0.04
	Alto	36	0.0025	0.0043	0.0117	0.03
Muros de concreto armado	Bajo	6	0.0040	0.0084	0.0232	0.06
	Medio	15	0.0027	0.0056	0.0154	0.04
	Alto	36	0.0020	0.0042	0.0116	0.03

Fuente: Hazus – Mullti-Hazard 2.1.

Con base en la deriva máxima promedio de los registros sísmicos, obtenida del análisis cronológico lineal y la deriva objetivo, determinada mediante la metodología HAZUS, se calcula el amortiguamiento efectivo necesario de la estructura con disipadores para alcanzar esta deriva



objetivo, sin exceder el límite máximo de 35% de amortiguamiento efectivo. En la Tabla 14, se presenta el cálculo teórico junto con los datos asumidos para el diseño.

Tabla 14

Cálculo deriva objetivo y amortiguamiento efectivo y viscoso.

Sentido	Estructura 4 pisos		Estructura 6 pisos	
	X	Y	X	Y
Deriva máxima promedio T.H.L.	1.31%	1.31%	1.27%	1.32%
Deriva objetivo según Hazus	0.69%	0.69%	0.69%	0.69%
B	1.90	1.90	1.85	1.91
β_{eff}	33.8	33.8	31.6	33.9
β_{visc}	28.8	28.8	26.6	28.9
Datos para diseño				
B	1.94	1.94	1.94	1.94
β_{eff}	35.0	35.0	35.0	35.0
β_{visc}	30.0	30.0	30.0	30.0

El cálculo del coeficiente de amortiguamiento requiere los valores mostrados en la Tabla 15, descritos en el marco teórico de este documento.

Tabla 15

Datos de entrada y cálculos preliminares para el coeficiente de amortiguamiento.

Sentido	Estructura 4 pisos		Estructura 6 pisos	
	X	Y	X	Y
α	0.5	0.5	0.5	0.5
Periodo, T	0.551 seg	0.551 seg	0.765 seg	0.765 seg
β_{visc}	30.0	30.0	30.0	30.0
Frecuencia, w	11.4 rad/s	11.4 rad/s	8.2 rad/s	8.2 rad/s
λ	3.5	3.5	3.5	3.5
Sa 4 pisos = 1.016g	9.96 m/s ²	9.96 m/s ²	7.69 m/s ²	7.69 m/s ²
Sa 6 pisos = 0.784g				
Φ_{roof}	0.11 m	0.11 m	0.16 m	0.16 m
B	1.90	1.90	1.85	1.91
D_{roof}	0.0572 m	0.0572 m	0.1030 m	0.0988 m



Para los desplazamientos modales, se considera el promedio de los desplazamientos máximos de los registros sísmicos del análisis cronológico lineal para cada piso. En las Tablas 16 y 17, se presentan los cálculos modales preliminares para las estructuras de 4 y 6 pisos, respectivamente.

Tabla 16

Cálculos modales preliminares de la estructura de 4 pisos en sentido X, para el coeficiente de amortiguamiento.

Piso	Modo, Φ_i [m]	Φ_i^2 [m ²]	Diferencia, Φ_{ij} [m]	Masa [Tn- s ² /m]	θ_j [°]	cos θ_i [rad]	$\Phi_i * m_i$ [Tn- s ² /m-m]	$\Phi_i^2 * m_i$ [Tn * m ²]	$\Phi_{ij}^{(1+\alpha)} \cos^{(1+\alpha)} \theta_i$
Base	0.0000	-	-	-	-	-	-	-	-
1	0.0280	0.0008	0.028	41.1	32.62	0.842	1.149	0.032	0.00362
2	0.0644	0.0041	0.036	41.0	29.25	0.873	2.638	0.170	0.00567
3	0.0932	0.0087	0.029	41.0	29.25	0.873	3.817	0.356	0.00398
4	0.1105	0.0122	0.017	9.2	29.25	0.873	1.021	0.113	0.00185
Total	0.296	0.026					8.625	0.671	0.0151

Tabla 17

Cálculos modales preliminares de la estructura de 6 pisos en sentido X, para el coeficiente de amortiguamiento.

Piso	Modo, Φ_i [m]	Φ_i^2 [m ²]	Diferencia, Φ_{ij} [m]	Masa [Tn- s ² /m]	θ_j [°]	cos θ_i [rad]	$\Phi_i * m_i$ [Tn- s ² /m-m]	$(\Phi_i^2) * m_i$ [Tn * m ²]	$(\Phi_{ij})^{(1+\alpha)} \cos^{(1+\alpha)} \theta_i$
Base	0.0000	-	-	-	-	-	-	-	-
1	0.0242	0.0006	0.024	42.0	32.62	0.842	1.018	0.025	0.00292
2	0.0596	0.0035	0.035	41.8	29.25	0.873	2.492	0.148	0.00541
3	0.0948	0.0090	0.035	41.8	29.25	0.873	3.969	0.376	0.00540
4	0.1246	0.0155	0.030	41.8	29.25	0.873	5.214	0.650	0.00418
5	0.1454	0.0211	0.021	41.8	29.25	0.873	6.085	0.885	0.00245
6	0.1576	0.0248	0.012	10.0	29.25	0.873	1.570	0.247	0.00109
Total	0.3032	0.0286					12.693	1.199	0.01791



El predimensionamiento proporciona una aproximación inicial del valor del coeficiente de amortiguamiento de los disipadores, que se ajusta iterativamente hasta alcanzar una deriva objetivo inferior a 0.69%, cumpliendo así con el nivel de daño moderado previamente establecido. En la estructura de 4 pisos, en ambos sentidos, se obtiene un coeficiente de amortiguamiento cercano al valor teórico, lo mismo para el sentido X de la estructura de 6 pisos. Sin embargo, en el sentido Y de esta última, el coeficiente de amortiguamiento supera el doble del valor teórico, debido a que los registros sísmicos Norte-Sur escalados amplifican la respuesta en esta estructura, independientemente del eje de aplicación. Dado que la estructura es simétrica y los registros sísmicos en dirección Este-Oeste muestran un comportamiento adecuado en ambas direcciones de aplicación, se realiza la discusión de resultados empleando estos registros aplicados en el sentido X. En la Tabla 18 se presentan los coeficientes de amortiguamiento teóricos y luego de la iteración para alcanzar la deriva objetivo.

Tabla 18

Coefficiente de amortiguamiento teórico y luego de iterar.

Sentido	Estructura 4 pisos		Estructura 6 pisos	
	X	Y	X	Y
$\sum C_i$ [T*s/m]	220.1	220.0	272.4	272.9
Disipadores por piso en cada sentido	4	4	4	4
Valor teórico, C_i [T*s/m]	55.0	55.0	68.1	68.2
Valor luego de iterar, C_i [T*s/m]	70.0	70.0	100.0	170.0

10.2. Análisis cronológico no lineal

En la Tabla 19, se muestra que la estructura alcanza la deriva objetivo en ambos sentidos, logrando así un nivel de daño moderado.



Tabla 19

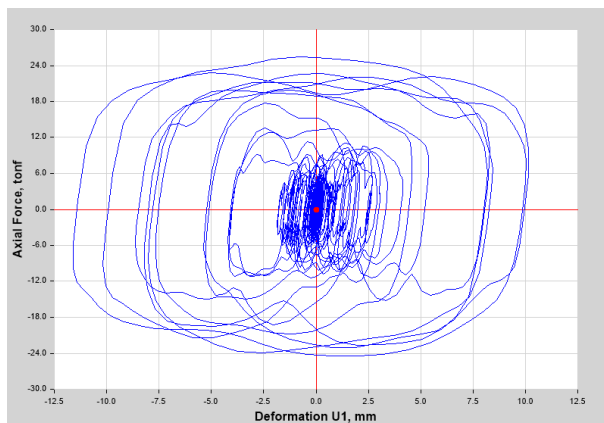
Análisis cronológico no lineal para las estructuras con disipadores.

Piso	Estructura 4 pisos		Estructura 6 pisos	
	Deriva X	Deriva Y	Deriva X	Deriva Y
6	-	-	0.21%	0.15%
5	-	-	0.37%	0.30%
4	0.26%	0.25%	0.55%	0.50%
3	0.49%	0.48%	0.66%	0.64%
2	0.67%	0.65%	0.67%	0.69%
1	0.48%	0.47%	0.40%	0.42%

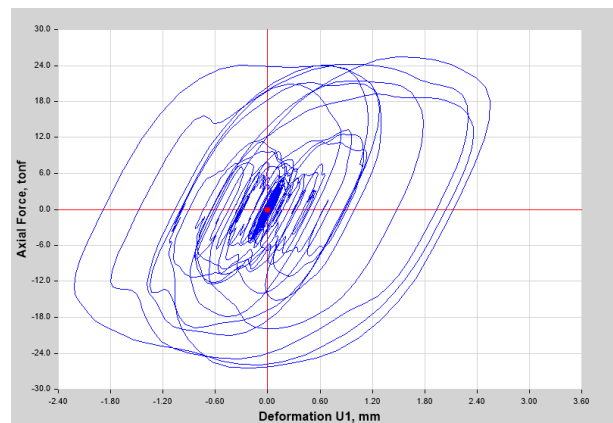
Las curvas de histéresis del disipador K13 (ubicado en el pórtico 6 del primer piso, entre ejes E y F), presentadas en la Ilustración 21, para el registro Japan IWTH04 EW, son un ejemplo representativo de la tendencia semi-elíptica y de los amplios lazos histeréticos, que indican un comportamiento fuera de fase y una significativa absorción de energía.

Ilustración 21

Curvas de histéresis disipador K13 - Registro Japan IWTH04 Este-Oeste 2011 - Sentido X.



a. Curva de histéresis disipador K13, estructura de 4 pisos.



b. Curva de histéresis disipador K13, estructura de 6 pisos.

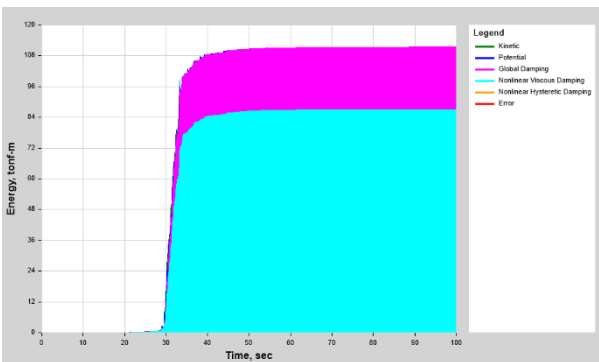


Este comportamiento fue verificado uno a uno en todos los disipadores de las estructuras, confirmando que cada uno actúa de manera óptima para reducir los efectos del sismo en la estructura.

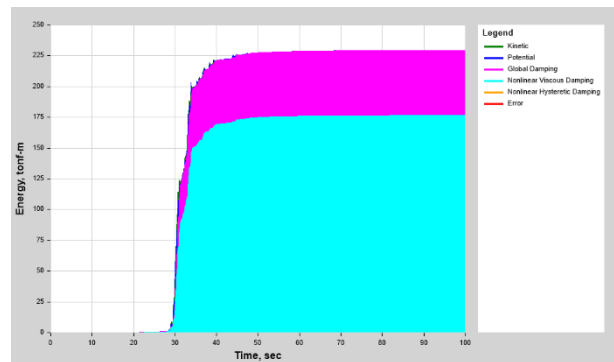
En el software ETABS se puede visualizar gráficamente el balance de la energía sísmica para cada registro. La Ilustración 22.a muestra, a manera de ejemplo, el balance energético del registro sísmico Japan IWTH04 Este-Oeste 2011 en el sentido X de la estructura de 4 pisos. Se observa que la energía disipada por la estructura a través de la ductilidad de los elementos estructurales como vigas y columnas es de 24.32 tonf (21.8%), mientras que los FVD disipan 87.03 tonf (78.2%), lo cual indica que la mayor parte de la energía sísmica se disipa a través de los disipadores de fluido viscoso. En el caso de la estructura de 6 pisos, se da un comportamiento similar (ver Ilustración 22.b).

Ilustración 22

Balance energético - Registro Japan IWTH04 Este-Oeste 2011 - Sentido X.



a. Balance energético, estructura de 4 pisos.



b. Balance energético, estructura de 6 pisos.



La elección de los FVD se realiza en función de la Tabla 12, asegurando que no se excedan los límites de fuerza y desplazamiento permitidos para cada disipador. Las fuerzas se calcularon a partir del análisis cronológico no lineal utilizando los registros escalados con el MCE. En las Tablas 20 y 21, se presentan las propiedades y características principales requeridas para solicitar estos disipadores a empresas comercializadoras, como Mageba.

Tabla 20

Características y propiedades de disipadores para la estructura de 4 pisos – Sentido X.

Piso	Disipador ETABS	C [tonf*s/m]	F _{MCE} [tonf]	α	Velocidad [cm/s]	D [mm]	Disposición	Referencia Disipador
1	K1	70	33.8	0.5	23.3	21.2	Diagonal	SA 500 s = 50mm
1	K5	70	33.7	0.5	23.2	21.2	Diagonal	SA 500 s = 50mm
1	K9	70	33.1	0.5	22.4	20.6	Diagonal	SA 500 s = 50mm
1	K13	70	33.2	0.5	22.5	20.6	Diagonal	SA 500 s = 50mm
2	K2	70	39.1	0.5	31.2	27.8	Diagonal	SA 500 s = 50mm
2	K6	70	39.0	0.5	31.1	27.8	Diagonal	SA 500 s = 50mm
2	K10	70	38.3	0.5	29.9	27.0	Diagonal	SA 500 s = 50mm
2	K15	70	38.3	0.5	30.0	27.0	Diagonal	SA 500 s = 50mm
3	K3	70	36.0	0.5	26.5	21.2	Diagonal	SA 500 s = 50mm
3	K7	70	36.0	0.5	26.4	21.3	Diagonal	SA 500 s = 50mm
3	K11	70	35.4	0.5	25.6	20.7	Diagonal	SA 500 s = 50mm
3	K16	70	35.5	0.5	25.7	20.7	Diagonal	SA 500 s = 50mm
4	K4	70	28.6	0.5	16.7	11.8	Diagonal	SA 500 s = 50mm
4	K8	70	28.8	0.5	16.9	12.0	Diagonal	SA 500 s = 50mm
4	K12	70	28.4	0.5	16.4	11.7	Diagonal	SA 500 s = 50mm
4	K17	70	28.2	0.5	16.2	11.5	Diagonal	SA 500 s = 50mm



Tabla 21

Características y propiedades de disipadores para la estructura de 6 pisos – Sentido X.

Piso	Disipador ETABS	C [tonf*s/m]	F _{MCE} [tonf]	α	Velocidad [cm/s]	D [mm]	Disposición	Referencia Disipador
1	K25	100	42.6	0.5	18.1	18.5	Diagonal	SA 500 s = 50mm
1	K26	100	42.5	0.5	18.0	18.5	Diagonal	SA 500 s = 50mm
1	K37	100	42.5	0.5	18.0	18.5	Diagonal	SA 500 s = 50mm
1	K38	100	42.6	0.5	18.1	18.5	Diagonal	SA 500 s = 50mm
2	K32	100	51.5	0.5	26.5	27.8	Diagonal	SA 750 s = 50mm
2	K27	100	51.5	0.5	26.5	27.9	Diagonal	SA 750 s = 50mm
2	K39	100	51.5	0.5	26.5	27.9	Diagonal	SA 750 s = 50mm
2	K44	100	51.5	0.5	26.5	27.8	Diagonal	SA 750 s = 50mm
3	K33	100	52.8	0.5	27.8	27.9	Diagonal	SA 750 s = 50mm
3	K28	100	52.7	0.5	27.7	27.9	Diagonal	SA 750 s = 50mm
3	K40	100	52.7	0.5	27.7	27.9	Diagonal	SA 750 s = 50mm
3	K45	100	52.8	0.5	27.8	27.9	Diagonal	SA 750 s = 50mm
4	K34	100	50.6	0.5	25.6	23.3	Diagonal	SA 500 s = 50mm
4	K29	100	50.5	0.5	25.5	23.3	Diagonal	SA 500 s = 50mm
4	K41	100	50.5	0.5	25.5	23.3	Diagonal	SA 500 s = 50mm
4	K46	100	50.6	0.5	25.6	23.3	Diagonal	SA 500 s = 50mm
5	K39	100	51.5	0.5	26.5	27.9	Diagonal	SA 750 s = 50mm
5	K30	100	45.0	0.5	20.3	16.6	Diagonal	SA 500 s = 50mm
5	K42	100	45.0	0.5	20.3	16.6	Diagonal	SA 500 s = 50mm
5	K47	100	45.0	0.5	20.3	16.5	Diagonal	SA 500 s = 50mm
6	K36	100	36.8	0.5	13.6	10.5	Diagonal	SA 500 s = 50mm
6	K31	100	37.1	0.5	13.8	10.7	Diagonal	SA 500 s = 50mm
6	K43	100	37.1	0.5	13.8	10.7	Diagonal	SA 500 s = 50mm
6	K48	100	36.8	0.5	13.6	10.5	Diagonal	SA 500 s = 50mm

11. Discusión de resultados

La incorporación de disipadores en las estructuras redujo significativamente la deriva en las estructuras de acero. En la estructura de 4 pisos, se obtuvo una disminución promedio del 52%, y en la estructura de 6 pisos, una reducción promedio del 50%, permitiendo así alcanzar la deriva objetivo para un nivel de daño moderado según la metodología Hazus. En la Tabla 22 se presentan



los resultados detallados de las derivas, y la Ilustración 23 muestra una gráfica comparativa de estos valores.

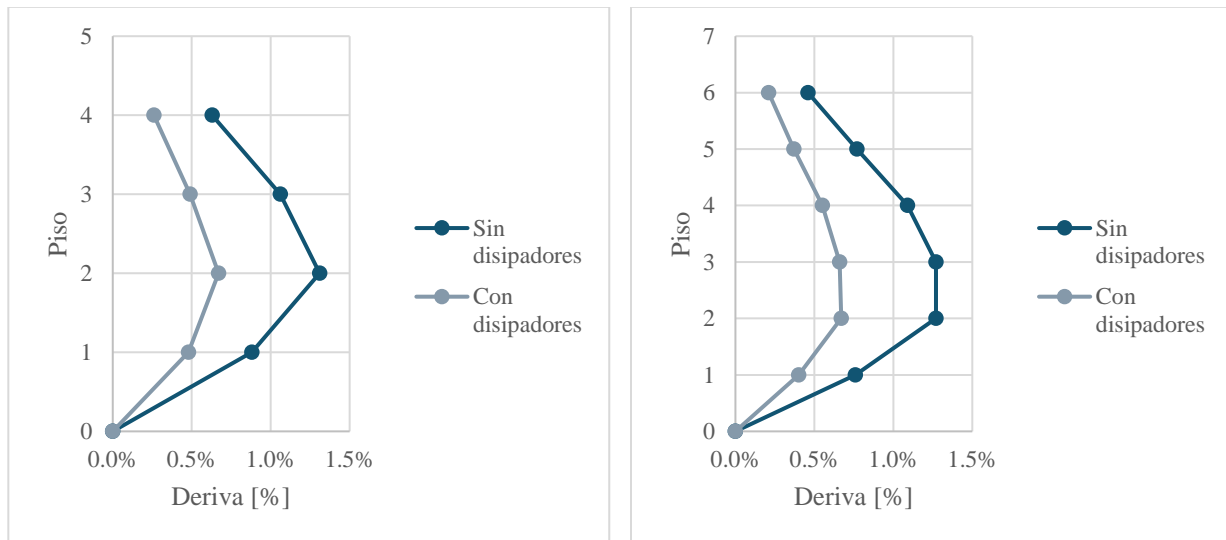
Tabla 22

Comparativa derivas con y sin disipadores.

Piso	4 pisos - Sentido X			6 pisos - Sentido X		
	Sin dis.	Con dis.	Reducción	Sin dis.	Con dis.	Reducción
6	-	-	-	0.46%	0.21%	54%
5	-	-	-	0.77%	0.37%	52%
4	0.63%	0.26%	59%	1.09%	0.55%	50%
3	1.06%	0.49%	54%	1.27%	0.66%	48%
2	1.31%	0.67%	49%	1.27%	0.67%	47%
1	0.88%	0.48%	45%	0.76%	0.40%	47%
Promedio			52%			50%

Ilustración 23

Gráfica comparativa derivas con y sin disipadores.



a. Comparativa derivas estructura 4 pisos – Sentido X.

b. Comparativa derivas estructura 6 pisos – Sentido X.



La energía sísmica en las estructuras con disipadores se distribuye entre los elementos estructurales, como vigas y columnas, y los disipadores mismos. Estos últimos absorben en promedio el 79% y el 78% de la energía de entrada en las estructuras de 4 y 6, respectivamente, lo que reduce los esfuerzos y minimiza el daño en los elementos estructurales. Las Tablas 23 y 24 muestran la distribución de energía para cada registro sísmico, mientras que las Tablas 25 y 26 muestran la representación gráfica de esta distribución en las estructuras con disipadores.

Tabla 23

Balance energético estructura de 4 pisos - Sentido X.

Registro sísmico	Energía de entrada del sismo [tonf-m]	Energía disipada por la estructura [tonf-m]	Porcentaje	Energía disipada por dispositivos [tonf-m]	Porcentaje
Duzce Turkey EW 1999	134.5	28.1	21%	106.3	79%
Japan IWTH04 EW 2011	111.5	24.3	22%	87.1	78%
Japan KSRH05 EW 2013	118.2	25.6	22%	92.7	78%
Japan KSRH10 EW 2003	167.0	34.6	21%	132.4	79%
Parkfield California EW 2004	72.1	16.6	23%	55.5	77%
Taiki Japan EW 2003	302.2	60.3	20%	241.8	80%
Totorri Japan EW 2000	123.8	26.8	22%	96.9	78%
Promedio			21%		79%

Tabla 24

Balance energético estructura de 6 pisos - Sentido X.

Registro sísmico	Energía de entrada del sismo [tonf-m]	Energía disipada por la estructura [tonf-m]	Porcentaje	Energía disipada por dispositivos [tonf-m]	Porcentaje
Duzce Turkey EW 1999	253.5	55.1	22%	198.2	78%
Japan IWTH04 EW 2011	229.3	52.9	23%	176.5	77%
Japan KSRH05 EW 2013	217.5	48.2	22%	169.3	78%
Japan KSRH10 EW 2003	416.7	90.2	22%	326.3	78%
Parkfield California EW 2004	167.2	38.9	23%	128.3	77%
Taiki Japan EW 2003	612.7	127.6	21%	485.1	79%
Totorri Japan EW 2000	254.0	54.8	22%	199.2	78%
Promedio			22%		78%



Tabla 25

Disipación de energía por la estructura y dispositivos - Estructura 4 pisos - Sentido X.

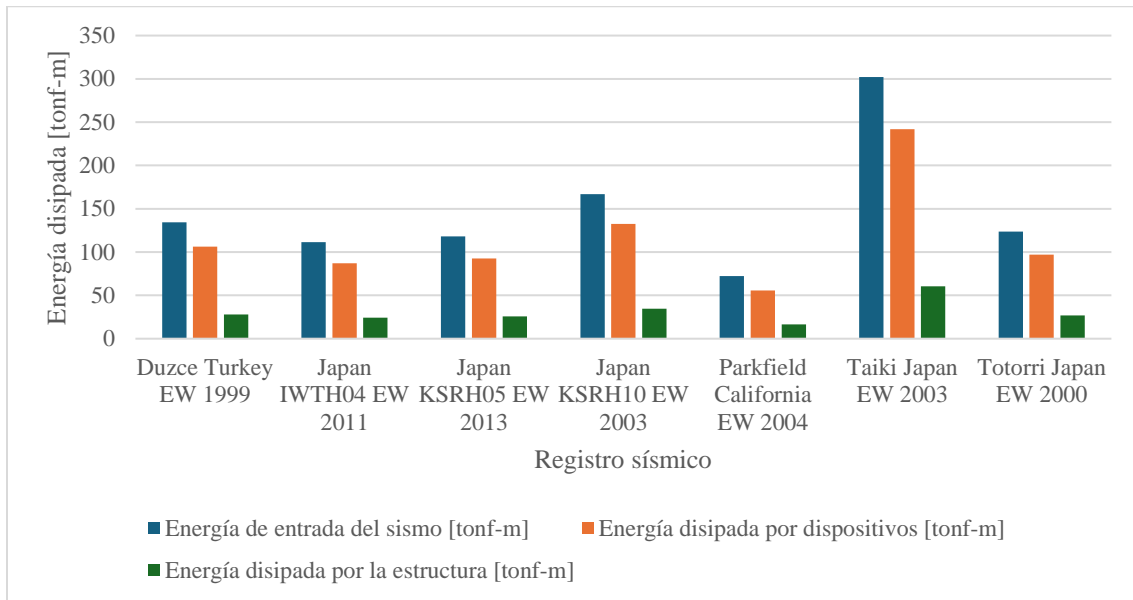
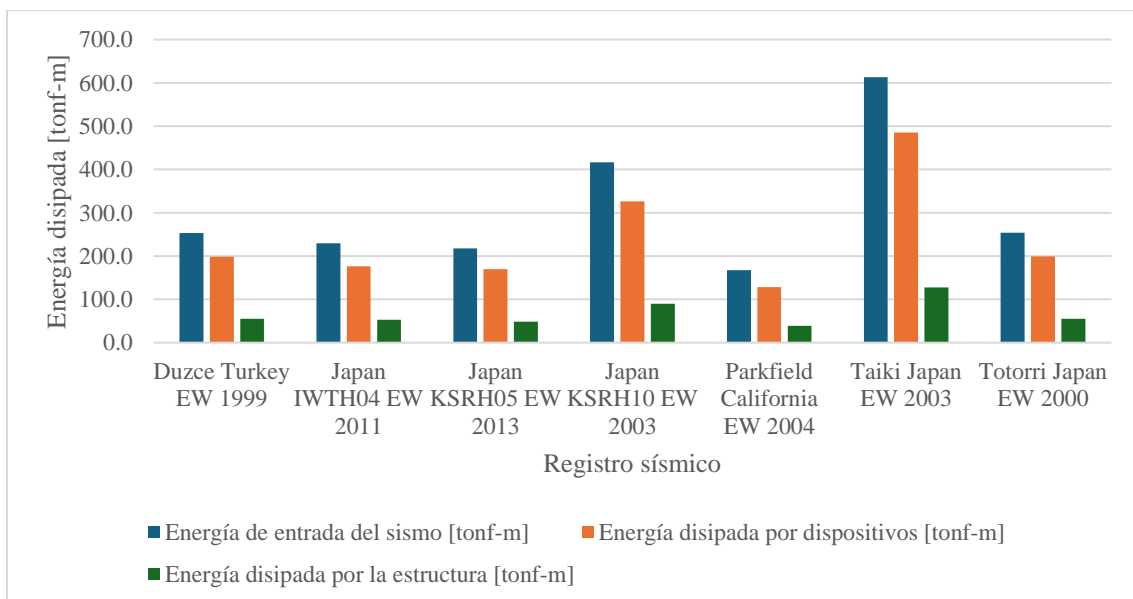


Tabla 26

Disipación de energía por la estructura y dispositivos - Estructura 6 pisos - Sentido X.





La reducción de los esfuerzos en la estructura con disipadores es considerable. Como ejemplo, se toma la columna 28 para verificar esta disminución.

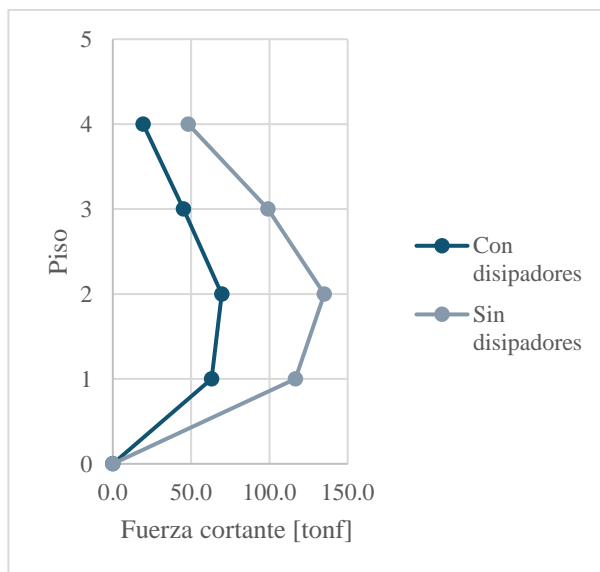
Tabla 27

Comparativa fuerza cortante de la columna 28 con y sin disipadores – Sentido X.

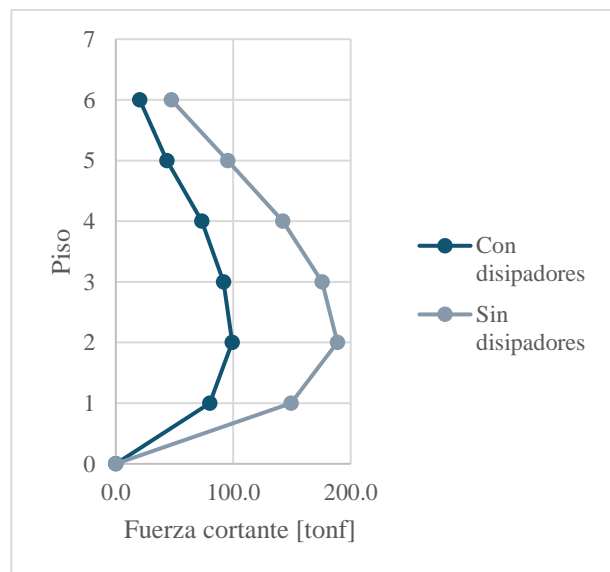
Piso	4 pisos - Sentido X			6 pisos - Sentido X		
	F. sin dis. [tonf]	F. con dis. [tonf]	Reducción	F. sin dis. [tonf]	F. con dis. [tonf]	Reducción
6	-	-	-	47.4	20.3	57%
5	-	-	-	95.2	43.6	54%
4	48.2	19.3	60%	142.1	73.3	48%
3	99.0	45.1	54%	175.5	91.6	48%
2	135.1	69.6	48%	188.7	99.1	47%
1	116.6	63.1	46%	149.3	80.0	46%
Promedio			52%			50%

Ilustración 24

Comparativa gráfica fuerza cortante en la columna 28 con y sin disipadores.



a. Fuerza cortante representada gráficamente para la estructura de 4 pisos.



b. Fuerza cortante representada gráficamente para la estructura de 6 pisos.



En promedio, la fuerza cortante se reduce en un 52% y 50% en las estructuras de 4 y 6 pisos, respectivamente. La Tabla 27 muestra esta disminución, y la Ilustración 24 proporciona la representación gráfica de la fuerza en la columna.

12. Conclusiones y recomendaciones.

- a. La incorporación de disipadores de fluido viscoso en las estructuras de acero propuestas logró una reducción en la deriva, con una disminución promedio del 52% y 50% para las estructuras de 4 y 6 pisos, respectivamente. Asimismo, se observa una reducción significativa en los esfuerzos de las columnas, por ejemplo, en una de ellas, alcanzando un 52% en la estructura de 4 pisos y un 50% en la de 6 pisos.
- b. La energía sísmica absorbida por los disipadores de fluido viscoso, según la distribución propuesta de las estructuras, alcanza un promedio del 79% para la estructura de 4 pisos y del 78% para la de 6 pisos, lo cual disminuye la disipación de energía a través del daño de los elementos estructurales como vigas y columnas (ductilidad).
- c. El acceso a empresas que distribuyen disipadores de fluido viscoso en Colombia es limitado, especialmente para quienes no tienen conexiones con grandes compañías de disipación a nivel global.
- d. Lograr un nivel de daño moderado en las estructuras de acero analizadas, según la distribución propuesta de los pórticos PRM y PG, presenta ciertos desafíos, especialmente en la estructura de 6 pisos, debido a la limitada disponibilidad de perfiles W en el mercado colombiano. En cambio, para la estructura de 4 pisos, los perfiles requeridos para esta configuración están disponibles en el catálogo de empresas como CYRGO.



- e. Se recomienda realizar el proceso de corrección de línea base y filtrado Butterworth mediante códigos en Matlab o con la versión premium de SeismoSignal para verificar los resultados obtenidos previamente en el software PRISM, especialmente en los registros Norte-Sur, que muestran una amplificación en la respuesta de la estructura de 6 pisos. Además, este procedimiento permite verificar si las gráficas de aceleración, velocidad y desplazamiento escaladas presentan desviaciones, con el objetivo de aumentar el número de pares de registros sísmicos de 7 a 11, según lo establecido en la ASCE 7-22.
- f. Es recomendable realizar un análisis dinámico modal cronológico con disipadores, incluyendo la generación de rótulas plásticas, siguiendo un enfoque similar al utilizado por Gómez (2020), pero aplicado a estructuras de acero. Esto se debe a que la relación entre deriva-daño propuesta por la metodología HAZUS es muy general, ya que no considera propiedades y condiciones estructurales específicas de cada edificio.



13. Líneas futuras de investigación

- a. Profundizar en el procesado de los pares de registros provenientes de la zonificación sísmica de Popayán, analizando las posibles causas de los desfases en las gráficas de velocidad y desplazamiento respecto al eje de las abscisas.
- b. Realizar el análisis y diseño de las conexiones de la estructura metálica, sobre todo en los PRM, dónde se tienen mayores solicitaciones de carga.
- c. Implementar un análisis de costos, comparando las estructuras de acero sin y con la implementación de los FVD.
- d. Analizar el daño en los elementos estructurales empleando un análisis no lineal estático o pushover, evaluando el nivel de daño en las edificaciones sin disipadores y compararlas con las edificaciones equipadas con estos dispositivos.



14. Referencias Bibliográficas

- AIS. (2010). *Norma Sismorresistente*. Bogotá: Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica.
- American Society Of Civil Engineers. (2022). *Minimum Design Loads And Associated Criteria for Buildings And Other Structures*. United States Of America.
- Chaparro, A. R. (2017). *Selección Y Procesamiento De Acelerogramas Para El Análisis Dinámico De La Presa Teatinos*. Tunja: Universidad Pedagógica Y Tecnológica De Colombia.
- Federal Emergency Management Agency. (1997). *NEHRP Commentary On The Guidelines For The Seismic Rehabilitation of Buildings*. Washington, D.C.
- Federal Emergency Management Agency. (2002). *Hazus - MH 2.1*. Washington, D.C.: Mitigation Division.
- Gómez, D. C. (2020). *Evaluación Del Coeficiente De Disipación De Energía R En Edificaciones De Concreto Reforzado Con Disipadores De Energía Viscosos Ubicados En Zona De Amenaza Sísmica Alta*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- Guerrero, E. F., & Edson, R. R. (2019). *Análisis Estructural De Un Edificio Educativo De Seis Pisos Con Sistemas De Disipación De Energía De Amortiguadores De Fluido Viscoso En Una Zona De Amenaza Sísmica Alta*. Bucaramanga: Universidad De Santander.
- Krawinkler, H., & Nassar, A. A. (1992). *Seismic Desing Based On Ductility And Cumulative Damage Demands And Capacities. Nonlinear Seismic Analysis And Design Of Reinforced Concrete Buildings*. Taylor & Francis.
- Lamprea, A. C., & Garzón, L. F. (2017). *Nonlinear Viscous Fluid Damping Devices In The Seismic Design of Buildings*. Milán: Politecnico Di Milano.



- López, D., & Pinzón, D. (2021). *Respuesta Sísmica De Una Estructura De Acero Implementando Disipadores De Energía De Fluido Viscoso Para La Ciudad De Bogotá D.C.* Bogotá D.C.: Universidad Distrital Francisco José De Caldas.
- Mageba. (2024). *Protección Antisísmica Mageba - Preservación Fiable De Estructuras. Amortiguador RESTON SA.* LATAM.
- Ordoñez, A. F., Parra, W. A., & Silva, A. L. (January de 2023). Comparison Between A Traditional Colombian Structural Design And The Use Of Viscous-Type Energy Damping Systems (2021). *Ingeniería E Investigación Vol. 43 N.1.*
- Ramon, B. M., & Villegas, C. A. (2023). *Estudio Comparativo Del Diseño Estructural Utilizando Perfiles Y Vigas De Acero E Incorporando Disipadores De Energía, Centro Comeciarl, Lima 2023.* Lima: Universidad César Vallejo.
- Servicio Geológico Colombiano. (2020). *Zonificación De Respuesta Sísmica De Popayán (Versión de Discusión).* Bogotá.
- Taylor. (2024). *Damper Design Manual.* Nueva York: Taylor Devices Inc.



15. Glosario

Fluid Viscous Damper (FVD) ó Disipador de energía sísmica de fluido viscoso: Los disipadores de fluido viscosos son usados para disipar una gran parte de la energía sísmica impuesta a una estructura por un sismo, protegiendo así los elementos estructurales principales. Estos otorgan amortiguamiento adicional al sistema estructural.

DBE: Sismo básico de diseño, con un 10% de probabilidad de ocurrencia en un periodo de 50 años.

MCE: Sismo máximo de diseño, con un 2% de probabilidad de ocurrencia en un periodo de 50 años.

PRM: Los pórticos resistentes a momento, son sistemas estructurales diseñados para resistir cargas laterales sísmicas, mediante la rigidez de sus conexiones entre vigas y columnas.

PG: Los pórticos gravitacionales, son estructuras diseñadas principalmente para soportar cargas verticales, como el peso propio y las cargas sobrepuestas de la edificación.