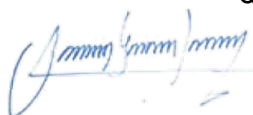


Formulación del coeficiente de capacidad de disipación de energía (R) para edificaciones con sistemas pasivos de disipación de energía.

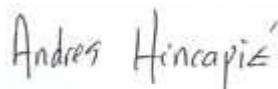
ING. CAMILO JOSE FIERRO COGOLLO

Nota de Aceptación

Certificamos que el presente Trabajo de Grado Satisface, en alcances y calidad, todos los requisitos Que demanda un Trabajo de Grado de Maestría.



ING. ORLANDO CUNDUMI SÁNCHEZ
Director

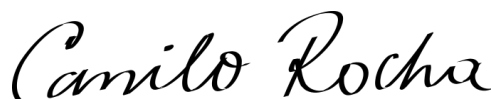


ING. ANDRÉS FELIPE HINCAPIÉ MURGUEITIO
Jurado

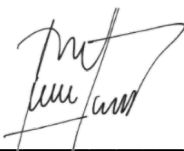


ING JUAN CARLOS HERRERA SÁNCHEZ
Jurado

Aprobado en cumplimiento de los requisitos exigidos por la Pontificia Universidad Javeriana Cali, para optar el título de Magister en Ingeniería Civil.



HERNÁN CAMILO ROCHA NIÑO Ph. D.
Decano Facultad de Ingeniería y Ciencias



JUAN CARLOS MARTÍNEZ ARIAS
Director Posgrados de Ingeniería y Ciencias

Santiago de Cali 24 de agosto del 2021

**Maestría en Ingeniería
Facultad de Ingeniería y Ciencias**



Acta de Correcciones al Documento de Trabajo de Grado

Santiago de Cali, 24 de agosto del 2021

Autor: CAMILO JOSE FIERRO COGOLLO

Título del Trabajo de Grado: “Formulación del coeficiente de capacidad de disipación de energía (R) para edificaciones con sistemas pasivos de disipación de energía”

Director:

Como indica el artículo 2.13 de las Directrices para Trabajo de Grado de Maestría, he verificado que el estudiante indicado arriba ha implementado todas las correcciones que los Jurados del Proyecto de Trabajo de Grado definieron que se efectuaran, como consta en el Acta de Evaluación correspondiente.

Orlando Cundumi Sánchez

Firma del Director del Trabajo de Grado

Santiago de Cali, 25 de junio del 2021

Ingeniero:

Juan Carlos Martínez Arias

Director Posgrados de Ingeniería

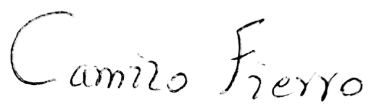
Facultad de Ingeniería

Pontificia Universidad Javeriana Cali

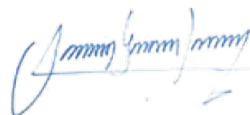
Cumplido los requisitos establecidos en los artículos 5.6 y 5.7 de las Directrices para Trabajo de Grado de Maestría, solicitamos se autorice la sustentación del Trabajo de Grado denominado **“Formulación del coeficiente de capacidad de disipación de energía (R) para edificaciones con sistemas pasivos de disipación de energía”**, realizado por el estudiante **Camilo Jose Fierro Cogollo** con código **0220352** perteneciente al énfasis en Ingeniería Sísmica y Rehabilitación de Estructuras. Bajo la dirección del **profesor Orlando Cundumi Sánchez**.

El suscrito director del Trabajo de Grado autoriza para que se proceda a hacer su sustentación ante el Tribunal que para el efecto se designe, toda vez que ha revisado meticulosamente el documento y avala que el Trabajo de Grado ya se encuentra listo para ser evaluado oficialmente.

Atentamente,



Camilo Jose Fierro Cogollo
C.C. 1143873200 de Cali
Documentación anexa:



Orlando Cundumi Sánchez
C.C. 16275200 de Palmira

Dos copias anilladas del documento de Trabajo de Grado, con impresión por lado y lado y paginación completa.

El resumen del Trabajo de Grado en formato electrónico (máximo 1 página).

DATOS DEL ESTUDIANTE TRABAJO DE
GRADO DE MAESTRÍA

TÍTULO: “Formulación del coeficiente de capacidad de disipación de energía (R) para edificaciones con sistemas pasivos de disipación de energía.”

1. ÉNFASIS: Ingeniería Sísmica y Rehabilitación de Estructuras.
2. ESTUDIANTE: Camilo Jose Fierro Cogollo.
3. DIRECCIÓN: Vereda las palmas casa 110.
4. TELÉFONO: N/A.
5. CELULAR: (+57) 3122296200.
6. CORREO ELECTRÓNICO: camo_2908@hotmail.com.
7. PROFESIÓN: Ingeniera Civil.
8. UNIVERSIDAD: Pontificia Universidad Javeriana Cali.
9. EMPRESA: PAL Ingeniería.
10. CARGO: Ingeniero Civil

FICHA RESUMEN

ANTEPROYECTO DE TRABAJO DE GRADO DE MAESTRÍA

TÍTULO: “Formulación del coeficiente de capacidad de disipación de energía (R) para edificaciones con sistemas pasivos de disipación de energía.”

1. ÉNFASIS: Ingeniería Sísmica y Rehabilitación de Estructuras
2. ÁREA DE INVESTIGACIÓN: Estructuras.
3. ESTUDIANTE: Camilo Jose Fierro Cogollo.
4. CORREO ELECTRÓNICO: camo_2908@hotmail.com .
5. DIRECTOR: Orlando Cundumi Sánchez.
6. CORREO ELECTRÓNICO: orlando.cundumi@javerianacali.edu.co
7. CO-DIRECTOR(ES): N/A
8. PALABRAS CLAVE: Amortiguador viscoso, Coeficiente de disipación de energía, estructura,
9. CÓDIGOS UNESCO CIENCIA Y TECNOLOGÍA: 3305.06
10. FECHA DE INICIO: 13 de 11 de 2019 DURACIÓN ESTIMADA: 6 Meses
11. RESUMEN.

TRABAJO DE GRADO

**FORMULACIÓN DEL COEFICIENTE DE CAPACIDAD DE DISIPACIÓN DE
ENERGÍA (R) PARA EDIFICACIONES CON SISTEMAS PASIVOS DE
DISIPACIÓN DE ENERGÍA.**

PRESENTADO POR:

CAMILO JOSE FIERRO COGOLLO

DIRECTOR:

ORLANDO CUNDUMÍ SÁNCHEZ



PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA CALI

FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS

SANTIAGO DE CALI

2021

TABLA DE CONTENIDO

Resumen	12
Abstract.....	13
1. INTRODUCCIÓN.....	14
2. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	15
2.1. Planteamiento del problema.....	15
2.2. Hipótesis de investigación	16
3. OBJETIVOS.....	17
3.1. Objetivo general.....	17
3.2. Objetivos específicos	17
4. JUSTIFICACIÓN Y ALCANCE	18
4.1. Justificación	18
4.2. Alcance	19
4.3. Resultados esperados	19
5. CONCEPTO TEÓRICO.....	20
5.1. Análisis de estructuras	20
5.1.1. Análisis estático.....	20
5.1.2. Análisis dinámico	21
5.1.3. Análisis lineal	22
5.1.4. Análisis no lineal	22
5.1.5. Análisis estático lineal	22
5.1.6. Análisis dinámico lineal	23
5.1.7. Análisis estático no lineal.....	24
5.1.8. Análisis dinámico No lineal	24
6. ESTADO DEL ARTE	26
6.1. Sistemas de control estructural	26
6.2. Sistemas de protección sísmica.....	26
6.2.1. Sistemas semi-activos.....	26
6.2.2. Sistemas de control híbrido	28
6.2.3. Sistema de control activo.....	28
6.2.4. Sistemas de control pasivo	28
6.3. Control pasivo con disipadores de energía	29

6.4.	Disipadores de fluido viscoso.....	29
7.	METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN.....	31
7.1.	Descripción general.....	31
7.2.	Análisis y diseño de las estructuras a utilizar.....	32
7.2.1.	Definición del espectro de diseño.....	32
7.2.2.	Parámetros del espectro inelástico de diseño.....	34
7.2.3.	Avaluó de cargas.....	34
7.3.	Análisis no lineal de las estructuras.....	35
7.3.1.	Requerimientos de diseño sísmico para estructuras con disipadores.....	39
7.3.2.	Selección de acelerogramas.....	40
7.4.	Definición del sistema de disipación.....	41
7.5.	Cálculo del coeficiente de disipación de energía.....	47
8.	DESARROLLO DE LA METODOLOGIA.....	51
8.1.	Descripción de las estructuras y consideraciones generales.....	51
8.2.	Análisis y diseño del modelo del edificio 1- E1.....	57
8.2.1.	Chequeo de irregularidades.....	60
8.2.2.	Verificación de derivas.....	65
8.3.	Cálculo del coeficiente de disipación de energía para estructura sin disipadores.....	66
8.4.	Selección de acelerogramas.....	73
8.5.	Definición del sistema de disipación.....	77
8.6.	Cálculo del coeficiente de disipación de energía para estructura con disipadores.....	90
9.	RESULTADOS ESPERADOS.....	94
10.	IDENTIFICACIÓN DEL DIRECTOR DEL TRABAJO DE GRADO.....	101
11.	DESCRIPCIÓN DE RECURSOS.....	101
12.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	102

Lista de tablas

Tabla 1 Valores propuestos para el Rr según el ATC-19.....	49
Tabla 2 Valores de R para estructuras de concreto reforzado según la investigación del ing. Abdi. (Gómez, 2020).....	50
Tabla 3 Secciones de los elementos-Diseño convencional.	55
Tabla 4 Avalúo de cargas	55
Tabla 5 Datos de espectro de diseño	56
Tabla 6 Chequeo de irregularidades en planta.....	60
Tabla 7 Resumen de irregularidades en planta.....	61
Tabla 8 Chequeo de irregularidades en altura.	62
Tabla 9 Resumen de irregularidad en altura.	63
Tabla 10 Cortantes basales.	64
Tabla 11 Ajuste de cortante basal.....	64
Tabla 12 Tabal de derivas E1.	65
Tabla 13 Calculo de amortiguamiento viscoso equivalente Sentido X.....	68
Tabla 14 Calculo de amortiguamiento viscoso equivalente Sentido Y.....	69
Tabla 15 Calculo de R- Sentido X.....	72
Tabla 16 Calculo de R-Sentido Y.....	72
Tabla 17 Acelerogramas.....	73
Tabla 18 Parámetros de la riostra H300B.....	77
Tabla 19 Calculo de C según Taylor-sentido X.	77
Tabla 20 Calculo de Fuerza máxima del disipador- Sentido X.....	78
Tabla 21 Parámetros del disipador por piso- Sentido X.....	78
Tabla 22 Calculo de C según Taylor-sentido Y.	78
Tabla 23 Calculo de Fuerza máxima del disipador- Sentido Y.....	79
Tabla 24 Parámetros del disipador por piso- Sentido Y.....	79
Tabla 25 Secciones modelo reducido.	85
Tabla 26 Derivas por acelerogramas.	86
Tabla 27 Disipadores sentido X	87
Tabla 28 Disipadores sentido Y.	87
Tabla 29 Calculo de R- Sentido X.....	92
Tabla 30 Calculo de R- Sentido Y.....	93
Tabla 31 Resultados para estructuras sin disipadores.	94
Tabla 32 Resultados para estructuras con disipadores.	94
Tabla 33 Porcentaje de incremento del R para estructuras con disipadores.....	95
Tabla 34 Recursos a utilizar.	101

Lista de ilustraciones

Ilustración 1 Espectro elástico de aceleraciones de diseño como fracción de g	24
Ilustración 2: Zona de amenaza sísmica aplicable para edificios para NSR-10 en función de A_a y A_v	25
Ilustración 3 Valor de A_a y A_v para las capitales de departamento-Tomado de NSR-10. ..	33
Ilustración 4 Valores de F_a -Tomado de NSR-10.	33
Ilustración 5 Valores F_v -Tomado de NSR-10.....	33
Ilustración 6 Valores del coeficiente de importancia-Tomado de NSR-10.....	33
Ilustración 7 Espectro elástico de diseño-Tomado de NSR-10.	34
Ilustración 8 Tabla para definir el factor K -Tomado de ATC-40.....	37
Ilustración 9 Reducción del espectro de demanda según ATC-40.....	38
Ilustración 10 Espectros de demanda y espectro de capacidad.	38
Ilustración 11 Definición de Link como disipador de fluido viscoso-damper expomential	43
Ilustración 12 Variables a definir para el link como disipador -Fuente propia.....	44
Ilustración 13 Grafica curva de histéresis idealizada. -Tomado de Taylor.....	45
Ilustración 14 Curva de histéresis- Fuente propia.	45
Ilustración 15 Grafica para un disipador-Fuente propia.....	46
Ilustración 16: Tabla de sistema estructural pórtico resistente a momento y su respectivo R_0	47
Ilustración 17 Modelo E1 y E3.....	52
Ilustración 18 Modelo E4 y E6.....	53
Ilustración 19 Modelo E8 y E9.....	54
Ilustración 20 Espectros de diseño según NSR-10.....	56
Ilustración 21 Modelo 3D.....	57
Ilustración 22 Planta estructural.	58
Ilustración 23. Sección típica por los ejes número.	59
Ilustración 24 Sección típica por los ejes letra.	59
Ilustración 25 Deriva en X.....	65
Ilustración 26 Deriva en Y.....	66
Ilustración 27 Parámetros de definición de articulaciones para columnas.	67
Ilustración 28 Parámetros de definición de las articulaciones para vigas.	67
Ilustración 29 Espectro de capacidad Sentido X.	68
Ilustración 30 Cortante V_s Desplazamiento-Sentido Y.....	69
Ilustración 31 Espectro de capacidad y demanda-Sentido X.	70
Ilustración 32 Espectro de capacidad y demanda-Sentido Y.	70
Ilustración 33 Cortante V_s Desplazamiento-Sentido X.....	71
Ilustración 34 Cortante V_s Desplazamiento-Sentido Y.....	71
Ilustración 35 Espectro MCE_R	73
Ilustración 36 Acelerogramas Matcheados-Sentido EW.....	74
Ilustración 37 Acelerogramas Matcheados-Sentido NS.....	74
Ilustración 38 Acelerogramas Matcheados EW.	75
Ilustración 39 Acelerogramas Matcheados NS.	76

Ilustración 40	Parámetros de disipadores sentido X piso 1-5.....	80
Ilustración 41	Parámetros de disipadores sentido X Piso 6-8.	80
Ilustración 42	Parámetros de disipadores sentido Y piso 1-5.....	81
Ilustración 43	Parámetros de disipadores sentido Y Piso 6-8.	81
Ilustración 44	Modelo 3D con disipadores.....	82
Ilustración 45	Disipadores sentido X.....	83
Ilustración 46	Disipadores sentido Y.....	84
Ilustración 47	Deriva X	85
Ilustración 48	Deriva Y	86
Ilustración 49	Curva histeretica sentido X.	88
Ilustración 50	Curva histeretica sentido Y.	89
Ilustración 51	Espectro de capacidad y demanda-Sentido X.	90
Ilustración 52	Espectro de capacidad y demanda-Sentido Y.	91
Ilustración 53	Cortante Vs Desplazamiento-Sentido X.....	91
Ilustración 54	Cortante Vs Desplazamiento-Sentido Y.....	92
Ilustración 55	Modelo 3 - 3D de la estructura.	95
Ilustración 56	Modelo 4 - 3D de la estructura.	96
Ilustración 57	Modelo 6 - 3D de la estructura.	96
Ilustración 58	Modelo 8 - 3D de la estructura.	97
Ilustración 59	Modelo 9 - 3D de la estructura.	97
Ilustración 60	Curva de histéresis.....	98
Ilustración 61	Curvas de histéresis.	99

Agradecimientos

A Dios y la virgen por todas las bendiciones recibidas en mi vida.

A mis padres por su apoyo incondicional durante todos los momentos en mi vida y a Asteria Guzmán, por ser la luz y guía que me ayudo a centrar mis esfuerzos.

Resumen

En esta tesis se busca definir un valor aproximado para el coeficiente de disipación de energía de un sistema estructural de pórticos de concreto reforzado, al implementar un sistema de control (disipadores de fluido viscosos), los cuales deben mejorar el desempeño de la estructura ante fuerzas sísmicas. Para lograr obtenerlo se calcula con la ayuda de un análisis no lineal el coeficiente de disipación de energía (R) para seis (6) estructuras con y sin disipadores de fluido viscosos ubicados en zona sísmica alta, con grado de importancia I=III de acuerdo al Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente (NSR-10), , teniendo estos resultados se puede comparar la variación del coeficiente de disipación de energía y se define un coeficiente R para el sistema estructural de pórticos de concreto reforzado resistente a momentos (DES) con disipadores de fluido viscoso.

Abstract

This thesis seeks to define an approximate value for the energy dissipation coefficient of a structural system of reinforced concrete frames, by implementing a control system (viscous fluid dissipators), which should improve the performance of the structure against forces seismic. To achieve this, the energy dissipation coefficient (R) for six (6) structures with and without viscous fluid dissipators located in a high seismic zone is calculated with the help of a non-linear analysis, with a degree of importance $I = III$ according to the Colombian Regulation for Earthquake Resistant Construction (NSR-10), having these results, the variation of the energy dissipation coefficient can be compared and a coefficient R is defined for the structural system of reinforced concrete frames resistant to moments (DES) with viscous fluid dissipators.

1. INTRODUCCIÓN

Existe una idea general de que el área de la ingeniería civil no ha cambiado considerablemente en cuanto a sistemas constructivos, recomendaciones estructurales y métodos constructivos; la realidad es que la ingeniería civil incluyendo el diseño estructural, está evolucionando en aspectos importantes en Colombia. Esto se evidencia por cuanto, constantemente se trabaja en la reglamentación de sistemas y procedimientos que permitan la optimización de recursos, mejorar tiempos de ejecución y principalmente obtener como resultado estructuras que logren salvaguardar las vidas de las personas.

La necesidad de mejorar el comportamiento de las estructuras ante las fuerzas sísmicas, ha llevado al desarrollo e implementación de sistemas de control que bien pueden ser pasivos, activos, híbridos y semi-activos. La finalidad de estos sistemas es mejorar el desempeño sísmico de las edificaciones, lo cual facilita el control de desplazamientos, disminuye las derivas, pueden generar reducción de las secciones de los elementos estructurales y evitan posibles daños estructurales que podrían implicar costos por reparación es las estructuras.

A pesar de las ventajas que tienen los sistemas de control como es el caso de los disipadores de energía, la implementación de estos no es acogida en todo tipo de estructuras debido los costos que conlleva el uso de dichos sistemas.

Teniendo cuenta lo anterior, en este trabajo se busca poder dimensionar cuál sería el efecto de los disipadores de energía, más concretamente el de los disipadores de fluido viscosos sobre la capacidad de disipación de energía de las estructuras en las que son implementados; esto se ve reflejado en el coeficiente (R) a la hora de hacer un diseño estructural.

2. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

2.1. Planteamiento del problema

El comportamiento de una estructura ante las fuerzas sísmicas para los métodos de diseño utilizados, depende del sistema estructural definido por el diseñador estructural en conjunto con requerimientos arquitectónicos además de los requerimientos y conocimientos constructivos; también influyen las características geométricas que pueden generar irregularidades en la edificación.

Dicho desempeño ante las cargas sísmicas se ve reflejado en el Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente (NSR-10), como un coeficiente de capacidad de disipación de energía, simbolizado con la letra (R) y cumple una función vital en el diseño estructural cuando se tienen en cuenta las cargas sísmicas, ya que es este valor el que disminuye las cargas sísmicas de diseño, por lo cual a mayor coeficiente de capacidad de disipación de energía, menor será la fuerza sísmica que recibirá la estructura y por ende las cargas de diseño de los elementos serán menores.

Al momento de implementar sistemas pasivos de disipación de energía, como es el caso de los disipadores de fluido viscosos que aumentan el amortiguamiento natural de la estructura, ayudando a disminuir los desplazamientos totales y permiten realizar un diseño de la estructura con secciones de menores dimensiones, surge una pregunta principal a tratar:

¿Cómo se ve afectado el coeficiente de disipación de energía (R) con el que se diseñan las estructuras en pórticos de concreto reforzado cuando se utilizan sistemas pasivos de disipación de energía?

El poder definir un coeficiente de capacidad de disipación de energía para estructuras con sistemas pasivos de control, debería permitir una modelación y un diseño estructural más acertado y en teoría llevaría a optimizar el diseño final de una estructura.

2.2. Hipótesis de investigación

Implementar disipadores de fluido viscoso permite aumentar considerablemente el amortiguamiento de la estructura, reduciendo las fuerzas sísmicas actuantes, reduciendo los desplazamientos y permitiendo reducir las secciones de los elementos estructurales mientras se encuentren dentro de los rangos permitidos por los reglamentos de diseño. Esto se puede reflejar en el coeficiente de disipación de energía de las estructuras con disipadores de fluido viscoso, el cual se puede calcular y verificar su variación con respecto a los valores obtenidos para una estructura convencional.

3. OBJETIVOS

A continuación, se presentan los objetivos que se pretenden desarrollar en el trabajo de grado.

3.1. Objetivo general

Determinar el coeficiente de disipación de energía (R) para estructuras en pórticos de concreto reforzado con disipadores viscosos.

3.2. Objetivos específicos

- Implementar disipadores de fluido viscoso en las estructuras seleccionadas.
- Implementar el método de plastificación progresiva *PushOver* para el cálculo del R de las estructuras con disipadores de fluido viscoso.
- Realizar un análisis comparativo entre los coeficientes de disipación de energía (R) obtenidos para las estructuras de pórticos de concreto y pórticos de concreto que incluyan amortiguadores viscosos.

4. JUSTIFICACIÓN Y ALCANCE

4.1. Justificación

El principal objetivo a la hora de realizar el diseño estructural de cualquier edificación sin importar su magnitud o su importancia, es el de garantizar la seguridad del personal que usará o podría llegar a hacer uso de dicha estructura.

Teniendo en cuenta el objetivo principal, la ingeniería civil busca constantemente tecnologías y materiales que permitan lograr el desarrollo estructural de las sociedades conservando siempre la premisa de salvaguardar las vidas humanas. Sin embargo, debido al movimiento natural que se produce en la corteza terrestre y a las fallas tectónicas que se presentan alrededor del planeta, existen zonas cuyo riesgo sísmico es mucho mayor que otras; dichas zonas representan un reto para el diseño estructural ya que obligan a que las estructuras diseñadas en estos lugares presenten ciertas cualidades y características para que sean consideradas seguras ante la amenaza sísmica del lugar.

En Colombia, uno de los sistemas constructivos más tradicionales es el de pórticos de concreto reforzado, esto debido a que no se requiera mano de obra especializada para la construcción de estructuras basadas en este sistema, sin embargo, cuando se habla de estructuras de gran magnitud y altura, sistemas como este dejan de ser viables y se deben empezar a trabajar sistemas combinados de pórticos más pantallas de concreto o estructura metálica. Descartando poco a poco un sistema del cual se tiene amplio conocimiento en el país.

En las últimas décadas con la aparición de los sistemas de control, se ha cambiado la mentalidad del diseño estructural, de tal forma que se empieza a hablar del aislamiento de la súper estructura de los efectos transmitidos por su base (aisladores sísmicos) o de disminución de desplazamientos y control de derivas (disipadores de energía).

Con la aparición de estos nuevos mecanismos surge una necesidad de analizar si el comportamiento de las estructuras convencionales sigue siendo el mismo que se ha definido en los códigos y normativas de diseño, como es el caso de lo establecido en la NSR-10 en cuanto a la capacidad de disipación de energía de las edificaciones según su sistema estructural.

4.2. Alcance

El alcance de este trabajo es realizar una investigación experimental simulada en la cual se busca con ayuda de una herramienta computacional, determinar mediante un análisis no lineal el coeficiente de disipación de energía (R) de 6 estructuras pertenecientes al grupo de uso III cuyo sistema estructural está basado en pórticos de concreto reforzado. Las estructuras utilizadas en este trabajo son estructuras definidas previamente, de tal manera que se controlen algunos aspectos como lo son las irregularidades en planta, altura y ausencia de redundancia, sin embargo, cabe resaltar que estas estructuras serán definidas teniendo en cuenta todas las recomendaciones establecidas en la NSR-10 para el sistema estructural y la zona sísmica seleccionada.

Posteriormente se busca realizar el diseño de un sistema de disipación de energía (disipador de fluido Viscoso) y determinar mediante un análisis no lineal el coeficiente de disipación de energía (R) de las seis (6) estructuras una vez se integra el disipador de fluido viscoso, esto con el fin de obtener un coeficiente R para para las estructuras, Finalmente se compararán los resultados y se analizará como se ve afectado el coeficiente de disipación de energía cuando se utilizan amortiguadores viscosos y de esta manera determinar un coeficiente R general para el sistema estructural analizado.

4.3. Resultados esperados

Se espera que el coeficiente de disipación de energía (R) obtenido para las estructuras con los disipadores de fluido viscoso sea superior al coeficiente de disipación de energía de una estructura sin disipadores, sin embargo, comparado con los valores de nuestra normativa actual donde el $R=7$, el valor debería ser menor.

5. CONCEPTO TEÓRICO

5.1. Análisis de estructuras

El análisis estructural busca calcular las fuerzas internas y deflexiones de los elementos de una estructura, teniendo en cuenta las cargas a las que podría estar sometida, todo esto con el fin de poder estimar el comportamiento de la estructura, sin embargo, para lograr esto es necesario tener en cuenta el equilibrio de fuerzas externas e internas, la compatibilidad de deformación de todos los elementos y la relación entre fuerza y desplazamiento (Camba, Chacón & Pérez, 1982).

El proceso de análisis puede realizarse en elementos sencillos tales como pórticos simples o en grandes estructuras, para ambos casos es necesario seguir los principios básicos del análisis estructural, sin embargo, varía la complejidad del problema, para un edificio se debe tener en cuenta el sistema estructural, la interacción de los diferentes elementos estructurales, el desplazamiento en de la estructura en varios sentidos, las irregularidades que puedan presentar y las diferentes fuerzas externas, carga viva, muerta, equipos, líquidos, viento, sismo entre otras. Los tipos de análisis que se pueden presentar son:

5.1.1. Análisis estático

Este tipo de análisis estructural tiene en cuenta solamente las cargas estáticas, es decir que no varían en función del tiempo, sin embargo, también se pueden considerar cargas dinámicas que han sido aplicadas a la estructura como fuerzas estáticas equivalentes, como es el caso de las cargas sísmicas y de viento. De esta forma se aplican todas las posibles cargas externas con las cuales se realiza el análisis y posteriormente el diseño definitivo de la estructura. No obstante, cabe resaltar que, al llevar cargas dinámicas a estáticas, hay una variedad de factores que no se tienen en cuenta y que podrían generar imprecisiones en el diseño.

5.1.2. Análisis dinámico

Básicamente se puede definir como el análisis de una estructura teniendo en cuenta las cargas que varían en función del tiempo tales como cargas cíclicas, cargas de equipos que generan vibraciones, cargas de vientos, sismo, oleaje marítimo, entre otros. Aunque este tipo de análisis requiere de mucho más trabajo que el análisis lineal, incluyendo el requerimiento de recursos informáticos.

La representación del comportamiento dinámico estructural, parte de las ecuaciones de movimiento que caracterizan un sistema sencillo definido por un grado de libertad. En otros casos donde la dificultad del sistema es mayor, se deben aplicar modelos de más de un grado de libertad, teniéndose un sistema dinámico de “ N ” grados de libertad que al someterse a aceleraciones en su base se puede definir, en forma matricial, a partir de la ecuación de movimiento (Ahumada, 2010).

$$M\ddot{x}(t) + C\dot{x}(t) + Kx(t) = -M\ddot{x}_g(t) \quad (1)$$

donde:

M = masa.

C = amortiguamiento.

K = rigidez.

\ddot{x} = aceleración.

\dot{x} = velocidad.

x = desplazamiento.

\ddot{x}_g = aceleración de la gravedad.

t = tiempo.

Dependiendo de las consideraciones que se tengan sobre los materiales utilizados dentro del diseño, se puede realizar un análisis lineal o No lineal.

5.1.3. Análisis lineal

Se trabajan los materiales en el rango elástico, es decir tienen la capacidad de deformarse debido a la acción de cargas y posteriormente volver a su estado original, además, se considera que hay una relación lineal entre los esfuerzos y las deformaciones en los elementos obedeciendo la ley de Hooke. (Emilio et al., 2015).

5.1.4. Análisis no lineal

Se trabajan los materiales bajo la consideración de que pueden y deberían entrar en el rango inelástico debido a las cargas aplicadas, es decir, que los materiales una vez deformados, no recuperan completamente su estado inicial, por este motivo se considera que los desplazamientos no son proporcionales a las cargas aplicadas. El hecho de que se considere un comportamiento no lineal implica que el análisis deba realizarse en función del tiempo. (Aguiar, 2016).

Debido a la importancia que tienen la influencia de las fuerzas sísmicas dentro del diseño de las estructuras (principalmente en las zonas de alta sismicidad), se han desarrollado metodologías de análisis con el fin de lograr simular los efectos de las fuerzas sísmicas y poder mejorar el desempeño de las estructuras ante este tipo de cargas. Estos métodos de análisis pueden ser sencillos o de una alta complejidad, sin embargo, sin importar su complejidad, el éxito del análisis sísmico parte de una buena definición de los parámetros requeridos por cada método. Las principales metodologías de análisis sísmico son:

5.1.5. Análisis estático lineal

En este tipo de análisis se lleva la carga sísmica a una fuerza horizontal equivalente, donde según el reglamento colombiano de construcción sismo resistente NSR-10, la fuerza sísmica horizontal (F_x) se calcula a partir de la cortante basal V_s y un coeficiente que está en función de la masa de cada piso, su altura y el periodo fundamental de cada estructura.

$$V_s = S_a \cdot g \cdot M \quad (2)$$

$$F_x = C_{vx} \cdot V_s \quad (3)$$

donde: las variables de la ecuación 2 y 3 son,

S_a = Aceleración espectral.

g = aceleración de la gravedad.

M = masa total de la estructura.

F_x = Fuerza sísmica horizontal.

C_{vx} = Coeficiente por piso.

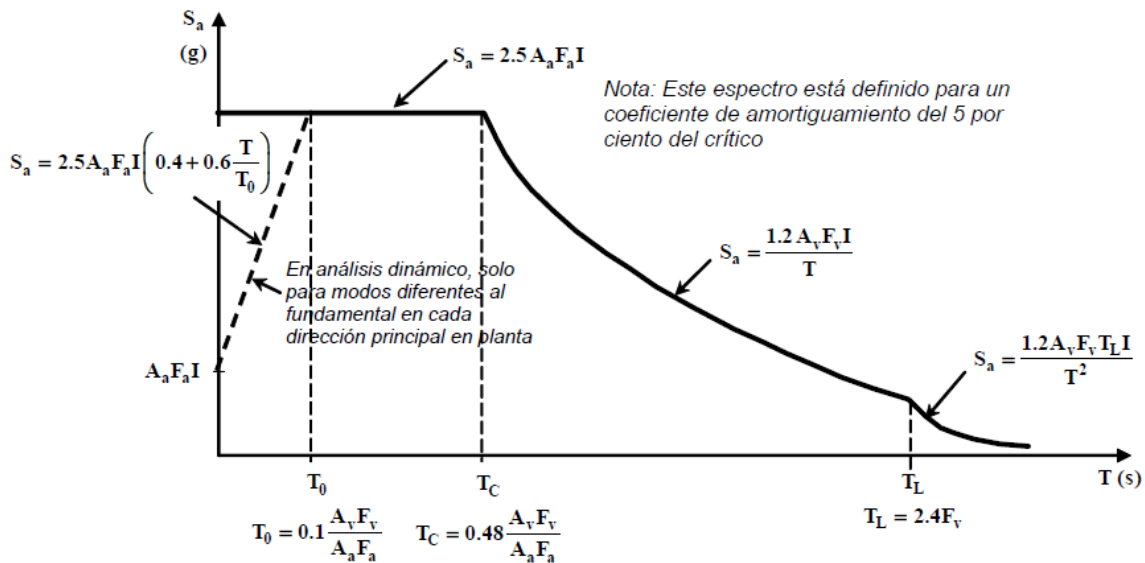
V_s = Cortante basal.

5.1.6. Análisis dinámico lineal

Se caracteriza por ser actualmente en nuestro país el método más utilizado para el análisis estructural, esto debido a que no requiere de una alta capacidad de procesamiento y tiempo a comparación de los análisis estático y dinámico No lineales, la simulación de las fuerzas sísmicas se puede realizar mediante *time history* o más comúnmente mediante un espectro de aceleraciones.

La Ilustración 1 muestra el espectro de aceleraciones con el cual se definen el sismo para este método según la NSR-10, cabe resaltar que las ecuaciones planteadas para este espectro dependen de una variedad de factores ya definidos en la norma para los diferentes lugares según el tipo de suelo, la zona sísmica (alta, media y baja), la importancia de la estructura entre otros.

Fuente: Tomado del reglamento colombiano NSR-10



5.1.7. Análisis estático no lineal

En esta metodología se busca simular el comportamiento inelástico de los materiales, aplicando la fuerza sísmica como fuerza lateral, la cual va aumentando en cada caso analizado, hasta llevar la estructura al punto del colapso y poder determinar en cada paso cual es el desplazamiento obtenido (Aguiar, 2003), una de las técnicas más conocidas para el desarrollo de esta metodología es el *PushOver* con el cual se puede determinar la curva de capacidad de las estructuras ante las cargas sísmicas.

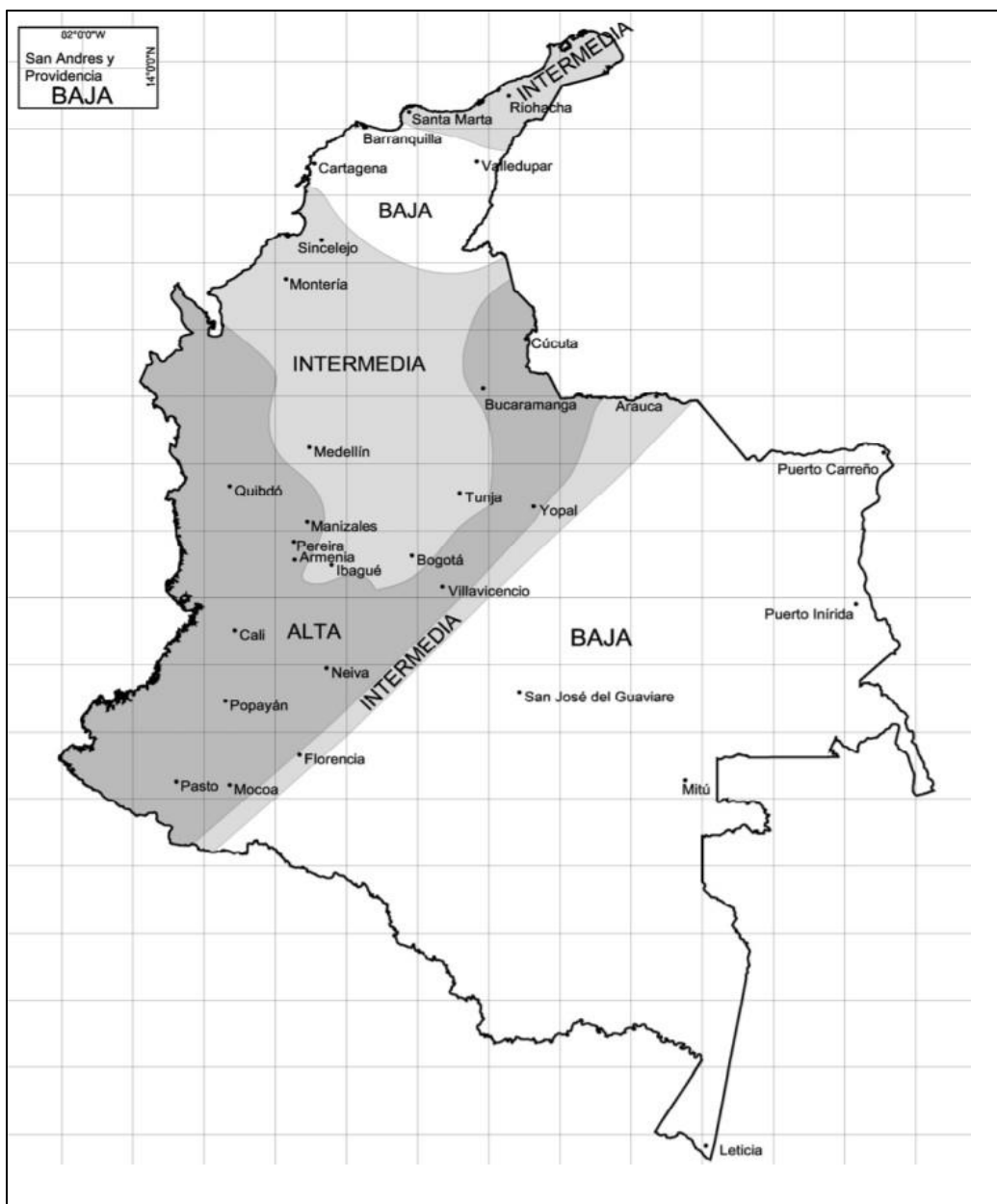
5.1.8. Análisis dinámico No lineal

Es un método con un alto grado de complejidad, ya que realiza el análisis en función del tiempo, teniendo en cuenta la carga sísmica como una serie de acelerogramas para analizar la estructura. Este procedimiento permite un análisis muy detallado de las estructuras, permite estudiar la interacción suelo estructura y es de gran utilidad a la hora de realizar una revisión estructural, sin embargo, su complejidad y el requerimiento tecnológico genera que sea poco utilizado.

La Ilustración 2 muestra el mapa de donde se clasifica la zona de amenaza sísmica para todo el territorio colombiano según la NSR-10.

Ilustración 2: Zona de amenaza sísmica aplicable para edificios para NSR-10 en función de Aa y Av

Fuente: Tomado del reglamento colombiano NSR-10



6. ESTADO DEL ARTE

6.1. Sistemas de control estructural

Los sistemas de control estructural se definen como elementos que son incorporados en las estructuras para modificar sus propiedades buscando como objetivo principal el control de desplazamientos, logrando reducir los daños causados en la estructura por cargas externas como el sismo o el impacto. La reducción de desplazamiento se puede lograr por medio de dispositivos anexados a la estructura que logren absorber o disipar la energía de las cargas externas, por mecanismos que al iniciar la carga sísmica ejerzan fuerzas adicionales con el fin de neutralizar la carga externa o por mecanismos que modifiquen las propiedades de la estructura con el fin de reducir la energía de entrada. Estos dispositivos se han clasificado en cuatro tipos de acuerdo a la manera en que actúan como: pasivos, activos, semiactivos e híbrido.(Diaz, 2014).

6.2.Sistemas de protección sísmica

Según (Ahumada, 2010). Para mejorar el desempeño de una estructura, se puede optar por afectar la masa, la rigidez o el amortiguamiento, si se habla de estructuras nuevas el modificar cualquiera de estos aspectos se considera relativamente fácil, no obstante modificar la masa y la rigidez puede ser complicado en estructuras existentes debido a los materiales, las disposiciones arquitectónicas y económicas que influyen en la estructura, sin embargo, es por esto que afectar el amortiguamiento se vuelve la mejor opción para estos casos ya que es relativamente fácil de modificar con la ayuda de sistemas de protección, los cuales se pueden dividir en 4 categorías, Pasivos, Activos, Híbridos y semi-Activos.

6.2.1. Sistemas semi-activos

Se caracterizan por no aplicar grandes fuerzas al sistema estructural, con un comportamiento similar al de los sistemas activos, aportan el control con la ayuda de dispositivos de carácter reactivo para modificar las propiedades dinámicas de la estructura con bajos costos energéticos. Algunos ejemplos de estos son: amortiguadores de fluido de

viscosidad controlable con campos eléctricos, movimiento de masas de líquidos que se encuentran en estanques estratégicamente ubicados y dispositivos de fricción variable.(Pardo, 2007).

La idea de un sistema de control semiactivo se reafirma en (Cundumi & Suárez, 2008), donde se menciona que el ideal es que el sistema semi activo funcione con características de un sistema pasivo al cual se le adiciona una fuerza externa con requerimientos energéticos muy bajos y que en caso de fallas o defectos en los mecanismos que realizan el control del sistema, el sistema se convierte en control pasivo perdiendo un poco de eficiencia que después podría ser recuperada con una respectiva reparación o ajuste.

De igual manera en (Cundumi & Suárez, 2008) y (Cundumi & Suárez, 2007). Se valida mediante simulaciones numéricas un dispositivo de control semi activo basado en disipadores de fluido viscoso llamado dispositivo semi activo de amortiguación variable VDSA. Este sistema consta de disipadores de fluido viscoso dispuestos en forma de “V”, hasta este punto se puede considerar el sistema pasivo, la diferencia es que los disipadores están unidos en la parte inferior a un sistema que se puede mover verticalmente, el cual permite variar el ángulo de los disipadores aplicando una fuerza externa moviendo su vértice en común según sea la necesidad.

Algunos otros ejemplos de sistemas semi activos se exponen en (Fisco & Adeli, 2011). El cual describe los disipadores de fluido magnetorreológico (MR), los cuales utilizan fluidos que producen grandes fuerzas de amortiguamiento en un sistema de pistón que se controla en tiempo real variando la corriente, con la ventaja de que, si hay una pérdida de potencia en la corriente, estos actúan como amortiguadores normales, es decir sistemas pasivos que proporcionan cierta protección sísmica.

Otro sistema de disipación son los disipadores de rigidez semi activos los cuales consisten en un cilindro relleno de fluido típicamente aceite, con un motor que controla una válvula, de tal manera que se controla el flujo del líquido viscoso y ajusta el coeficiente de amortiguamiento en tiempo real.

6.2.2. Sistemas de control híbrido

Se obtienen al combinar dispositivos pasivos y activos posicionados en la estructura para mejorar la eficiencia del sistema, tienen la ventaja de que en caso de falla del sistema activo los sistemas pasivos que quedan en la estructura seguirán actuando. (Pardo, 2007).

Algunos ejemplos de sistema de control híbrido, es la combinación de un aislador de base con un actuador de control y un amortiguador de control con un amortiguador de masa.

6.2.3. Sistema de control activo

Los sistemas activos se caracterizan por aplicar fuerzas externas a la estructura para modificar la respuesta dinámica y generar el control de las fuerzas dinámicas que afectan la estructura; estos dispositivos procesan información en tiempo real con ayuda de sensores para poder calcular las fuerzas necesarias a aplicar. (Pardo, 2007).

Según (Ahumada, 2010). Estos dispositivos tienen una gran desventaja con respecto a los otros ya que necesitan una fuente de energía para su funcionamiento y en caso de fallas en el suministro de energía deben tener su fuente propia.

Los amortiguadores de masa sintonizados o TMD que trabajan en base a las vibraciones y la frecuencia fundamental de la estructura, los actuadores distribuidos y los sistemas de tendones activos son algunos ejemplos de sistemas de control activos y como menciona (Fisco & Adeli, 2011). Para cada caso deben existir mecanismos que permitan el monitoreo de la estructura durante un evento de cargas externas, bien sea un sismo o incluso cargas de viento.

6.2.4. Sistemas de control pasivo

Estos son dispositivos que no requieren de aplicación de fuerzas externas, solo requieren ser instalados y su función es absorber o disipar la mayoría de las fuerzas sísmicas. Los más comunes son los aisladores sísmicos, los disipadores y los osciladores,

Los aisladores de base buscan separar la estructura de los movimientos del suelo con la ayuda de elementos flexibles como lo son apoyos elastómeros, láminas de acero o neopreno.(Zhou et al., 2008).

6.3. Control pasivo con disipadores de energía

Estos absorben la energía para evitar que sea disipada por deformaciones inelásticas de los elementos que componen la estructura, pueden ser histéricos, viscosos y viscoelásticos. Los disipadores histéricos hacen su función mediante la plastificación o fricción de elementos adicionados a la estructura, los disipadores viscosos dependen de la velocidad y los viscoelásticos de la velocidad y el desplazamiento. (Zhou et al., 2008).

6.4. Disipadores de fluido viscoso.

Los disipadores de energía logran mejorar el desempeño de la estructura, como lo menciona (Hwang et al., 2007). La incorporación de amortiguadores viscosos en una estructura corresponde a una razonable y económica manera de añadir amortiguamiento a la estructura entre un 5-15%.

Los disipadores de fluido viscoso dependen principalmente del material del cual está compuesto el relleno del pistón del disipador, usualmente de la familia de las siliconas y se pueden clasificar como lineales y no lineales. En (Hwang et al., 2007). Se plantean las ecuaciones respectivas para encontrar el amortiguamiento suministrado por los disipadores viscosos lineales y no lineales, además de las formas de instalación en los pórticos de una estructura y como esto afecta la capacidad de disipación del amortiguador.

En (Candanedo et al., 2015). Se explican los principios básicos para el diseño de estructuras con sistemas disipadores de fluido viscosos en el rango lineal, se abordan conceptos básicos para el tema a tratar como lo es la constante de amortiguamiento del disipador, la ecuación para estimar la fuerza interna en el dispositivo y recomendaciones y chequeos generales que se deben cumplir en las estructuras con sistemas de disipación de energía según la ASCE 7-05 Este procedimiento se realiza para una estructura completa y se

logra dimensionar el aumento en el costo de proyecto de hasta un 3% al implementar los disipadores, sin embargo el control de daño es mucho más efectivo. Trabajo similar al realizado por (Cundumi & Cundumi, 2021). Los cuales analizan la respuesta de estructuras con sistema estructural de pórticos de concreto reforzado implementando disipadores de fluido viscoso en el rango no lineal utilizando la metodología del ASCE 7-10 y ASCE 7-16.

Por otra parte en (Diaz, 2014), realiza el diseño de disipadores de fluido viscoso y se abarca ampliamente las ventajas e implicaciones que este y otros métodos de disipación de energía pueden tener sobre una estructura, tanto en la parte de costos, como en la parte de facilidad constructiva.

Un gran referente en el tema de diseño e implementación de disipadores de fluido viscosos son los trabajos de Taylor.(Taylor Devices, 2020), el cual tiene un manual completo para el diseño y verificación de disipadores de fluido viscoso, desde la definición de sus parámetros internos como la descripción de como modelarlo en el software ETABS.

7. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

7.1. Descripción general

Esta tesis se realizará bajo la metodología de un trabajo experimental, inicialmente se definieron las estructuras que serán objeto de análisis, teniendo en cuenta que serán de grupo de uso III y estarán entre los 6 y 8 pisos de altura, además las irregularidades presentes en planta, altura y ausencia de redundancia ϕ_p , ϕ_a , ϕ_r serán mínimas.

$$R = \Phi_a \Phi_p \Phi_r R_0 \quad (4)$$

donde:

Φ_a = coeficiente de reducción causado por irregularidades en altura.

Φ_p = coeficiente de reducción causado por irregularidades en planta.

Φ_r = coeficiente de reducción causado por ausencia de redundancia.

R_0 = coeficiente de capacidad de disipación de energía básico.

Para el sismo al cual será sometido la estructura se utilizará un espectro definido por la NSR-10 suelo tipo D para zona sísmica alta, teniendo en cuenta el nivel de importancia de la estructura se afectará el sismo de diseño según lo estipula la NSR-10 I=III para lo cual se manejará un factor de 1.25.

Se realizará el análisis de seis (6) estructuras cuyo sistema estructural es el de pórticos de concreto reforzado con capacidad especial de disipación de energía (DES), para una zona sísmica alta ($R_0=7$). Para el desarrollo del análisis estructural se utilizará el software de análisis estructural Etabs; se calculará la deriva, teniendo en cuenta los valores máximos permisibles establecidos por la NSR-10 (1% para este tipo de estructuras), se realizará el diseño típico del acero requerido para los elementos principales que componen la estructura, es decir las columnas y vigas. finalmente, se le calculará el coeficiente de capacidad de

disipación de energía (R) mediante el uso del método de plastificación progresiva *PushOver* y la metodología planteada en el ATC-19 *Structural Response Modification Factors*.

De manera paralela, se realizará el diseño de las mismas estructuras colocando disipadores de fluido viscoso, para lo cual es necesario realizar un análisis cronológico no lineal, definir los acelerogramas correspondientes, el espectro MCR y definir los parámetros de los disipadores todo esto bajo las recomendaciones del capítulo 18 del ASCE 7-16 *Seismic Design Requirements For Structures With Damping Systems*. Y el manual para disipadores viscosos de Taylor.

Finalmente se calculará con la ayuda del software Etabs el coeficiente de capacidad de disipación de energía (R), con el fin de comparar este valor con el de las estructuras sin el sistema de control y lograr definir un (R) de manera general para las estructuras cuyo sistema sea en pórticos de concreto reforzado con amortiguadores viscosos.

7.2. Análisis y diseño de las estructuras a utilizar

El diseño convencional de las estructuras se realizará con todos los requisitos estipulados en la NSR-10, se define el sistema estructural según la tabla A.3-3 de la NSR-10 la cual se puede observar en la ilustración 16, posteriormente, teniendo en cuenta las posibles cargas impuestas y la distribución de la estructura, se realiza la modelación en el software de diseño escogido que para el caso es Etabs.

7.2.1. Definición del espectro de diseño

Para la definición del sismo de diseño bajo la normativa NSR-10 se debe tener definido el lugar donde se ubicarán las estructuras, el tipo de uso que tendrá y el tipo de suelo. Con base a esto se seleccionará los valores de aceleración horizontal pico efectiva (Aa) y velocidad horizontal pico efectiva (Av) definidos en la Ilustración 3 y con estos los valores de Fa y Fv definidos en la Ilustración 4 e Ilustración 5, respectivamente.

- Lugar: Santiago de Cali, Valle del cauca.
- Tipo de suelo: D.

- Coeficiente de importancia: III .

Ilustración 3 Valor de A_a y A_v para las capitales de departamento-Tomado de NSR-10.

Ciudad	A_a	A_v	Zona de Amenaza Sísmica
Arauca	0.15	0.15	Intermedia
Armenia	0.25	0.25	Alta
Barranquilla	0.10	0.10	Baja
Bogotá D. C.	0.15	0.20	Intermedia
Bucaramanga	0.25	0.25	Alta
Cali	0.25	0.25	Alta
Cartagena	0.10	0.10	Baja
Cúcuta	0.35	0.30	Alta

Ilustración 4 Valores de F_a -Tomado de NSR-10.

Tipo de Perfil	Intensidad de los movimientos sísmicos				
	$A_a \leq 0.1$	$A_a = 0.2$	$A_a = 0.3$	$A_a = 0.4$	$A_a \geq 0.5$
A	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
B	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
C	1.2	1.2	1.1	1.0	1.0
D	1.6	1.4	1.2	1.1	1.0
E	2.5	1.7	1.2	0.9	0.9
F	véase nota	véase nota	véase nota	Véase nota	véase nota

Ilustración 5 Valores F_v -Tomado de NSR-10

Tipo de Perfil	Intensidad de los movimientos sísmicos				
	$A_v \leq 0.1$	$A_v = 0.2$	$A_v = 0.3$	$A_v = 0.4$	$A_v \geq 0.5$
A	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
B	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
C	1.7	1.6	1.5	1.4	1.3
D	2.4	2.0	1.8	1.6	1.5
E	3.5	3.2	2.8	2.4	2.4
F	véase nota	véase nota	véase nota	Véase nota	véase nota

La Ilustración 6 muestra la clasificación por grupo de uso y el factor de importancia según la NSR-10.

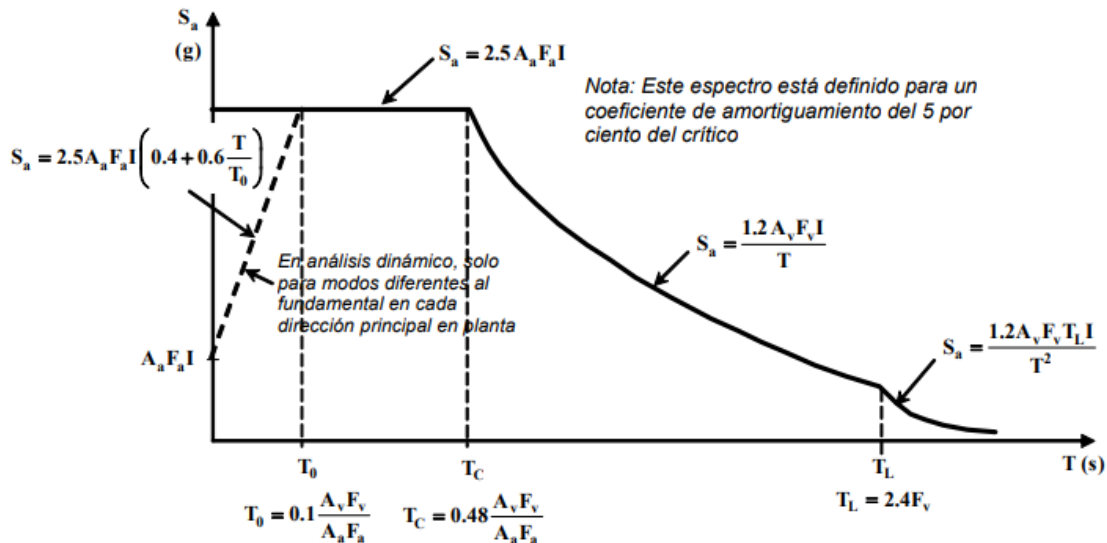
Ilustración 6 Valores del coeficiente de importancia-Tomado de NSR-10.

Valores del coeficiente de importancia, I

Grupo de Uso	Coeficiente de Importancia, I
IV	1.50
III	1.25
II	1.10
I	1.00

Después de definir todas las variables necesarias, se puede definir el espectro de aceleraciones de diseño como fracción de la gravedad como lo define la Ilustración 7.

Ilustración 7 Espectro elástico de diseño-Tomado de NSR-10.



7.2.2. Parámetros del espectro inelástico de diseño

El espectro inelástico se calcula dividiendo las ordenadas del espectro elástico, entre el coeficiente de modificación de respuesta R .

De acuerdo con el sistema estructural y con la capacidad de disipación de energía exigida por el código para cada una de las regiones se determina el coeficiente de modificación de respuesta R de la tabla A.3-3 de la NSR - 10. Para el sistema estructural utilizado $R_0 = 7.0$ según la tabla A. 3-2 de la NSR-10

7.2.3. Avalúo de cargas

Dejando de lado la carga sísmica, la estructura debe cargarse con las cargas impuestas que representen el uso que tendrá la estructura, carga viva, muerta sobre impuesta, cargas de viento, granizo, empozamiento hacen parte de las cargas que deben tenerse en cuenta y podrían o no aplicarse sobre un edificio dependiendo el caso. Estas cargas se definen de manera detallada en el título B de la NSR-10.

Combinaciones de carga considerados - diseño LRFD

El diseño de las estructuras y sus componentes debe hacerse de tal forma que sus resistencias de diseño iguallen o excedan los efectos producidos por las cargas mayoradas en las siguientes combinaciones:

$1.4(D+F)$	(B.2.4-1)	Comb1
$1.2(D+F+T)+1.6(L+H)+0.5(Lr \text{ ó } G \text{ ó } Le)$	(B.2.4-2)	Comb2
$1.2D+1.6(Lr \text{ ó } G \text{ ó } Le)+(L \text{ ó } 0.8W)$	(B.2.4-3)	Comb3
$1.2D+1.6W+1.0L+0.5(Lr \text{ ó } G \text{ ó } Le)$	(B.2.4-4)	Comb4
$1.2D+1.0E+1.0L$	(B.2.4-5)	Comb5
$0.9D+1.6W+1.6H$	(B.2.4-6)	Comb6
$0.9D+1.0E+1.6H$	(B.2.4-7)	Comb7

Se realiza el diseño teniendo en cuenta lo establecido en el capítulo C.21 de la NSR-10 requisitos sismo resistentes para zona de amenaza sísmica alta (DES). Mínimos de refuerzo establecidos para los diferentes elementos estructurales, dimensiones mínimas, chequeos de columna fuerte viga débil entre otros.

7.3. Análisis no lineal de las estructuras

Método de análisis no lineal estático de plastificación progresiva, esta metodología de diseño conocida como procedimiento *PushOver*, puede ser usada cuando el diseñador desee evaluar la capacidad de disipación de energía en el rango inelástico por este procedimiento (MINISTERIO DE AMBIENTE, 2010)

Niveles de desempeño, representan una condición de daño que puede sufrir una edificación como estado limite. Los niveles de desempeño se expresan en términos cualitativos de significación pública, según se especifica en la propuesta del ATC-19 (1995) y pueden ser:

- Ocupación inmediata.
- Control de daños.
- Seguridad.
- Seguridad limitada.
- Estabilidad estructural.
- No considerado.

Punto de desempeño: gráficamente es el punto de intersección del espectro de demanda amortiguado y el espectro de capacidad que sale de las propiedades de la estructura.

El espectro de demanda amortiguado se considera como la carga sísmica introducida a manera de un espectro de diseño con el amortiguamiento considerado por la estructura en el rango inelástico o el amortiguamiento suministrado por un sistema de disipación de energía.

Siguiendo la metodología del ATC-40, para poder comparar las gráficas de los espectros de capacidad y demanda es necesario graficarlos en función de la aceleración espectral V_s Vs desplazamiento espectral a lo cual se le conoce como *ADRS (Acceleration-Displacement Response Spectra)*. Si bien estas gráficas y las respectivas conversiones las realiza el software Etabs; con la ayuda de la ecuación (5) se puede realizar la conversión del espectro de demanda de $(S_a \text{ Vs } T)$ a $(S_a \text{ Vs } S_d)$. (ATC 40, 1996).

$$S_{di} = \frac{T_i^2}{4.\pi^2} \times S_a \times g \quad (5)$$

donde:

S_{di} = desplazamiento.

T_i = periodo de la estructura en la dirección correspondiente.

S_a = aceleración del espectro de demanda.

g = aceleración de la gravedad.

Para estimar el amortiguamiento de la estructura debido a la energía disipada y poder definir el espectro reducido se aplica la metodología planteada en el ATC-40, con base a la

gráfica del espectro de capacidad y la ecuación (6) y (7) se logra obtener un amortiguamiento efectivo.

$$\beta_0 = \frac{63.7(a_y \cdot d_{pi} - d_y \cdot a_{pi})}{a_{pi} \cdot d_{pi}} \quad (6)$$

donde:

a_y = aceleración en el punto de fluencia.

d_y = desplazamiento espectral en el punto de fluencia.

a_{pi} = aceleración ultima.

d_{pi} = desplazamiento espectral ultimo.

$$\beta_{eff} = k \cdot \beta_0 + 5 \quad (7)$$

donde: K se define en la Tabla 8.1 del ATC-40 como lo muestra la Ilustración 8 .

Ilustración 8 Tabla para definir el factor K -Tomado de ATC-40.

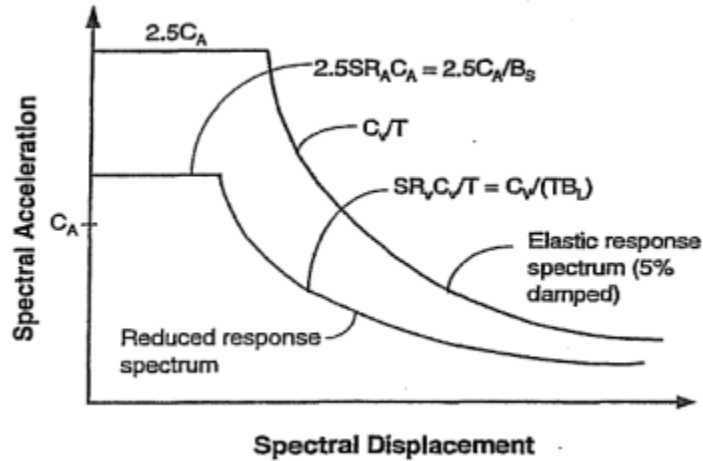
Valores para el factor de modificación de amortiguamiento, K		
tipo de comportamiento estructural	β_0	K
Tipo A	≤ 16.25	1
	> 16.25	$1.13 - \frac{0.51(a_y d_{pi} - d_y a_{pi})}{a_{pi} \cdot d_{pi}}$
Tipo B	≤ 25	0.67
	> 25	$0.845 - \frac{0.446(a_y d_{pi} - d_y a_{pi})}{a_{pi} \cdot d_{pi}}$
Tipo C	Otro valor	0.33

Finalmente se definen los valores de reducción según las ecuaciones (8) y (9) para afectar el espectro como lo muestra la Ilustración 9.

$$SR_A = \frac{3.21 - 0.68 \ln(\beta_{eff})}{2.12} \quad (8)$$

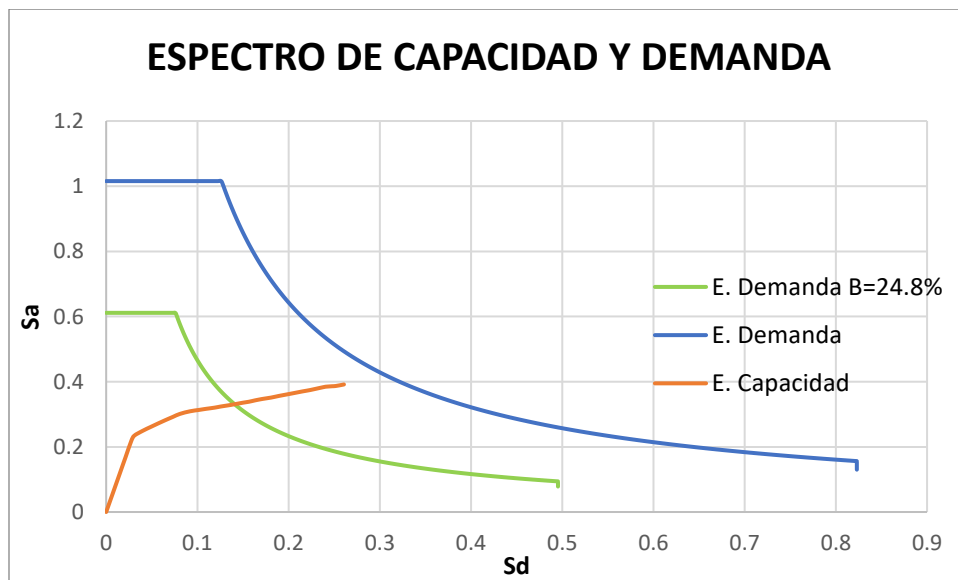
$$SR_B = \frac{2.31 - 0.4 \ln(\beta_{eff})}{1.65} \quad (9)$$

Ilustración 9 Reducción del espectro de demanda según ATC-40.



Después de tener los valores que afectan el espectro, se puede proceder a graficar el espectro de demanda reducido y encontrar su punto de intersección con el espectro de capacidad de la estructura, como se ve en la Ilustración 10.

Ilustración 10 Espectros de demanda y espectro de capacidad.



7.3.1. Requerimientos de diseño sísmico para estructuras con disipadores

Para la revisión de la estructura con disipadores de fluido viscoso se utilizaron las recomendaciones y requerimientos básicos estipulados en el ASCE 7-16 capítulo 18.

La cortante sísmica en la base utilizada para el diseño del sistema de resistencia de las fuerzas sísmicas no puede ser menor a la definida en la ecuación (10), lo anterior implica que se debe revisar la estructura sin disipadores con al menos el 75% de la fuerza sísmica de diseño.

$$V_{min} = 0.75 * V \quad (10)$$

donde

V = cortante sísmica en la base en la dirección de interés.

Las estructuras con sistemas de disipación pueden ser analizadas por tres métodos diferentes, fuerza lateral equivalente, análisis modal espectral o análisis cronológico no lineal, sin embargo, dadas las consideraciones del ASCE 7-16 para para los dos primeros métodos mencionados, se debe realizar el análisis cronológico no lineal utilizando acelerogramas.

Se deben determinar el máximo sismo considerado MCE_R para el sitio de trabajo, se debe tener en cuenta que la cantidad de acelerogramas utilizados no puede ser menor a 7 pares de componentes horizontales de acelerogramas con características y magnitudes similares debidamente escalados al MCE_R .

$$MCE_R = 1.5 * DE \quad (11)$$

donde:

DE = sismo de diseño.

El diseño y revisión de los disipadores debe realizarse con los acelerogramas definidos, de igual manera la deriva de la estructura debe realizarse con los acelerogramas y esta no

debe superar 1.5 veces la deriva máxima permitida del diseño convencional que para nuestra norma sería el 1%, es decir que la deriva no debe superar el 1.5%.

7.3.2. Selección de acelerogramas

Para la selección de acelerogramas, se realizó siguiendo la metodología del capítulo 18 del ASCE 7-16, para lo cual es necesario definir 7 pares de acelerogramas, teniendo esto en cuenta, se buscaron registros sísmicos en Colombia que tuvieran una magnitud igual o superior a 6.0 en la escala de Richter. Para la búsqueda de estos se recurrió a la página del servicio geológico colombiano (SGC, 2021). El cual consta con una base de datos de eventos sísmicos, con toda la información necesaria en cuanto a magnitud, duración, profundidad y los datos del registro en sentido norte-sur y este-oeste.

Se seleccionaron eventos sísmicos en diferentes lugares de Colombia como se aprecia en la Tabla 17, sin embargo, los acelerogramas resultantes según las recomendaciones del ASCE 7-16 deben ser escalados o “*Matcheados*” a eventos sísmicos como el sismo de diseño o el espectro MCE_R . Para el caso de trabajo se realiza el proceso de “*matching*” con ayuda del programa *SeismoMatch* teniendo como espectro objetivo el MCE_R .

Se utilizó el software *SeismoMatch* ya que es un programa de fácil manejo que permite ajustar o escalar los acelerogramas a un espectro objetivo, el cual se vuelve una variable de entrada previamente definida junto con otras variables tal como el periodo de coincidencia espectral y una tolerancia dentro del análisis. Con estos parámetros y basándose en el algoritmo de ondas de Abrahamson (1992) y Hancock et al.(2006) el programa realiza el *match* (SEISMOSOFT, 2021). Como resultado se obtienen unos nuevos acelerogramas escalados y amplificados al espectro MCE_R .

7.4. Definición del sistema de disipación

Siguiendo la metodología planteada en la tercera edición del manual de diseño de disipadores de Taylor. Se plantea el uso de disipadores no lineales para las estructuras a trabajar, para la definición de los disipadores en Etabs establece Taylor que es necesario definir tres variables. (Taylor Devices, 2020).

1. Constante del amortiguamiento, C .
2. Exponente de velocidad, α .
3. Constante del resorte, K .

El exponente de velocidad α , se define a criterio o diseñador teniendo en cuenta que para disipadores no lineales este valor debe ser diferente a la unidad y de preferencia menor a la misma. La constante del resorte K equivale a la rigidez del elemento que será utilizado como riostra para soportar el disipador de fluido viscoso.

Para el predimensionamiento de la constante de amortiguamiento el manual de Taylor define la ecuación (12), la cual plantea un estimado por piso, según el ángulo del disipador, periodo de la estructura y numero de disipadores por piso en cada dirección.

$$C_j = \zeta x \frac{k_i}{n_i} x \frac{T}{\pi} x \frac{1}{\cos^2 \theta_j} \quad (12)$$

donde:

ζ = amortiguamiento viscoso.

k_i = rigidez de piso obtenida del análisis de la estructura.

n_i = número de disipadores en cada dirección.

θ_j = ángulo del disipador.

Adicionalmente en el manual se define un aproximado del cálculo de la velocidad del disipador y la fuerza soportada por el disipador como se define en las ecuaciones (13) y (14) respectivamente.

$$V = \frac{2\pi}{T} x d \quad (13)$$

donde:

T = periodo de la estructura.

d = desplazamiento del disipador, definido como 2% x altura de piso x $\text{Cos}(\theta)$.

$$F = C.V^\alpha \quad (14)$$

donde:

C = constante de amortiguamiento del disipador.

V = velocidad del disipador previamente calculada.

Una vez definidas las variables propuestas en Taylor para definir un disipador de fluido viscoso, se procede a generar los Links el software Etabs como lo muestran las Ilustración 11 e Ilustración 12.

Ilustración 11 Definición de Link como disipador de fluido viscoso-damper expomential

General

Link Property Name:

Link Type:

Link Property Notes:

P-Delta Parameters:

Acceptance Criteria:

None specified

Total Mass and Weight

Mass: ton

Weight: kN

Rotational Inertia 1: ton-m²

Rotational Inertia 2: ton-m²

Rotational Inertia 3: ton-m²

Factors for Line and Area Springs

Link/Support Property is Defined for This Length When Used in a Line Spring Property: m

Link/Support Property is Defined for This Area When Used in an Area Spring Property: m²

Directional Properties

Direction	Fixed	NonLinear	Properties
<input checked="" type="checkbox"/> U1	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="button" value="Modify/Show for U1..."/>
<input type="checkbox"/> U2	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="button" value="Modify/Show for U2..."/>
<input type="checkbox"/> U3	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="button" value="Modify/Show for U3..."/>

Direction	Fixed	NonLinear	Properties
<input type="checkbox"/> R1	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="button" value="Modify/Show for R1..."/>
<input type="checkbox"/> R2	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="button" value="Modify/Show for R2..."/>
<input type="checkbox"/> R3	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="button" value="Modify/Show for R3..."/>

Stiffness Options

Stiffness Used for Linear and Modal Load Cases:

Stiffness Used for Stiffness-proportional Viscous Damping:

Stiffness-proportional Viscous Damping Coefficient Modification Factor:

Ilustración 12 Variables a definir para el link como disipador -Fuente propia

ET Link/Support Directional Properties ✕

Identification

Property Name	<input type="text" value="DFV X1"/>
Direction	<input type="text" value="U1"/>
Type	<input type="text" value="Damper - Exponential"/>
NonLinear	<input type="text" value="Yes"/>

Linear Properties

Effective Stiffness	<input type="text" value="0"/>	kN/m
Effective Damping	<input type="text" value="0"/>	kN-s/m

Nonlinear Properties

Stiffness	K	<input type="text" value="248243"/>	kN/m
Damping	C	<input type="text" value="1800"/>	$kN*(s/m)^{Cexp}$
Damping Exponent	α	<input type="text" value="0.3"/>	

Las fuerzas a las cuales será sometida la estructura para este caso en particular son los acelerogramas sometidos en el capítulo 7.3, sin embargo, Taylor define una forma particular para las curvas de histéresis de los disipadores de fluido viscoso, como lo muestra la Ilustración 13, sin embargo, esta es una curva idealizada, además, Ilustración 14 e Ilustración 15 muestran algunas de las curvas de histéresis obtenidas para los sismos de Quindío.

Ilustración 13 Grafica curva de histéresis idealizada. -Tomado de Taylor

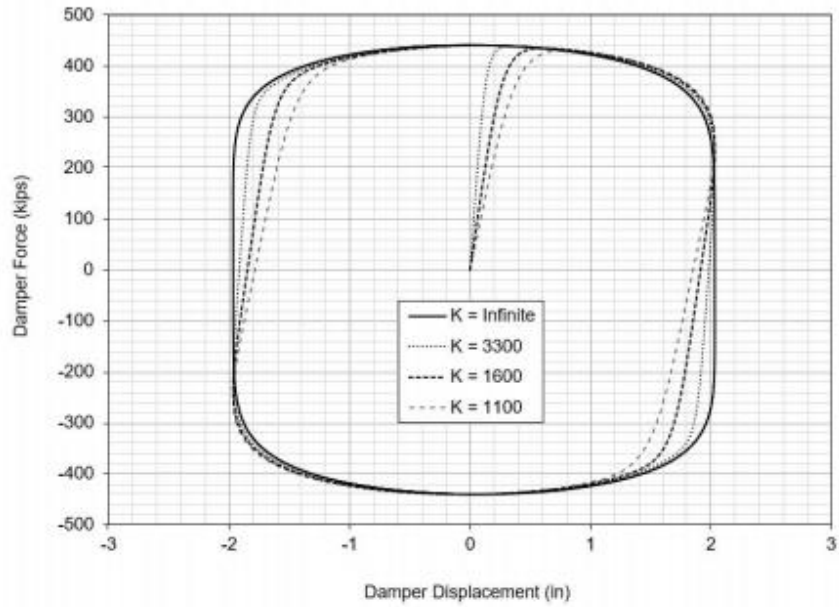


Ilustración 14 Curva de histéresis- Fuente propia.

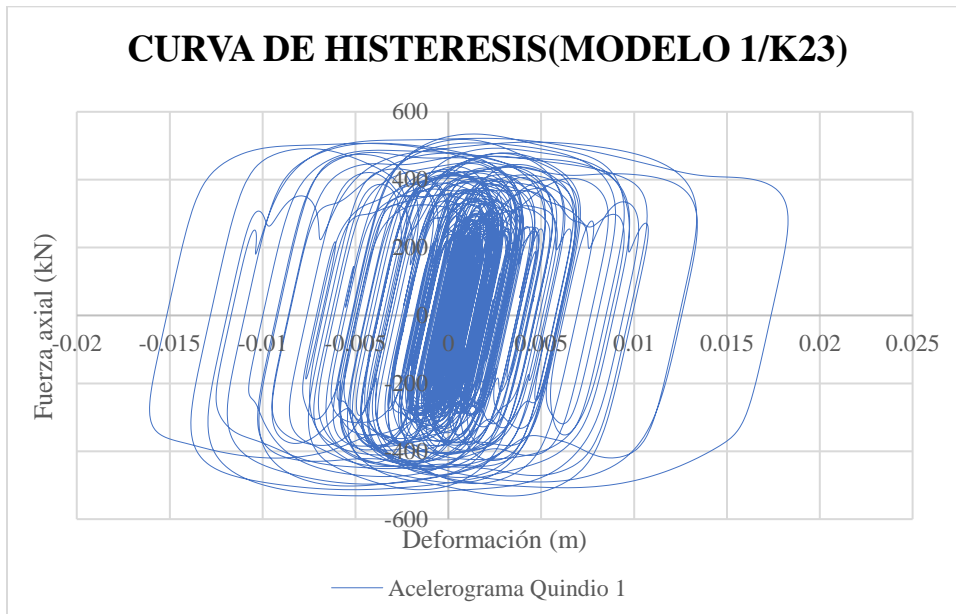
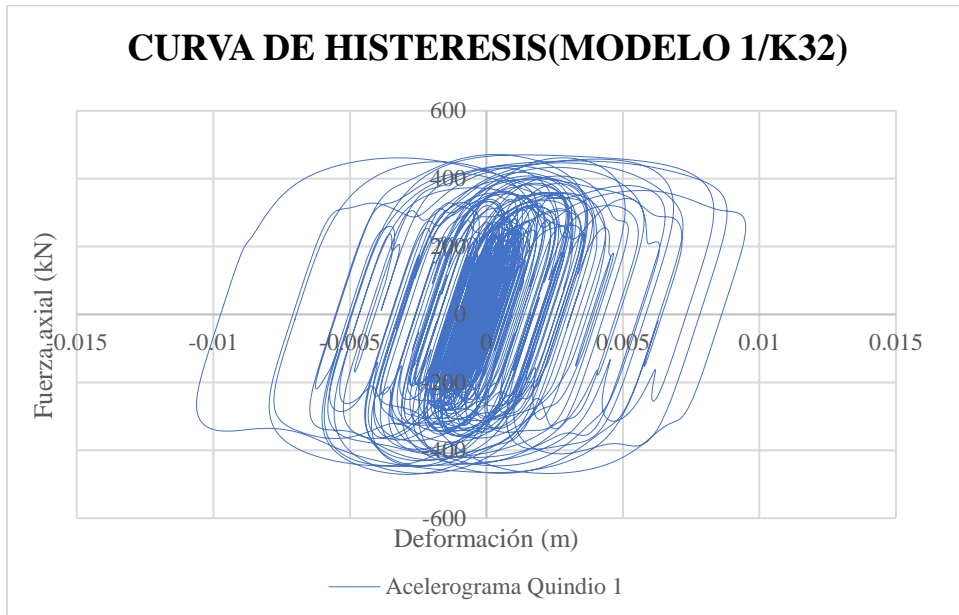


Ilustración 15 Grafica para un disipador-Fuente propia



7.5. Cálculo del coeficiente de disipación de energía

Para lograr contextualizar el tema a tratar, es necesario definir el factor R , lo cual se hace con base a la NSR-10.

Coeficiente de capacidad de disipación de energía (R): es el valor sobre el cual se divide la fuerza sísmica obtenidas del análisis para obtener las fuerzas reducidas de diseño; este valor depende del sistema estructural de resistencia sísmica. Un ejemplo de esto se aprecia en la Ilustración 16 extraída de la NSR-10, la cual muestra algunos valores del coeficiente básico de disipación de energía para pórticos resistente a momentos.

Ilustración 16: Tabla de sistema estructural pórtico resistente a momento y su respectivo R_0

Fuente: Tomado del reglamento colombiano NSR-10

Tabla A.3-3
Sistema estructural de pórtico resistente a momentos (Nota 1)

C. SISTEMA DE PÓRTICO RESISTENTE A MOMENTOS		Valor R_0 (Nota 2)	Valor Ω_0 (Nota 4)	zonas de amenaza sísmica					
				Alta		Intermedia		baja	
Sistema resistencia sísmica (fuerzas horizontales)	Sistema resistencia para cargas verticales			uso permit	altura máx.	uso permit	altura máx.	uso permit	altura máx.
1. Pórticos resistentes a momentos con capacidad especial de disipación de energía (DES)									
a. De concreto (DES)	el mismo	7.0	3.0	si	sin límite	si	sin límite	si	sin límite
b. De acero (DES)	el mismo	7.0 (Nota-3)	3.0	si	sin límite	si	sin límite	si	sin límite
c. Mixtos	Pórticos de acero o mixtos resistentes o no a momentos	7.0	3.0	si	sin límite	si	sin límite	si	sin límite
d. De acero con cerchas dúctiles (DES)	Pórticos de acero resistentes o no a momentos	6.0	3.0	si	30 m	si	45 m	si	sin límite

En la metodología de diseño actual se tienen sismos de diseño con periodos de retorno de 475 años, lo cual implica sismos considerablemente altos, con una probabilidad de ocurrencia baja, por lo cual el diseño estructural realizado busca que las estructuras trabajen en el rango no lineal, de esta manera se espera que las estructuras a la hora de un sismo sufran daños, pero no lleguen al punto del colapso, por lo cual se define un espectro inelástico de diseño, el cual sale de dividir el espectro elástico entre el factor de reducción de fuerzas sísmicas R (Aguiar, 2006).

En Aguiar (2007), se define el factor de reducción de fuerzas sísmicas R de diferentes formas y por diferentes autores, sin embargo, la ecuación y la definición de R a utilizar es la dada por el ATC-19 como se muestra en la ecuación (15)

$$R = R_{\mu} \cdot R_{\Omega} \cdot R_r \quad (15)$$

donde:

R_{μ} = Factor de resistencia por ductilidad.

R_{Ω} = Factor de sobre resistencia.

R_r = Factor de redundancia.

Se define el factor de ductilidad R_{μ} como una relación entre los desplazamientos elástico e inelástico de un sistema de un grado de libertad, teniendo en cuenta la ductilidad del sistema. Este factor puede o no estar afectado por el tipo de suelo (Aguiar, 2006). Para el caso se trabajará con el factor de ductilidad en función de la ductilidad de la estructura, se define la ductilidad según la ecuación (16).

$$\mu = \frac{\Delta_{Max}}{\Delta_y} \quad (16)$$

donde:

Δ_{Max} : Desplazamiento en el punto de fluencia.

Δ_y : Desplazamiento de fluencia.

Una vez definida la ductilidad, se trabajará el factor de ductilidad según lo propuesto por en las siguientes ecuaciones en función del periodo de la estructura y la ductilidad. (Abdi et al, 2018):

$$T \leq 0.03s \quad R_{\mu} = 1.0 \quad (17)$$

$$0.03s < T < 0.12s \quad R_{\mu} = 1 + \frac{(T - 0.03) \cdot (\sqrt{(2\mu - 1)} - 1)}{0.09} \quad (18)$$

$$0.12s \leq T \leq 0.5s \quad R_{\mu} = \sqrt{(2\mu - 1)} \quad (19)$$

$$0.5s < T < 1.0s \quad R_{\mu} = \sqrt{(2\mu - 1)} + 2 \cdot (T - 0.5) \cdot (\mu - \sqrt{(2\mu - 1)}) \quad (20)$$

$$1.0s \leq T \quad R_{\mu} = \mu \quad (21)$$

Debido a que el periodo de todas las estructuras planteadas esta entre 0.6 y 0.99, siempre se utilizará la ecuación (20).

El factor de sobre resistencia R_{Ω} se manejará como la relación entre el cortante de fluencia y el cortante de diseño (Aguiar, 2007). este último se tomará como el punto donde se genera la primera rotula plástica, su cálculo se muestra en la ecuación 21. Para calcular el factor de sobre resistencia es necesario tener la curva de capacidad, la cual se obtiene mediante la técnica del *PushOver*.

$$R_{\Omega} = \frac{V_y}{V_d} \quad (21)$$

donde:

V_y = cortante de fluencia.

V_d = cortante de diseño, donde se genera la primera rotula plástica.

El factor de redundancia R_r depende de la resistencia adicional que tienen los elementos cuando llegan a la fluencia, de la cantidad de elementos que tienen los pórticos y la cantidad de pórticos que posee la estructura, también se puede analizar en función al número de rotulas plásticas que se pueden presentar en la estructura (Aguiar, 2006). Para este caso se obtuvo el valor de R_r según lo manejado en el ATC-19, en donde se manejan valores menores a la unidad cuando la estructura tiene menos de 4 ejes de columnas como lo muestra la Tabla 1.

Tabla 1 Valores propuestos para el R_r según el ATC-19

Numero de ejes de columnas	Factor R_R
2	0.71
3	0.86
4	1.00

Como referencia del coeficiente de capacidad de disipación de energía se toma los valores encontrados por el ingeniero Abdi, tomados de (Gomez Navarrete, 2020). Para estructuras de concreto reforzado, de 4 y 8 pisos ya que tienen un número similar de pisos a los manejados en esta tesis. se manejaron edificios de 4 a 20 pisos, centrándonos en los resultados obtenidos para los edificios de 4 y 8 pisos ya que tienen un número similar de pisos a los manejados en esta tesis.

La Tabla 2 consigna los valores de R obtenidos para una tesis que maneja edificios de 4 a 20 pisos en pórticos de concreto.

Tabla 2 Valores de R para estructuras de concreto reforzado según la investigación del ing. Abdi. (Gómez, 2020).

Modelo	R		Comparación	Cortante en el punto de Desempeño
	Sin Disipadores	Con Disipadores		
4 pisos	1.57	2.47	8629	5110
8 pisos	2.00	3.42	14612	6488
12 pisos	3.22	5.65	20302	22730
16 pisos	3.5	5.19	27064	21881
20 pisos	3.69	4.81	31406	21042

8. DESARROLLO DE LA METODOLOGIA

Para el desarrollo de la metodología planteada se trabajaron seis (6) estructuras, tres de ellas de 6 pisos y las otras tres de 8 pisos, además por cada estructura fue necesario realizar 3 modelos distintos, uno para el diseño convencional, uno con los disipadores viscosos realizando una reducción en los elementos estructurales y un modelo que tuviera las reducciones de los elementos estructurales sin los disipadores viscosos, de tal manera que se pudiera revisar lo estipulado en el ASCE 7-16, el cual indica que es necesario verificar que la estructura sin disipadores pueda soportar al menos el 75% de la fuerza sísmica a la cual podría estar sometida la estructura.

Debido a lo mencionado anteriormente y a lo extenso que sería consignar todos los cálculos de cada uno de esos modelos, a continuación, se presentan las consideraciones generales que le competen a todas las estructuras, el desarrollo de todo el proceso para una sola de las estructuras y al final se podrá observar los valores obtenidos para todos los modelos trabajados, dejando como anexos los cálculos de todos los 18 modelos generados.

8.1. Descripción de las estructuras y consideraciones generales

Se manejaron 2 tipos de estructuras de 6 pisos y 8 pisos con altura entre pisos de 3m, las estructuras de 6 pisos se manejaron con secciones de columnas continuas en toda su altura y secciones de vigas y viguetas iguales en todas las losas. Para las estructuras de 8 pisos se manejaron los primeros cinco pisos con unas secciones y posteriormente se realiza una reducción en los últimos tres pisos, esto debido a que las secciones en los primeros pisos tienen estas dimensiones para controlar derivas más que a soportar las cargas impuestas. Las secciones típicas se presentan en la Tabla 3 junto con las Ilustración 17, Ilustración 18 y la Ilustración 19 donde se aprecian los modelos 3D.

Ilustración 17 Modelo E1 y E3.

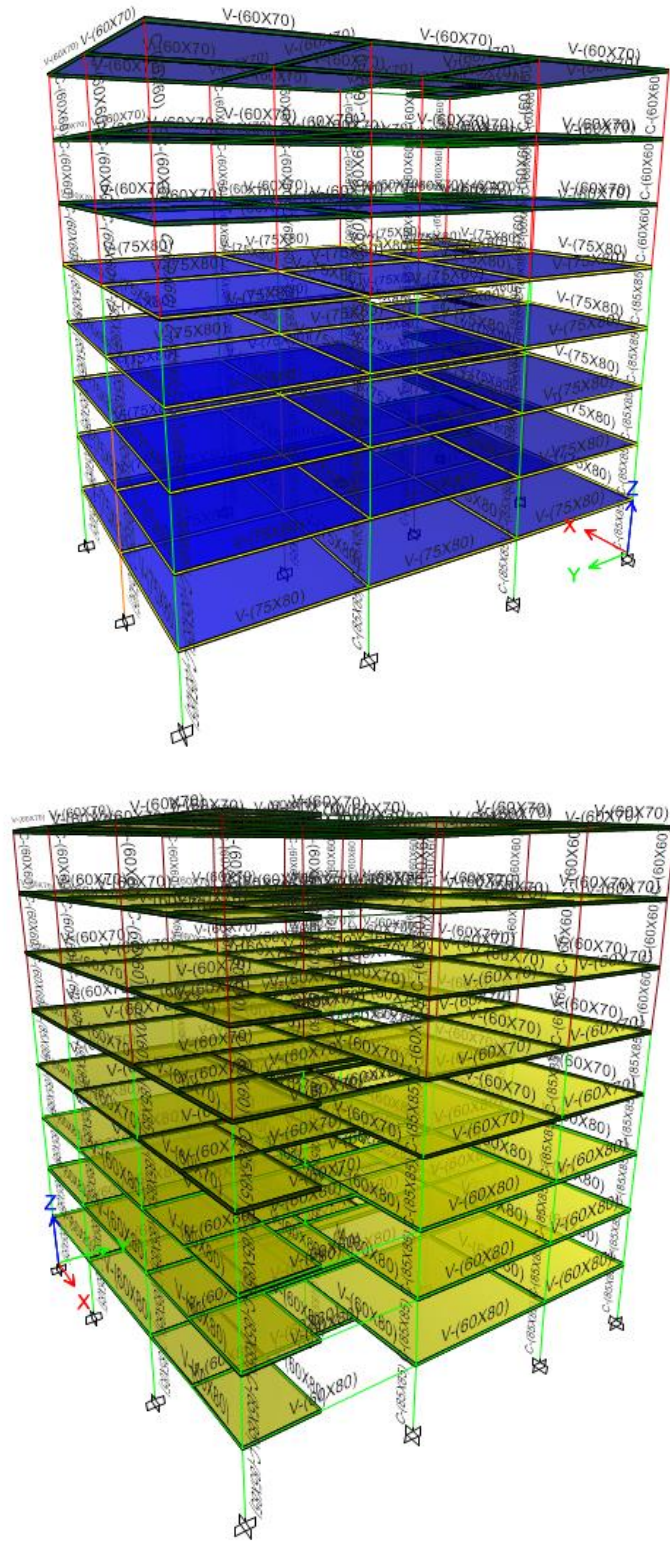


Ilustración 18 Modelo E4 y E6.

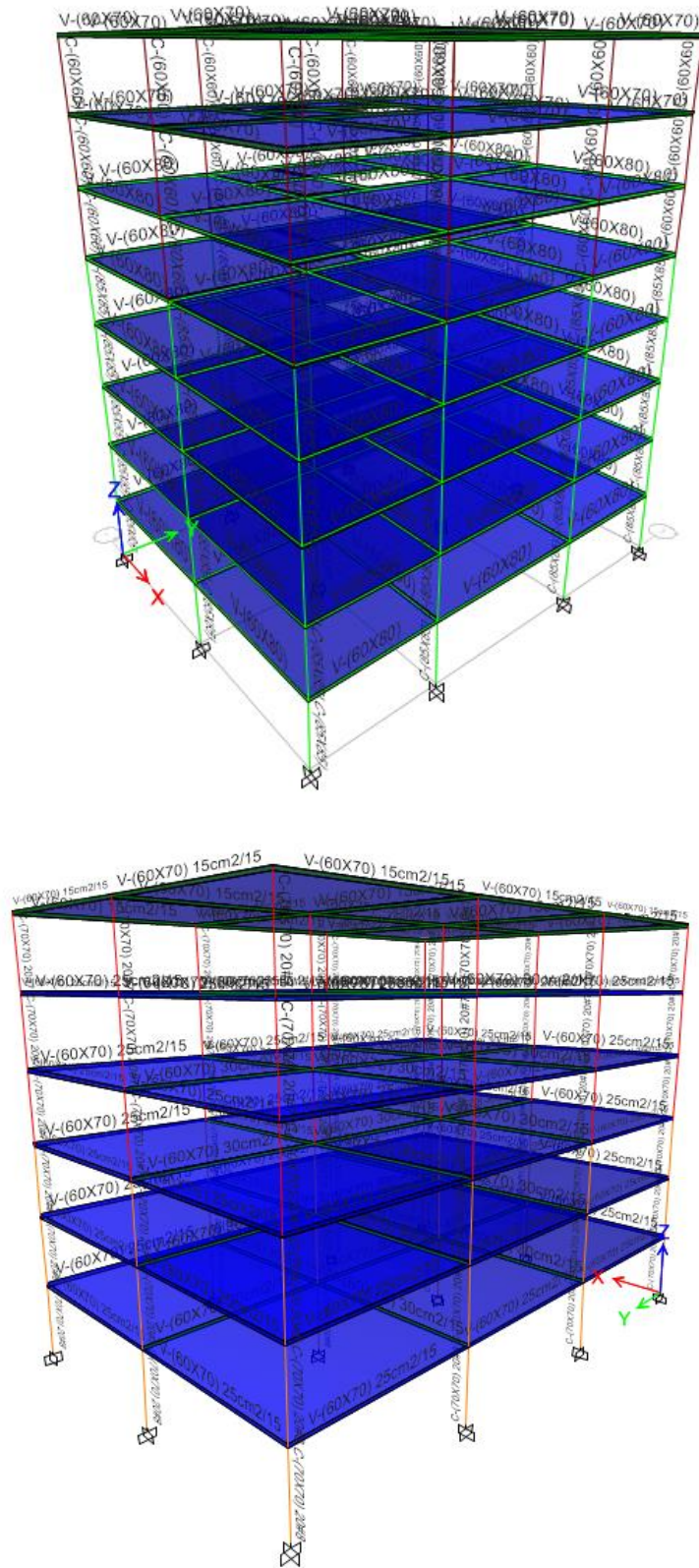


Ilustración 19 Modelo E8 y E9.

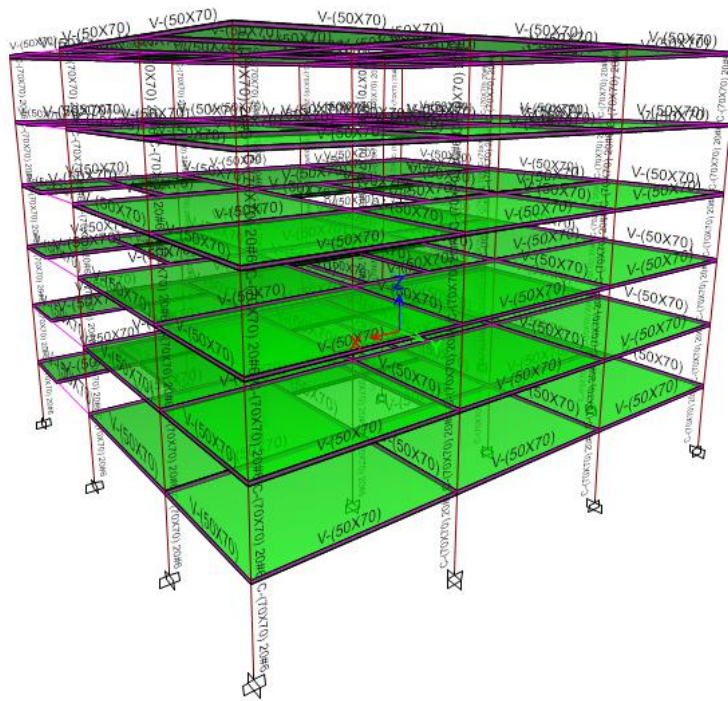
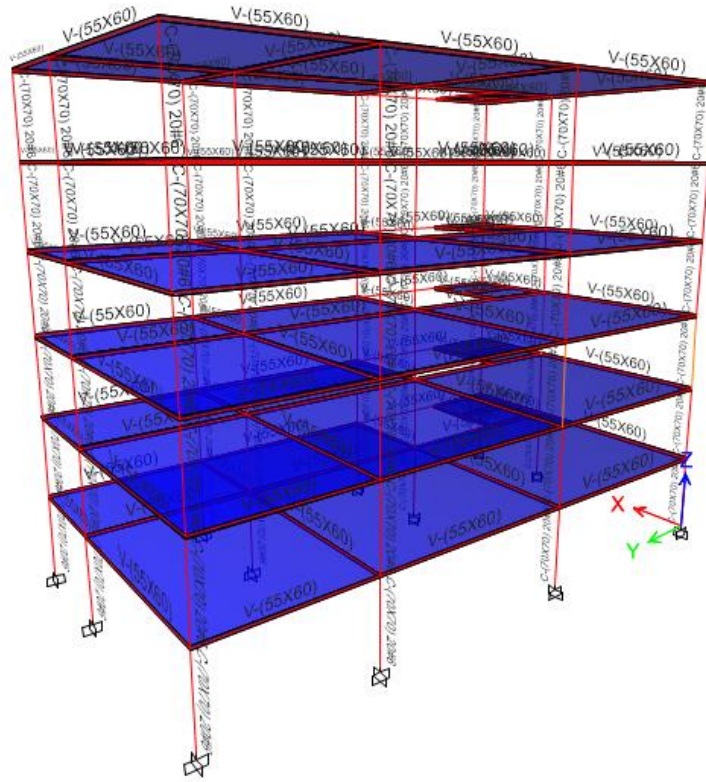


Tabla 3 Secciones de los elementos-Diseño convencional.

Estructuras 6 pisos			
Pisos	Columnas	Refuerzo	Vigas
1 a 3	70X70	20#8	60X70
4 a 6	70X70	20#7	60X70
Estructuras 8 pisos			
Pisos	Columnas	Refuerzo	Vigas
1 a 5	85x85	20#7	75X80
6 a 8	60x60	16#6	60X70

La Tabla 4 muestra el avalúo de cargas utilizado para todos los modelos.

Tabla 4 Avalúo de cargas

Carga muerta	
Afinado de piso y acabados	1.5 kN/m ²
Particiones de mampostería	2.0 kN/m ²
Total, carga muerta	3.5 kN/m²
Carga viva	
Corredores y escaleras	5.0 kN/m ²
Zonas privadas	2.0 kN/m ²
Cargas losa de cubierta	
Muerta	1.2 kN/m ²
Viva	2.0 kN/m ²
Empozamiento	1.0 kN/m ²

Materiales:

Concreto 4000Psi.

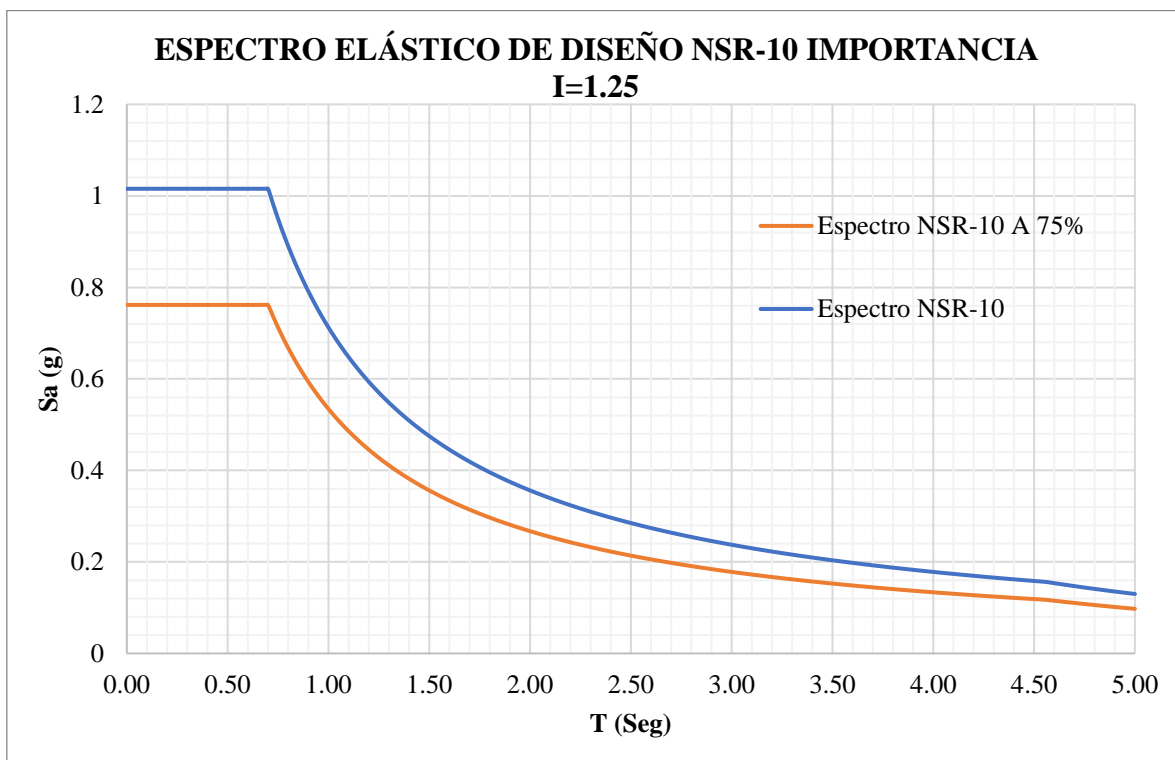
Acero de refuerzo $F_y=420\text{MPa}$.

La Tabla 5 muestra los valores utilizados para definir el espectro de diseño según la NSR-10, además, la Ilustración 20 muestra el espectro de diseño y el espectro de diseño reducido al 75% utilizado para el chequeo de las estructuras reducidas después de haber definido los disipadores.

Tabla 5 Datos de espectro de diseño

Tipo de suelo	D
Departamento	Valle del Cauca
Municipio	Cali
Zona de amenaza sísmica	Alta
Aa	0.25
Fa	1.30
Av	0.25
Fv	1.90
To	0.15
Tc	0.70
TL	4.56
Importancia III	1.25

Ilustración 20 Espectros de diseño según NSR-10



8.2. Análisis y diseño del modelo del edificio 1- E1

A continuación, se presenta la información de diseño del edificio 1 (E1) de 8 pisos de altura y luces típicas de 8m entre ejes, las Ilustración 21, Ilustración 22, Ilustración 23 y la Ilustración 24 muestran el 3D, la planta típica y las secciones típicas de la estructura respectivamente.

Ilustración 21 Modelo 3D

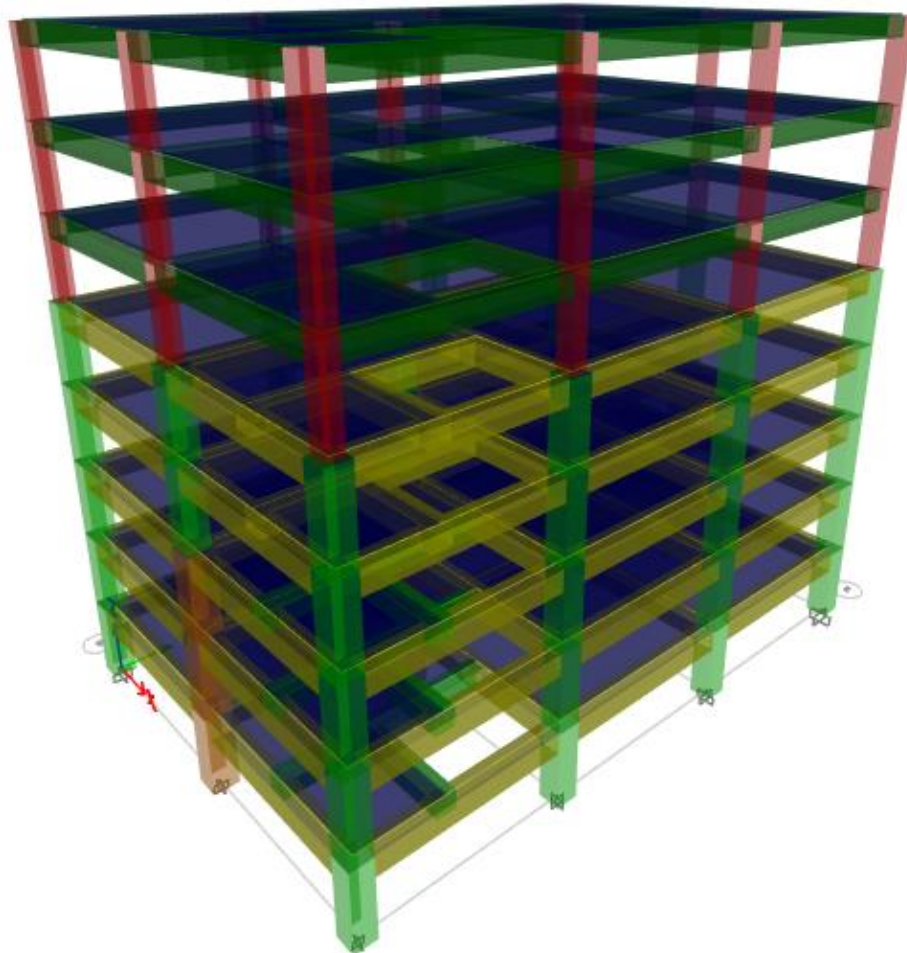


Ilustración 23. Sección típica por los ejes número.

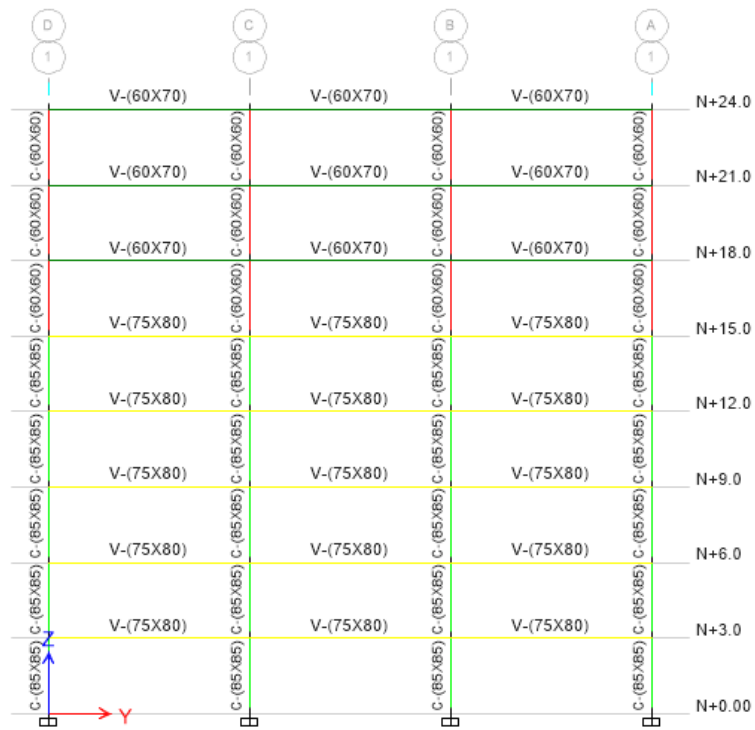
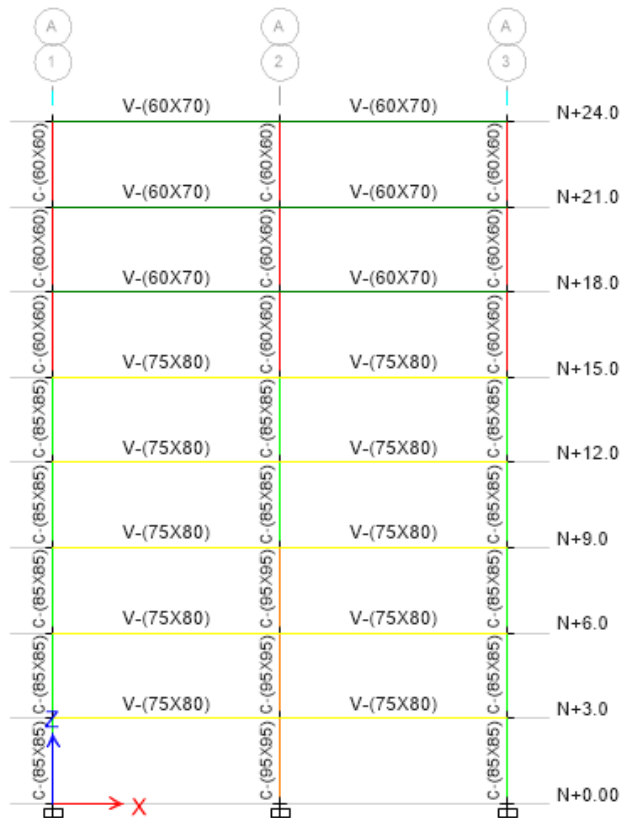


Ilustración 24 Sección típica por los ejes letra.



8.2.1. Chequeo de irregularidades

Se presentan a continuación la Tabla 6 y Tabla 7 con el cálculo de las irregularidades en planta y altura.

Tabla 6 Chequeo de irregularidades en planta.

DESPLAZAMIENTO PARALELO A "X"							
Piso	Etiqueta	Nombre	Caso de carga	Desplazamiento X	Desplazamiento Y	Deriva X	Deriva Y
				m	m		
N+24.0	1	2	SismoX	0.1730	0.0019	0.0052	0.00006
N+24.0	4	30	SismoX	0.1692	0.0019	0.0051	0.00006

	$\Delta 1$	$\Delta 2$	$1.4*(\Delta 1+\Delta 2)/2$	$1.2*(\Delta 1+\Delta 2)/2$	TIPO 1aP	TIPO 1bP
N+24.0	0.0019	0.0019	0.0027	0.0023	N/A	N/A

DESPLAZAMIENTO PARALELO A "Y"

Piso	Etiqueta	Nombre	Caso de carga	Desplazamiento X	Desplazamiento Y	Deriva X	Deriva Y
				m	m		
N+24.0	1	2	SismoY	0.0076	0.1583	0.00022	0.0046
N+24.0	9	76	SismoY	0.00765	0.1514	0.00022	0.0044

	$\Delta 1$	$\Delta 2$	$1.4*(\Delta 1+\Delta 2)/2$	$1.2*(\Delta 1+\Delta 2)/2$	TIPO 1aP	TIPO 1bP
N+24.0	0.0076	0.0076	0.0106	0.0091	N/A	N/A

Tabla 7 Resumen de irregularidades en planta.

TIPO	CARACTERÍSTICA	Φ_p	CUMPLE
1aP	Irregularidad torsional — La irregularidad torsional existe cuando en una edificación con diafragma rígido, la máxima deriva de piso de un extremo de la estructura, calculada incluyendo la torsión accidental y medida perpendicularmente a un eje determinado, es más de 1.2 y menor o igual a 1.4 veces la deriva promedio de los dos extremos de la estructura, con respecto al mismo eje de referencia.	0.9	NO
1bP	Irregularidad torsional extrema — La irregularidad torsional extrema existe cuando en una edificación con diafragma rígido, la máxima deriva de piso de un extremo de la estructura, calculada incluyendo la torsión accidental y medida perpendicularmente a un eje determinado, es más de 1.4 veces la deriva promedio de los dos extremos de la estructura, con respecto al mismo eje de referencia.	0.8	NO
2P	Retrocesos excesivos en las esquinas — La configuración de una estructura se considera irregular cuando ésta tiene retrocesos excesivos en sus esquinas. Un retroceso en una esquina se considera excesivo cuando las proyecciones de la estructura, a ambos lados del retroceso, son mayores que el 15 por ciento de la dimensión de la planta de la estructura en la dirección del retroceso.	0.9	NO
3P	Discontinuidades en el diafragma — Cuando el diafragma tiene discontinuidades apreciables o variaciones en su rigidez, incluyendo las causadas por aberturas, entradas, retrocesos o huecos con áreas mayores al 50 por ciento del área bruta del diafragma o existen cambios en la rigidez efectiva del diafragma de más del 50 por ciento, entre niveles consecutivos, la estructura se considera irregular.	0.9	NO
4P	Desplazamientos del plano de acción de elementos verticales — La estructura se considera irregular cuando existen discontinuidades en las trayectorias de las fuerzas inducidas por los efectos sísmicos, tales como cuando se traslada el plano que contiene a un grupo de elementos verticales del sistema de resistencia sísmica, en una dirección perpendicular a él, generando un nuevo plano. Los altillos o mansardas de un solo piso se eximen de este requisito en la consideración de irregularidad.	0.8	NO
5P	Sistemas no paralelos — Cuando las direcciones de acción horizontal de los elementos verticales del sistema de resistencia sísmica no son paralelas o simétricas con respecto a los ejes ortogonales horizontales principales del sistema de resistencia sísmica, la estructura se considera irregular.	0.9	NO

Factor de irregularidad en planta.

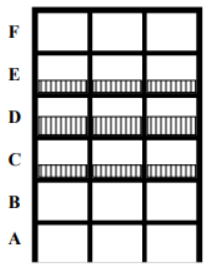
$\Phi_p =$	1.00
------------	-------------

Se presentan a continuación la Tabla 8 y Tabla 9 con el cálculo de las irregularidades en planta y altura.

Tabla 8 Chequeo de irregularidades en altura.

Descripción real	Descripción	Cantidad	E (ton/m ²)	I (m ⁴)	H (m)	K (kN/m)
A		17	2485557.81		3	2026214.13
B	C	17	2485557.81		3	1125620.69
C	D	10	2485557.81		3	998382.18
D	E	10	2485557.81		3	932908.99
E		10	2485557.81		3	887299.25

0.60 Rigidez KD	599029.31
Rigidez Kc	1125620.70
0.70 Rigidez KD	698867.53
0.70(KD+KE+KF)/3	
0.80(KD+KE+KF)/3	

<p>Tipo 2A — Distribución masa — $\phi_a = 0.9$</p> <p>$m_D > 1.50 m_E$ o $m_D > 1.50 m_C$</p>	
--	---

PISO 1	m-B	502.55	Ton
PISO 2	m-C	502.55	Ton
PISO 3	m-D	499.96	Ton
PISO 4	m-E	415.71	Ton
PISO 5	m-F	415.71	Ton

m-D > 1.50 m-E o m-D > 1.50 m-C
N/A

Φ_a	N/A
----------------------------	-----

Tabla 9 Resumen de irregularidad en altura.

TIPO	Característica	Φ_p	CUMPLE
1aA	Piso flexible (Irregularidad en rigidez) — Cuando la rigidez ante fuerzas horizontales de un piso es menor del 70 por ciento pero superior o igual al 60 por ciento de la rigidez del piso superior o menor del 80 por ciento pero superior o igual al 70 por ciento del promedio de la rigidez de los tres pisos superiores, la estructura se considera irregular.	0.9	NO
1bA	Piso flexible (Irregularidad extrema en rigidez) — Cuando la rigidez ante fuerzas horizontales de un piso es menor del 60 por ciento de la rigidez del piso superior o menor del 70 por ciento del promedio de la rigidez de los tres pisos superiores, la estructura se considera irregular.	0.8	NO
2A	Irregularidad en la distribución de las masas — Cuando la masa, m_i , de cualquier piso es mayor que 1.5 veces la masa de uno de los pisos contiguos, la estructura se considera irregular. Se exceptúa el caso de cubiertas que sean más livianas que el piso de abajo.	0.9	NO
3A	Irregularidad geométrica — Cuando la dimensión horizontal del sistema de resistencia sísmica en cualquier piso es mayor que 1.3 veces la misma dimensión en un piso adyacente, la estructura se considera irregular. Se exceptúa el caso de los altillos de un solo piso. [$a > 1.30b$]	0.9	NO
4A	Desplazamientos dentro del plano de acción — La estructura se considera irregular cuando existen desplazamientos en el alineamiento de elementos verticales del sistema de resistencia sísmica, dentro del mismo plano que los contiene, y estos desplazamientos son mayores que la dimensión horizontal del elemento. Cuando los elementos desplazados solo sostienen la cubierta de la edificación sin otras cargas adicionales de tanques o equipos, se eximen de esta consideración de irregularidad.	0.8	NO
5aA	Piso débil — Discontinuidad en la resistencia — Cuando la resistencia del piso es menor del 80 por ciento de la del piso inmediatamente superior pero superior o igual al 65 por ciento, entendiendo la resistencia del piso como la suma de las resistencias de todos los elementos que comparten el cortante del piso para la dirección considerada, la estructura se considera irregular.	0.9	NO
5bA	Piso débil — Discontinuidad extrema en la resistencia — Cuando la resistencia del piso es menor del 65 por ciento de la del piso inmediatamente superior, entendiendo la resistencia del piso como la suma de las resistencias de todos los elementos que comparten el cortante del piso para la dirección considerada, la estructura se considera irregular.	0.8	NO

Factor de irregularidad en altura.

$\phi_a = 1.00$

La Tabla 10 presenta las cortantes basales y la Tabla 11 el chequeo de ajuste de cortante basal junto con los coeficientes de mayoración del espectro.

Tabla 10 Cortantes basales.

TABLA: Reacciones en la base		
Caso de carga/Combo	FX	FY
	kN	kN
SismoX 9.81 Max	21053.34	76.98
SismoY 9.81 Max	76.98	22062.83

Tabla 11 Ajuste de cortante basal.

Ajuste de resultados análisis dinámico

A.5.4.5

Irregularidad	80%	
Sa-max	0.81	
Fz	36832.7923	kN

Fx-max	21053.34	kN
Fy	76.98	kN

Fy-max	22062.83	kN
Fx	76.98	kN

Vs	23867.65	kN
-----------	-----------------	----

Factor X	1.13
Factor Y	1.08

(Factor X)*g	11.12m/s²
(Factor Y)*g	10.61m/s²

8.2.2. Verificación de derivas

Después de realizar el ajuste de cortante basal y revisar que los elementos estructurales resistieran las cargas impuestas, se procede a revisar la deriva de la estructura que debe ser menor al 1%, los valores de deriva se consignan en la Tabla 12 y grafican en las Ilustración 25 y la Ilustración 26 según la dirección X o Y.

Tabla 12 Tabal de derivas E1.

Piso	Elevación	Deriva X	Deriva Y
	m		
N+24.0	24	0.52%	0.47%
N+21.0	21	0.86%	0.78%
N+18.0	18	0.99%	0.91%
N+15.0	15	0.72%	0.65%
N+12.0	12	0.79%	0.72%
N+9.0	9	0.81%	0.75%
N+6.0	6	0.75%	0.70%
N+3.0	3	0.42%	0.40%
N+0.00	0	0.00%	0.00%

Ilustración 25 Deriva en X.

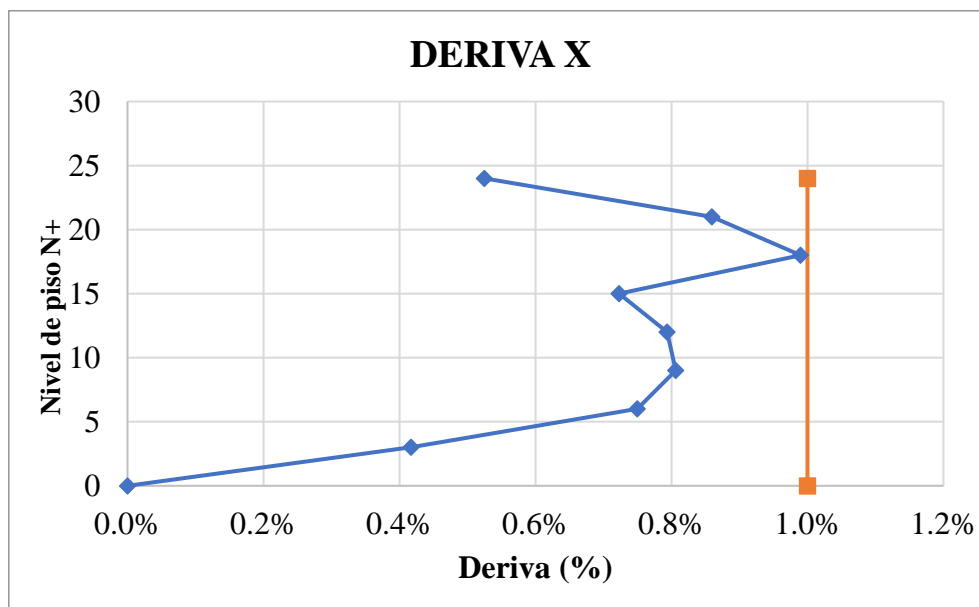
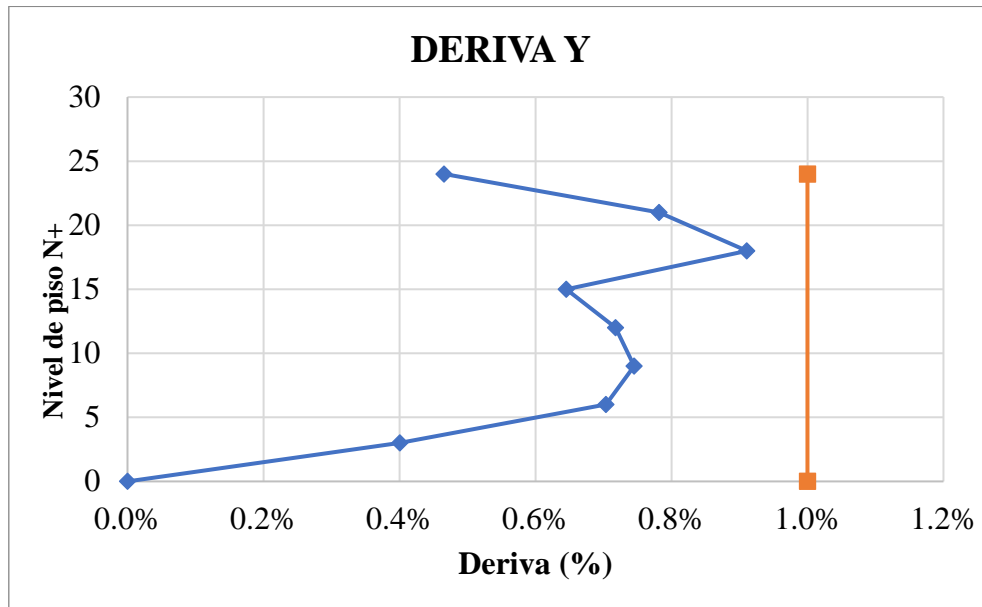


Ilustración 26 Deriva en Y.



8.3. Cálculo del coeficiente de disipación de energía para estructura sin disipadores

Se realizó el análisis de plastificación progresiva *PushOver*, se definieron las articulaciones plásticas con la ayuda de la herramienta de *ETABS* ubicándolas a un 5% de la distancia de los elementos estructurales tal como se puede apreciar en Ilustración 27 y la Ilustración 28.

Ilustración 27 Parámetros de definición de articulaciones para columnas.

Frame Hinge Assignment Data

Hinge Property	Relative Distance
Auto	0.95
Auto P-M2-M3	0.05
Auto P-M2-M3	0.95
Auto P-M2-M3	0.05
Auto P-M2-M3	0.95

Auto Hinge Type
 From Tables in ASCE 41-17

Select a Hinge Table
 Table 10-8 and 10-9 (Concrete Columns)

Degree of Freedom

M2 P-M2 Parametric P-M2-M3
 M3 P-M3
 M2-M3 P-M2-M3

P Values From

Case/Combo User Value
 Gravity: Vert Z
 Gravity + Lateral: PUSH X

Ilustración 28 Parámetros de definición de las articulaciones para vigas.

Frame Hinge Assignment Data

Hinge Property	Relative Distance
Auto	0.05
Auto M3	0.05
Auto M3	0.95

Auto Hinge Type
 From Tables in ASCE 41-17

Select a Hinge Table
 Table 10-7 (Concrete Beams - Flexure) Item i

Degree of Freedom

M2
 M3

V Value From

Case/Combo User Value
 Case/Combo: Vert Z
 User Value: V2 [] kN

Con base a los datos arrojados por el software computacional y siguiendo la metodología propuesta en el ATC-40 mencionada anteriormente en el capítulo 7.3 se obtiene el espectro de capacidad, el espectro de demanda, el amortiguamiento viscosos equivalente, el espectro de demanda amortiguado y la gráfica del espectro *ADRS* para los sentidos *X*, *Y* de la estructura, finalmente con los valores obtenidos y aplicando la metodología del ATC-19 se encuentra el coeficiente de disipación de energía para cada sentido de la estructura. Los valores del espectro de capacidad para los sentidos *X*, *Y* se consignan en la Ilustración 29 y la Ilustración 30 respectivamente, además, la Tabla 13 y la Tabla 14 muestra los valores para el cálculo del acelerograma amortiguado.

Ilustración 29 Espectro de capacidad Sentido X.

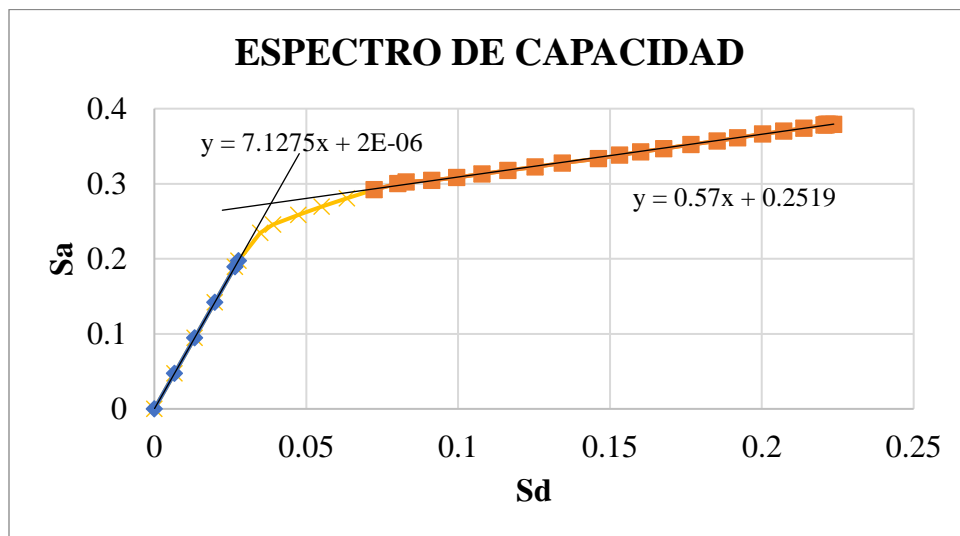


Tabla 13 Calculo de amortiguamiento viscoso equivalente Sentido X.

Sa_u	0.379
Sd_u	0.224
Sd_y	0.038
Sa_y	0.274
β₀	35.074
K	0.599
β_{eff}	26.024
SR_A	0.469
SR_V	0.590

Ilustración 30 Cortante Vs Desplazamiento-Sentido Y.

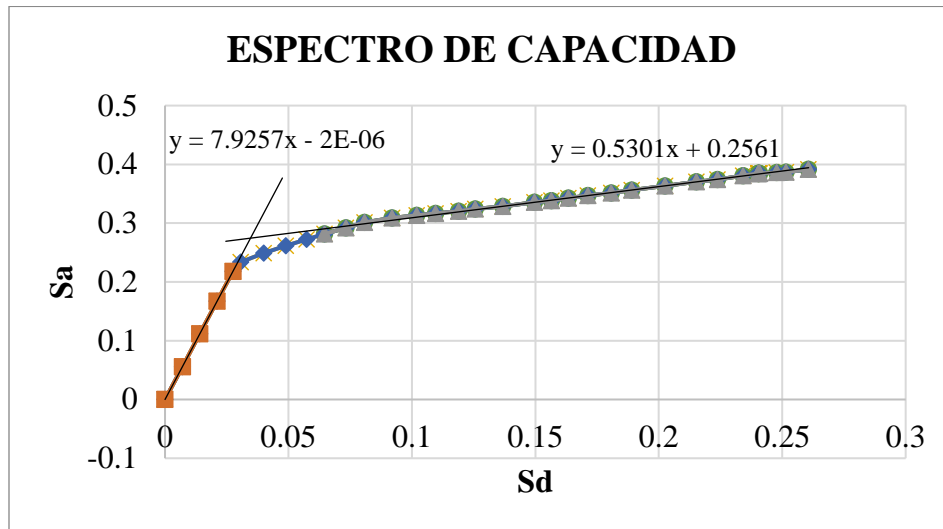


Tabla 14 Cálculo de amortiguamiento viscoso equivalente Sentido Y.

S_{au}	0.391
S_{du}	0.261
S_{dy}	0.031
S_{ay}	0.242
β_0	31.893
K	0.622
β_{eff}	24.828
SR_A	0.484
SR_V	0.602

Basado en los resultados obtenidos, se encuentra el punto fluencia, el punto donde se genera la primera rotula plástica para cada sentido con la ayuda de la Ilustración 33 y la Ilustración 34, además se ubica el punto de desempeño del cruce de los espectros graficado en la Ilustración 31 y la Ilustración 32; se utiliza la ecuación (16) para el cálculo de la ductilidad,

Ilustración 31 Espectro de capacidad y demanda-Sentido X.

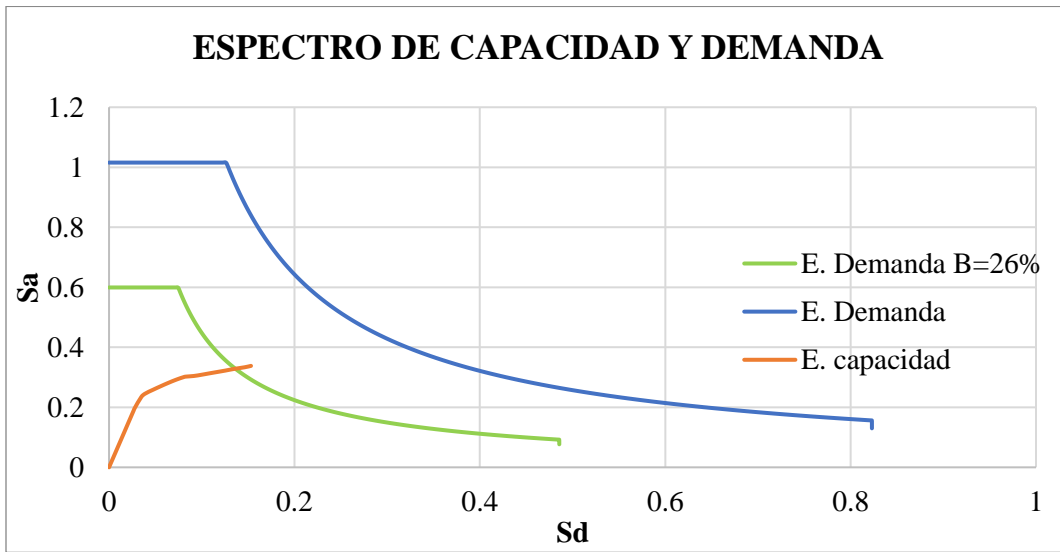


Ilustración 32 Espectro de capacidad y demanda-Sentido Y.

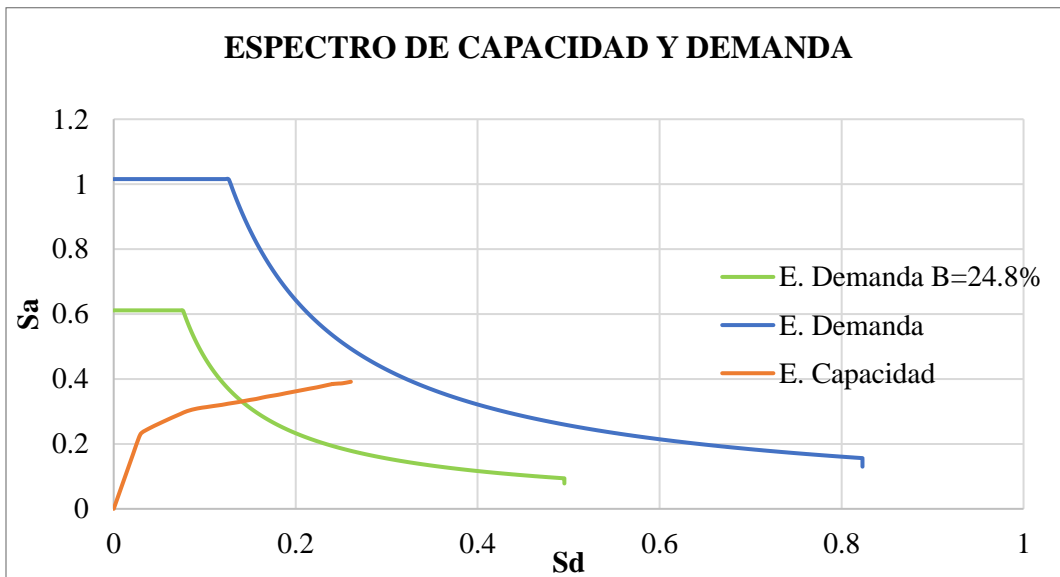


Ilustración 33 Cortante Vs Desplazamiento-Sentido X.

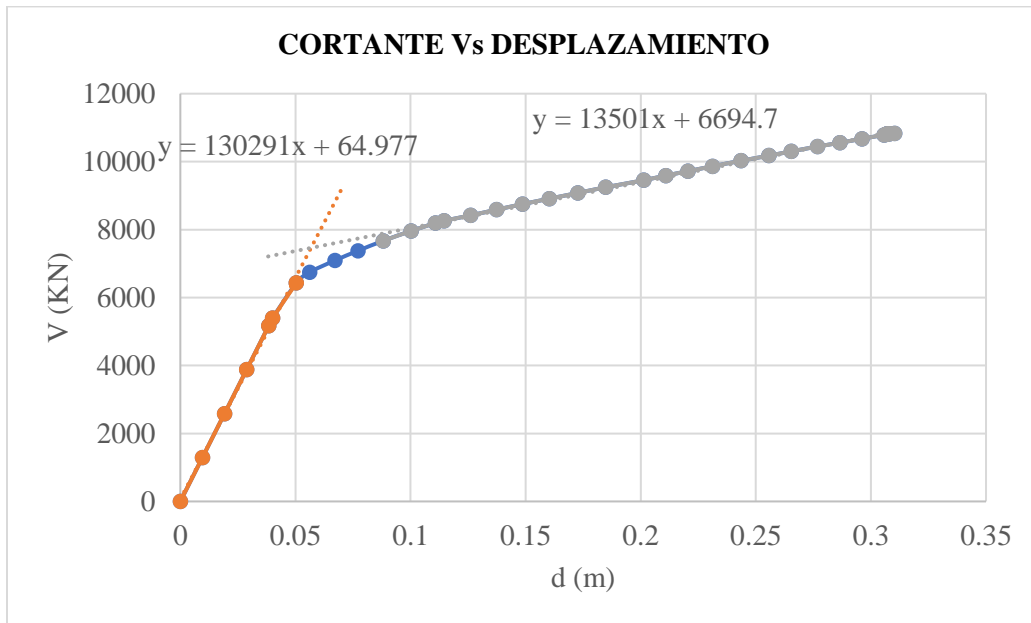
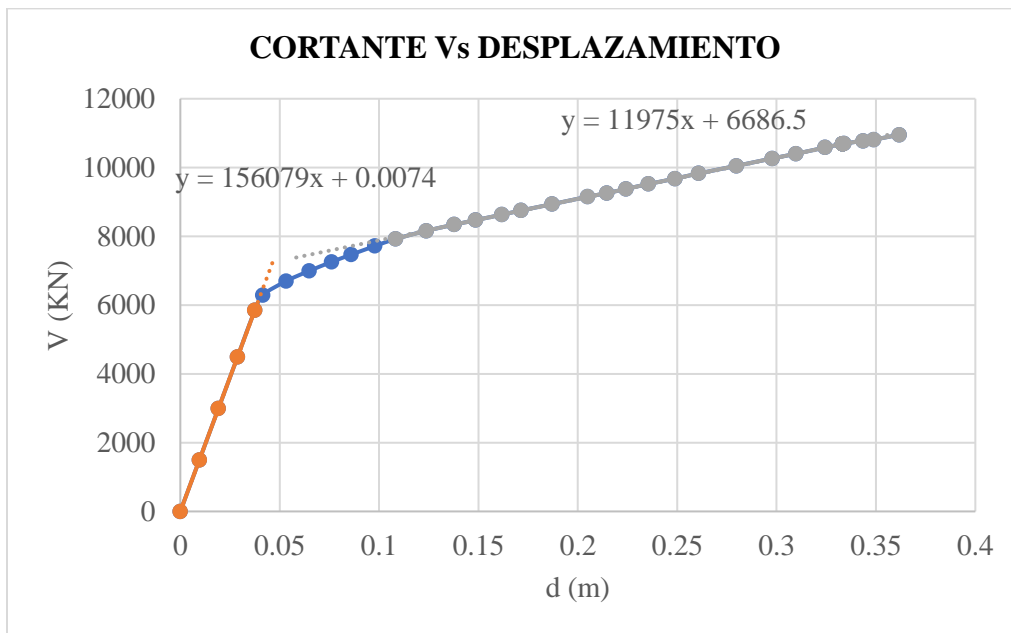


Ilustración 34 Cortante Vs Desplazamiento-Sentido Y.



Finalmente se calcula el $R\mu$, $R\Omega$ y Rr para calcular el coeficiente de disipación de energía como se indica en el capítulo 7.5.

Tabla 15 Calculo de R- Sentido X.

Desplazamiento	
Δ_y	0.0568
Δ_d	0.1145
Δ_E	0.1258
Cortante	
V_y	7461.10
V_d	8259.21
V_E	8415.04
Valores de R	
μ	2.216
R_μ	2.034
R_Ω	0.903
R_r	1
R	1.837

Tabla 16 Calculo de R-Sentido Y.

Desplazamiento	
Δ_y	0.0464
Δ_d	0.1083
Δ_E	0.1333
Cortante	
V_y	7242.15
V_d	7923.39
V_E	8281.87
Valores de R	
μ	2.873
R_μ	2.477
R_Ω	0.914
R_r	0.860
R	1.947

8.4. Selección de acelerogramas

Siguiendo la metodología del capítulo 18 del ASCE 7-16 fue necesario definir 7 pares de acelerogramas para el diseño y revisión de estructuras con sistemas de disipación, a continuación, la Tabla 17 muestra los acelerogramas utilizados, por cada uno de los sismos registrados, se tomó su componente este-oeste (EW) y la componente norte-sur (NS). Además, fue necesario definir el sismo máximo considerado MCE_R consignado en la Ilustración 35 Espectro MCER., el cual se tomó como $1.5*DE$, es decir $1.5*$ (el espectro de diseño de la NSR-10 para Cali con la importancia $I=1.25$).

Ilustración 35 Espectro MCE_R .

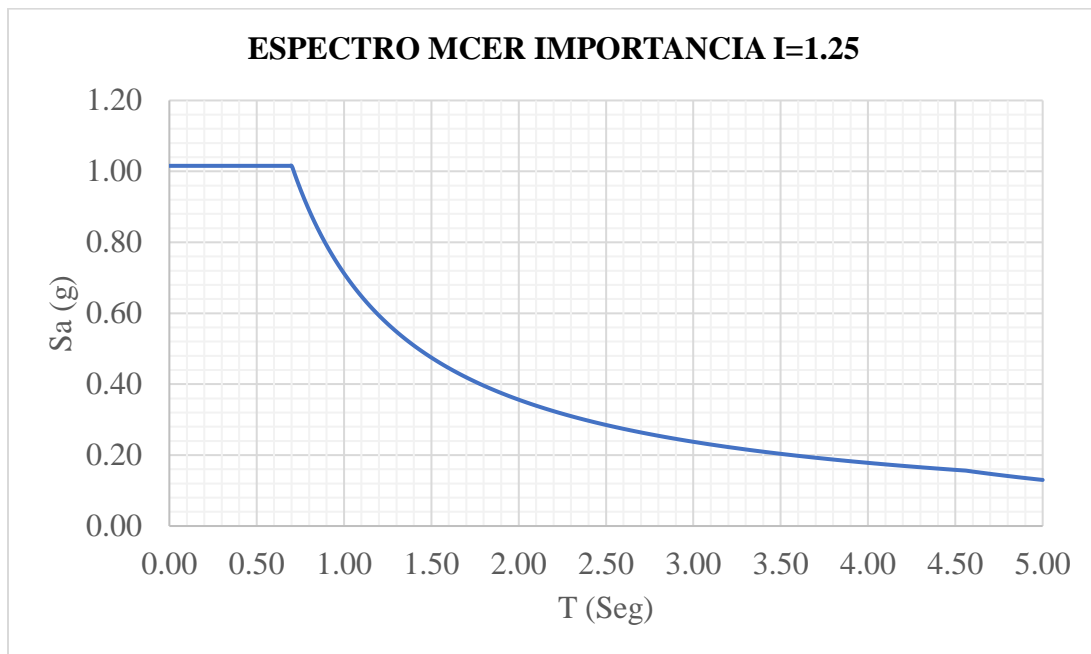


Tabla 17 Acelerogramas.

Acelerograma	Año	Magnitud
Boyacá	19-enero-1995	6.6
Valle	8-febrero-1995	6.6
Caldas	19-agosto-1995	6.5
Cauca	30-septiembre-2012	6.4
Nariño	9-febrero-2013	6.4
Quindío 1	2-septiembre-1997	6.8
Quindío 2	11-diciembre-1997	6.5

Después de seleccionar los acelerogramas se pasaron por el programa *Seismo Match* utilizando como espectro de diseño objetivo el MCE_R , se verifica que se realice la convergencia de todos los acelerogramas, lo cual indica que se logró hacer le match exitosamente, por último, se extraen los acelerogramas macheados que serán utilizados, estos se pueden apreciar de la Ilustración 36 a la Ilustración 39, donde se separan según la componente utilizada NS y EW.

Ilustración 36 Acelerogramas Matcheados-Sentido EW.

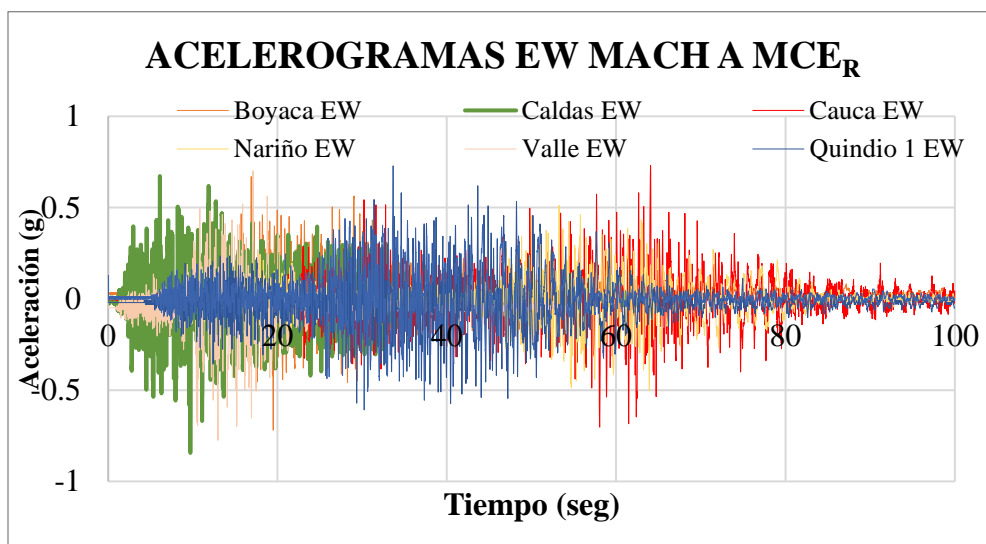


Ilustración 37 Acelerogramas Matcheados-Sentido NS

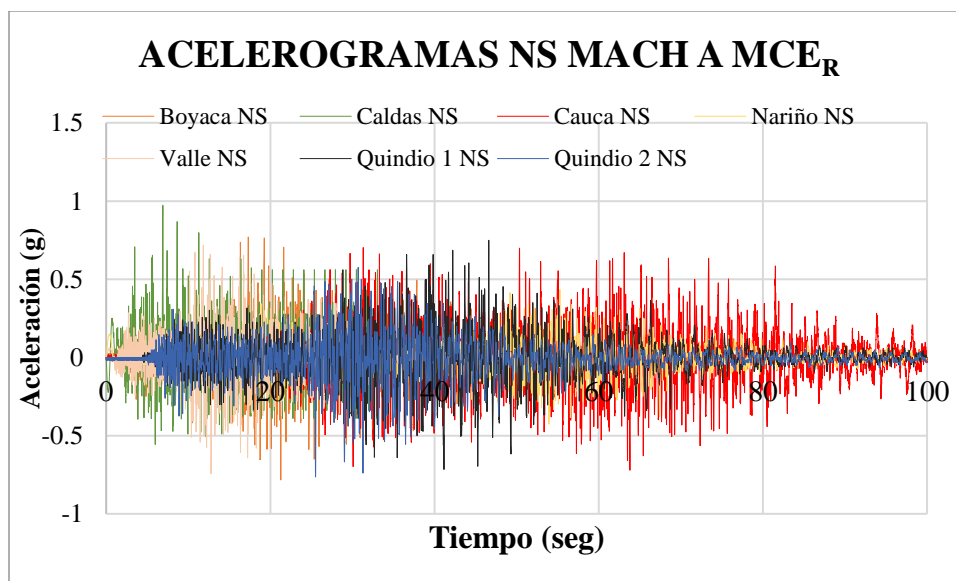


Ilustración 38 Acelerogramas Matcheados EW.

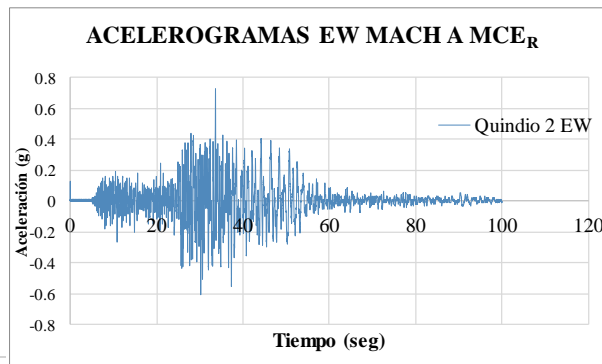
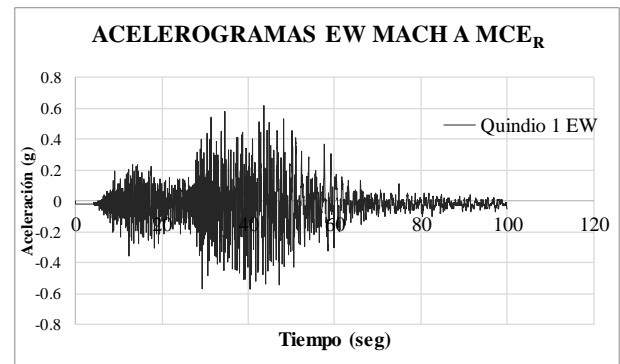
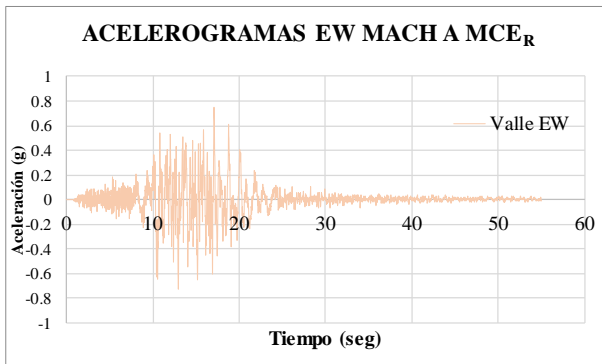
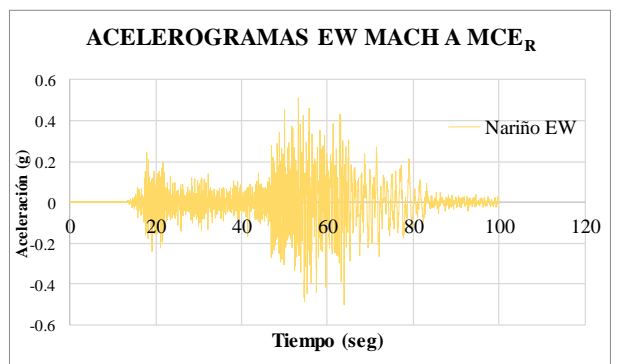
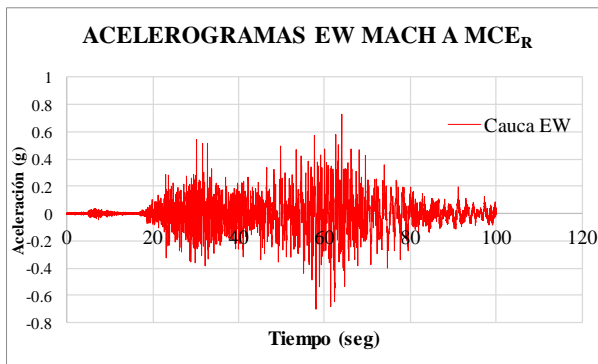
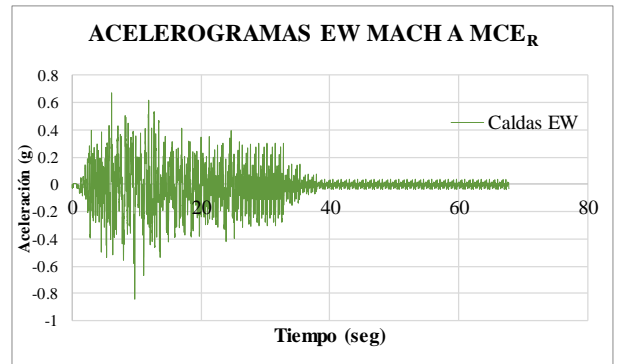
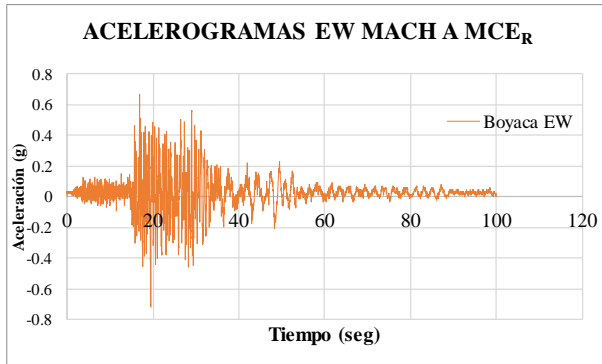
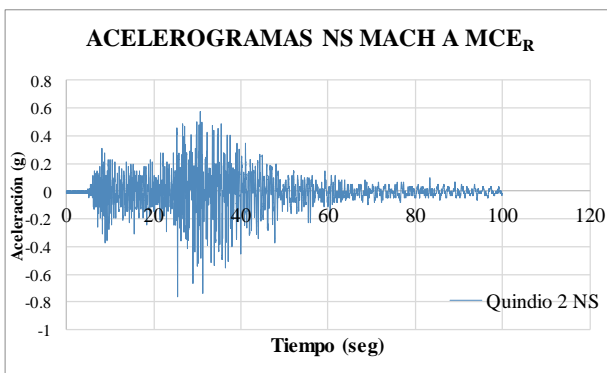
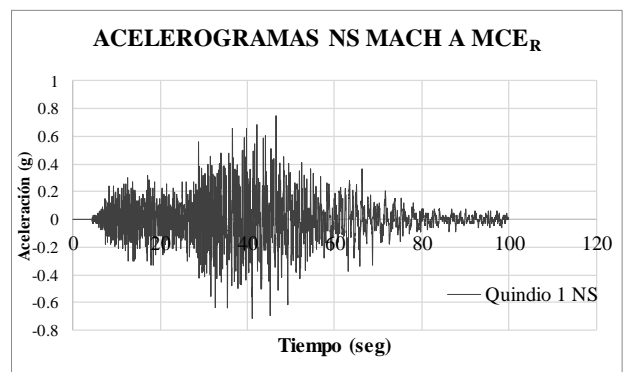
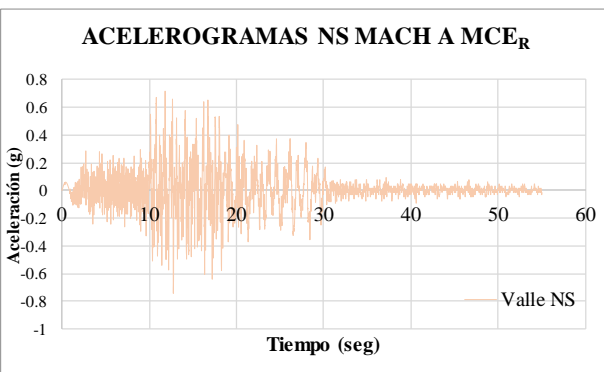
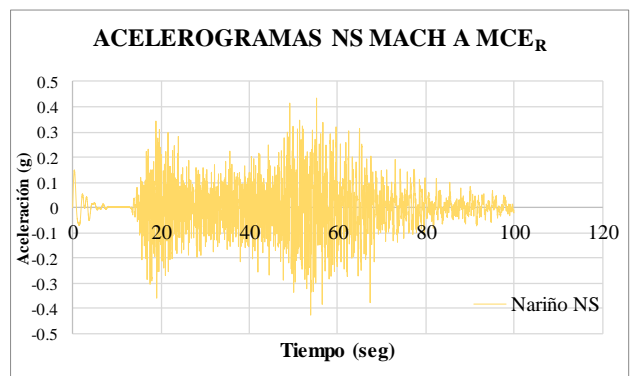
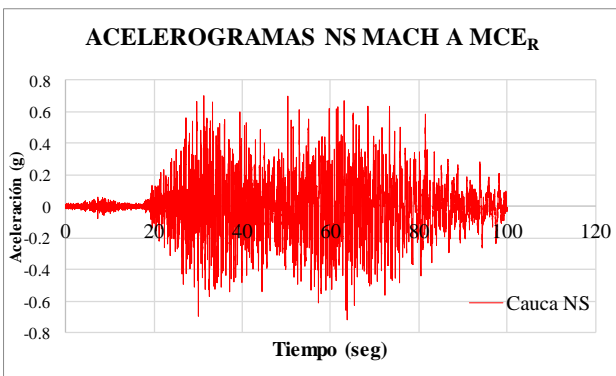
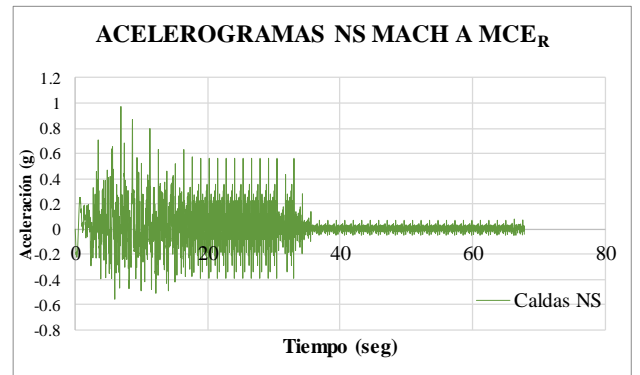
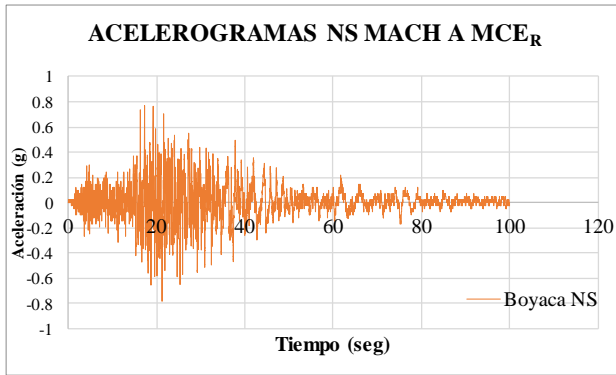


Ilustración 39 Acelerogramas Matcheados NS.



8.5. Definición del sistema de disipación

Se definieron los disipadores de fluido viscosos según la metodología propuesta por Taylor explicada en el apartado 7.4 se toma $\alpha = 0.3$, se utiliza elemento metálico H300B como riostra en la cual se colocará el disipador, la Tabla 18 muestra las características del elemento. Se calcula la rigidez de cada piso con la ayuda del software de diseño, con los valores obtenidos, se estima un valor de amortiguamiento C , resultados consignados de la Tabla 19 a la Tabla 24, el cual se ajustará según los resultados obtenidos del disipador viscoso en la estructura. Finalmente se plantea colocar dos disipadores en cada sentido y por cada piso de la estructura como se muestra de la Ilustración 44 a la Ilustración 46.

Tabla 18 Parámetros de la riostra H300B

Elemento diagonal		HE300B
E	2000000000	kN/m ²
A	0.0149	m ²
L	8.54	m
K=E*A/L	348946.13	KN/m

Tabla 19 Calculo de C según Taylor-sentido X.

Piso	K (kN/m)	Angulo	n	C (KN*seg/m)
N+24.0	183979.31	20.56	2	9886.58
N+21.0	211056.66	20.56	2	11341.65
N+18.0	211713.07	20.56	2	11376.92
N+15.0	239417.54	20.56	2	12865.69
N+12.0	254222.93	20.56	2	13661.30
N+9.0	275741.64	20.56	2	14817.66
N+6.0	334915.94	20.56	2	17997.54
N+3.0	694524.74	20.56	2	37322.00

Tabla 20 Calculo de Fuerza máxima del dissipador- Sentido X.

Piso	C	d	V	F KN
N+24.0	9886.58	0.0056	0.0298	3446.40
N+21.0	11341.65	0.0056	0.0298	3953.62
N+18.0	11376.92	0.0056	0.0298	3965.92
N+15.0	12865.69	0.0056	0.0298	4484.89
N+12.0	13661.30	0.0056	0.0298	4762.24
N+9.0	14817.66	0.0056	0.0298	5165.34
N+6.0	17997.54	0.0056	0.0298	6273.82
N+3.0	37322.00	0.0056	0.0298	13010.20

Tabla 21 Parámetros del dissipador por piso- Sentido X.

Parámetros por piso		
C	K	α
9886.58	348946.14	0.3
11341.65	348946.14	0.3
11376.92	348946.14	0.3
12865.69	348946.14	0.3
13661.30	348946.14	0.3
14817.66	348946.14	0.3
17997.54	348946.14	0.3
37322.00	348946.14	0.3

Tabla 22 Calculo de C según Taylor-sentido Y.

Piso	K (kN/m)	Angulo	n	C (KN*seg/m)
N+24.0	208825.48	20.56	2	10747.86
N+21.0	236100.98	20.56	2	12151.68
N+18.0	235832.70	20.56	2	12137.87
N+15.0	268838.11	20.56	2	13836.60
N+12.0	283682.65	20.56	2	14600.62
N+9.0	304869.52	20.56	2	15691.07
N+6.0	365273.45	20.56	2	18799.95
N+3.0	742743.60	20.56	2	38227.64

Tabla 23 Calculo de Fuerza máxima del disipador- Sentido Y.

Piso	C	d	V	F KN
N+24.0	10747.86	0.0562	0.311	7572.91
N+21.0	12151.68	0.0562	0.311	8562.03
N+18.0	12137.87	0.0562	0.311	8552.31
N+15.0	13836.60	0.0562	0.311	9749.22
N+12.0	14600.62	0.0562	0.311	10287.55
N+9.0	15691.07	0.0562	0.311	11055.88
N+6.0	18799.95	0.0562	0.311	13246.38
N+3.0	38227.64	0.0562	0.311	26935.07

Tabla 24 Parámetros del disipador por piso- Sentido Y.

Parámetros por piso		
C	K	α
10747.86	348946.14	0.3
12151.68	348946.14	0.3
12137.87	348946.14	0.3
13836.60	348946.14	0.3
14600.62	348946.14	0.3
15691.07	348946.14	0.3
18799.95	348946.14	0.3
38227.64	348946.14	0.3

Con base a los resultados obtenidos después de revisar la estructura con diferentes valores de C y según el comportamiento obtenido de la estructura, las derivas máximas y las curvas histeréticas de los disipadores, se define un valor de amortiguamiento C para los primeros cinco pisos de la estructura en las dos direcciones principales (X,Y) y otro valor para los últimos tres pisos como se muestra de la Ilustración 40 a la Ilustración 43.

Para modelar los disipadores en el software computacional ETABS, se utilizó la herramienta *Link*, la cual permite agregar links como disipadores de fluido viscoso en el rango No lineal, definiendo los parámetros requeridos. A continuación, se muestra la

definición de los disipadores y la disposición de los mismo en la estructura. Se define el *Link* como *Damper-Exponential*.

K = rigidez del elemnto tipo riostra.

C = constante de amortiguamiento del disipador.

α = exponente de velocidad.

Ilustración 40 Parámetros de disipadores sentido X piso 1-5.

Identification	
Property Name	DFV X1
Direction	U1
Type	Damper - Exponential
NonLinear	Yes
Linear Properties	
Effective Stiffness	0 kN/m
Effective Damping	0 kN-s/m
Nonlinear Properties	
Stiffness	248243 kN/m
Damping	3000 $kN*(s/m)^{Cexp}$
Damping Exponent	0.3

Ilustración 41 Parámetros de disipadores sentido X Piso 6-8.

Identification	
Property Name	DFV X2
Direction	U1
Type	Damper - Exponential
NonLinear	Yes
Linear Properties	
Effective Stiffness	0 kN/m
Effective Damping	0 kN-s/m
Nonlinear Properties	
Stiffness	248243 kN/m
Damping	900 $kN*(s/m)^{Cexp}$
Damping Exponent	0.3

Ilustración 42 Parámetros de disipadores sentido Y piso 1-5.

Identification	
Property Name	DFV Y1
Direction	U1
Type	Damper - Exponential
NonLinear	Yes

Linear Properties	
Effective Stiffness	0 kN/m
Effective Damping	0 kN-s/m

Nonlinear Properties	
Stiffness	248243 kN/m
Damping	3000 $\text{kN} \cdot (\text{s/m})^{\text{Cexp}}$
Damping Exponent	0.3

Ilustración 43 Parámetros de disipadores sentido Y Piso 6-8.

Identification	
Property Name	DFV Y2
Direction	U1
Type	Damper - Exponential
NonLinear	Yes

Linear Properties	
Effective Stiffness	0 kN/m
Effective Damping	0 kN-s/m

Nonlinear Properties	
Stiffness	248243 kN/m
Damping	900 $\text{kN} \cdot (\text{s/m})^{\text{Cexp}}$
Damping Exponent	0.3

A continuación, en la Ilustración 44 a la Ilustración 46, se muestra en cada sentido la ubicación de los disipadores y el tipo de disipador agregado para cada piso, según los disipadores definidos de la Ilustración 40 a la Ilustración 43.

Ilustración 44 Modelo 3D con disipadores.

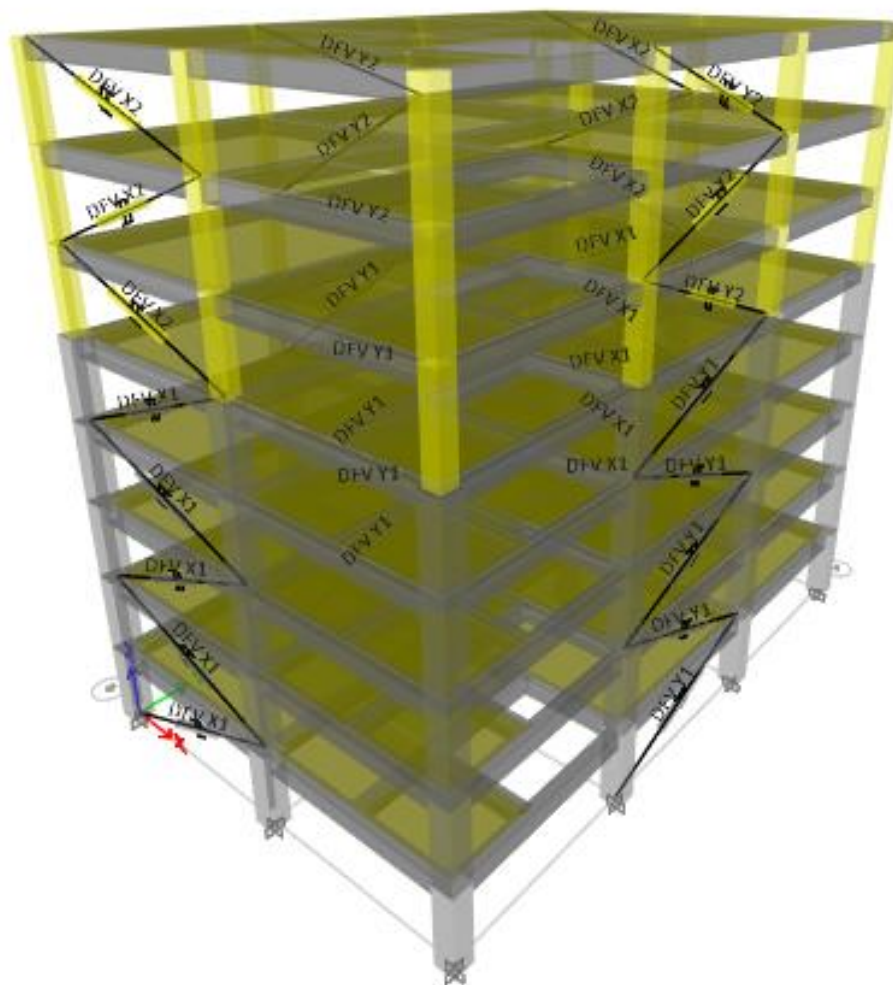


Ilustración 45 Disipadores sentido X.

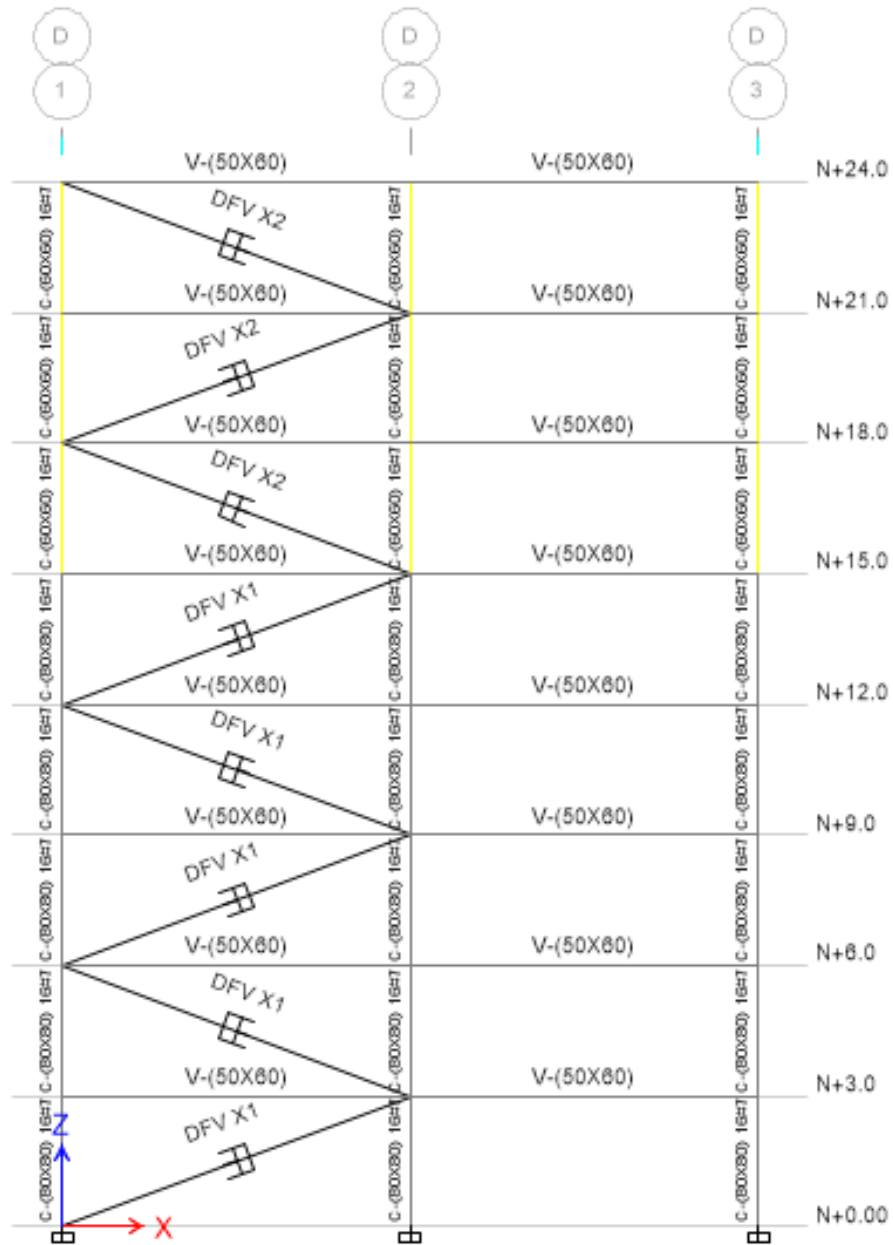
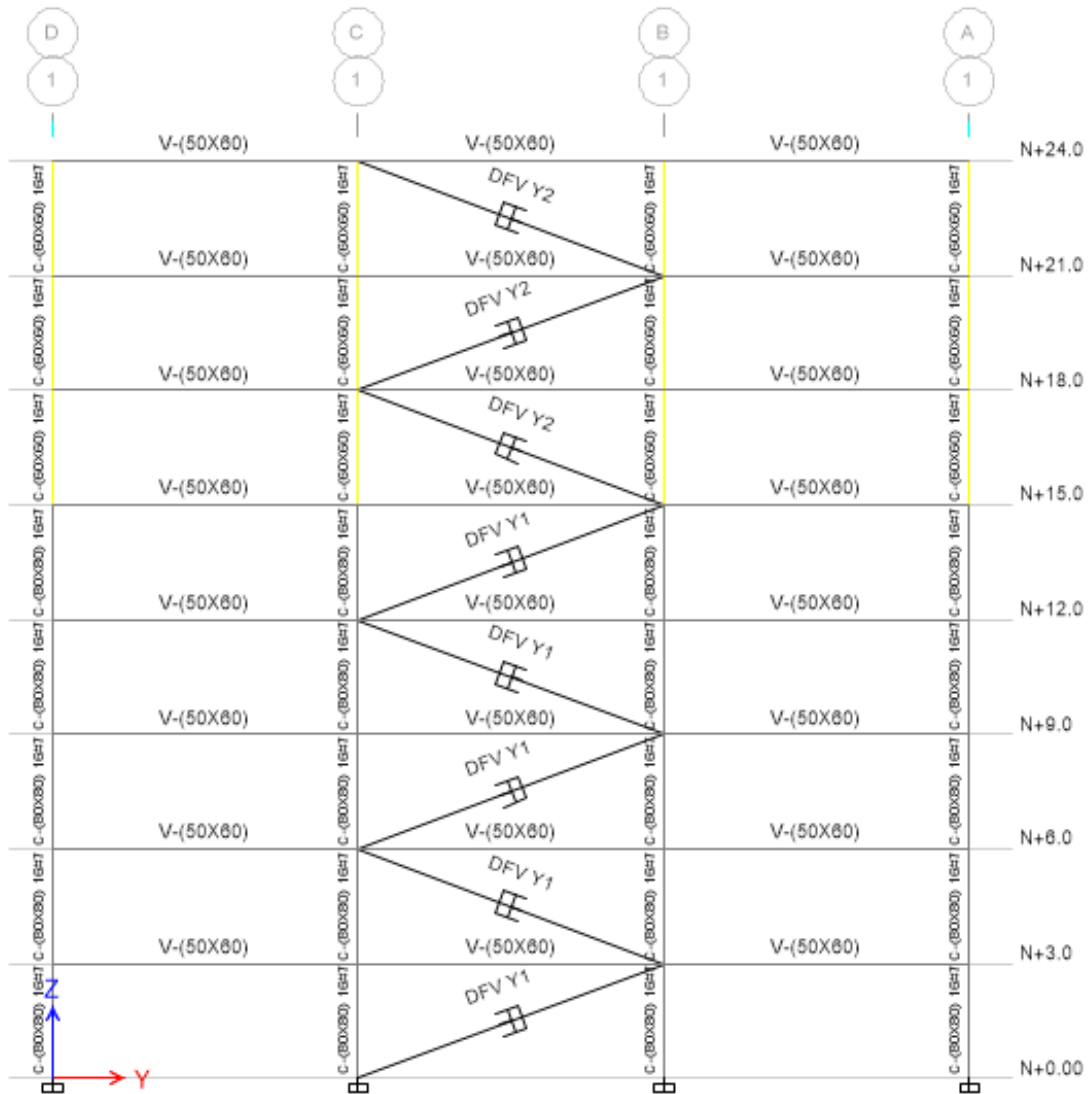


Ilustración 46 Disipadores sentido Y.



Debido a que se utilizaron los disipadores, se realizó una reducción de las secciones de los elementos estructurales como se aprecia en la Tabla 25 , teniendo en cuenta el chequeo de la ASCE 7-16 donde la estructura reducida sin los disipadores debe resistir al menos el 75% de la fuerza sísmica de diseño, que para este caso sería el 75% del espectro de la NSR-10. A continuación se presentan las secciones utilizadas para la reducción.

Tabla 25 Secciones modelo reducido.

Estructuras 6 pisos			
Pisos	Columnas	Refuerzo	Vigas
1 a 3	65X65	16#8	50X60
4 a 6	65X65	16#6	50X50
Estructuras 8 pisos			
Pisos	Columnas	Refuerzo	Vigas
1 a 5	80x80	16#7	50X60
6 a 8	60x60	16#6	50X60

A continuación, se grafica la deriva máxima obtenida para el edificio al implementar los disipadores de fluido viscoso, se verifico la deriva para cada uno de los acelerogramas y la combinación realizada para sus respectivas direcciones. La Tabla 26 consigna las derivas obtenidas y se grafican en la Ilustración 47 y la Ilustración 48 para los sentidos X,Y respectivamente.

Ilustración 47 Deriva X

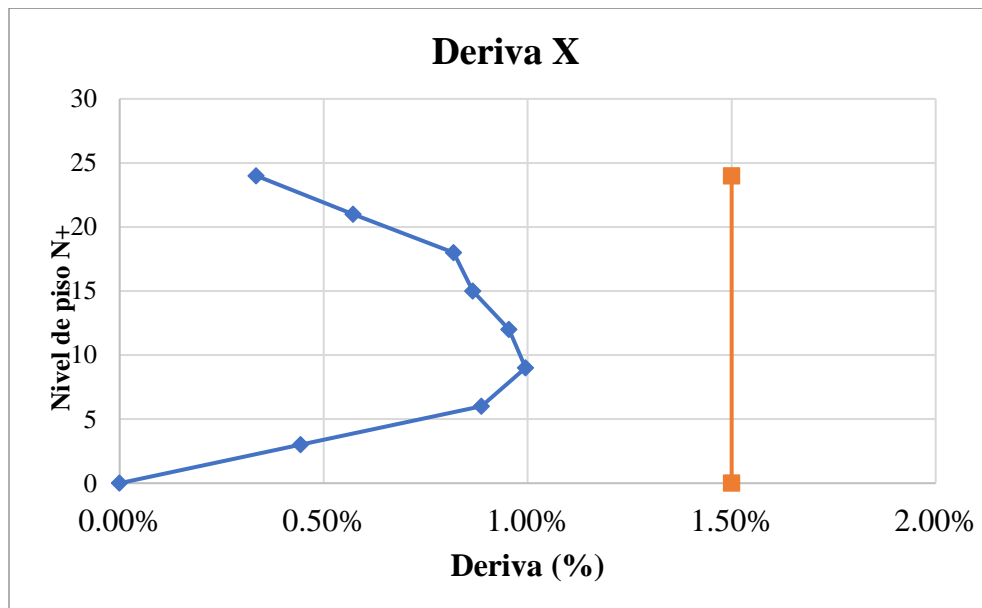


Ilustración 48 Deriva Y

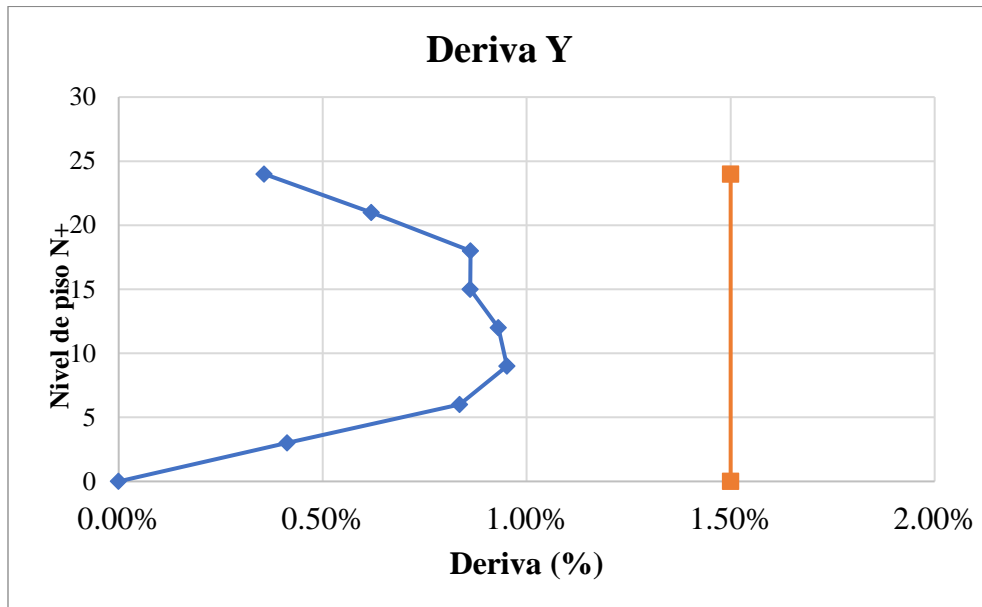


Tabla 26 Derivas por acelerogramas.

Deriva en (%)		E1	
Acelerograma	U1X-U2Y	DX	DY
Boyacá 1.1	EW- NS	0.87	0.66
Boyacá 1.2	NS- EW	0.69	0.85
Caldas 1.1	EW- NS	0.83	0.87
Caldas 1.2	NS- EW	0.96	0.76
Cauca 1.1	EW- NS	0.93	0.78
Cauca 1.2	NS- EW	0.82	0.90
Nariño 1.1	EW- NS	0.62	0.40
Nariño 1.2	NS- EW	0.40	0.55
Valle 1.1	EW- NS	1.00	0.36
Valle 1.2	NS- EW	0.39	0.93
Quin 1.1	EW- NS	0.98	0.81
Quin 1.2	NS- EW	0.85	0.95
Quindio 1.1	EW- NS	0.99	0.46
Quindio 1.2	NS- EW	0.46	0.91

A continuación, la Ilustración 49 y la Ilustración 50 muestran curvas des histéresis de los disipadores de fluido viscoso en cada uno de los sentidos de la estructura. La Tabla 27 y la Tabla 28 consignan todos los disipadores de la estructura en cada sentido y por cada eje donde se asignaron disipadores.

Tabla 27 Disipadores sentido X

Disipadores sentido X		
	Eje A	Eje D
Piso 1	K17	K25
Piso 2	K18	K26
Piso 3	K19	K27
Piso 4	K20	K28
Piso 5	K21	K29
Piso 6	K22	K30
Piso 7	K23	K31
Piso 8	K24	K32

Tabla 28 Disipadores sentido Y.

Disipadores sentido Y		
	Eje 1	Eje 3
Piso 1	K1	K9
Piso 2	K2	K10
Piso 3	K3	K11
Piso 4	K4	K12
Piso 5	K5	K13
Piso 6	K6	K14
Piso 7	K7	K15
Piso 8	K8	K16

Ilustración 49 Curva histeretica sentido X.

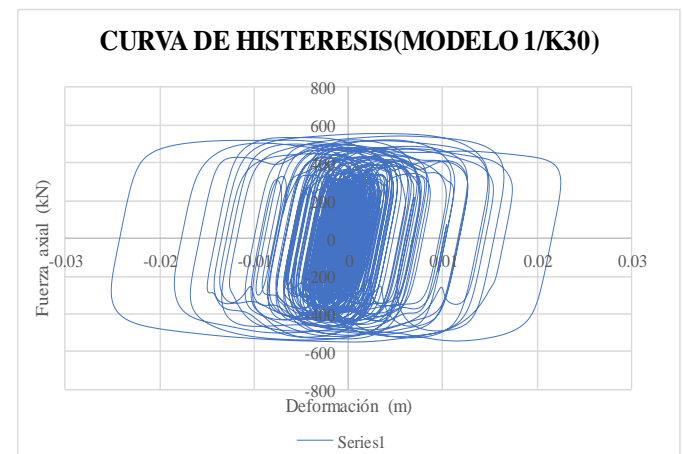
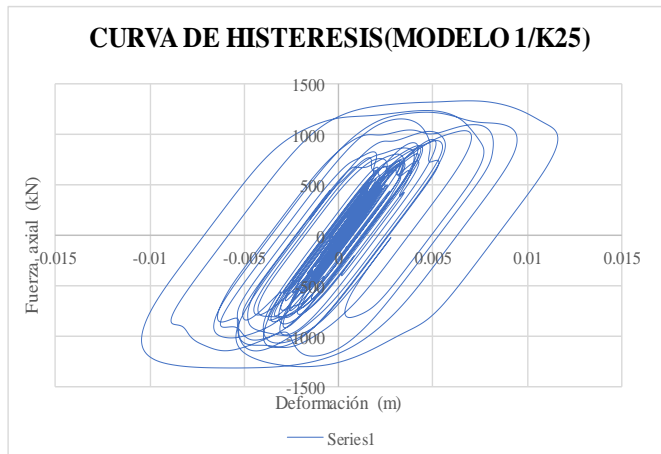
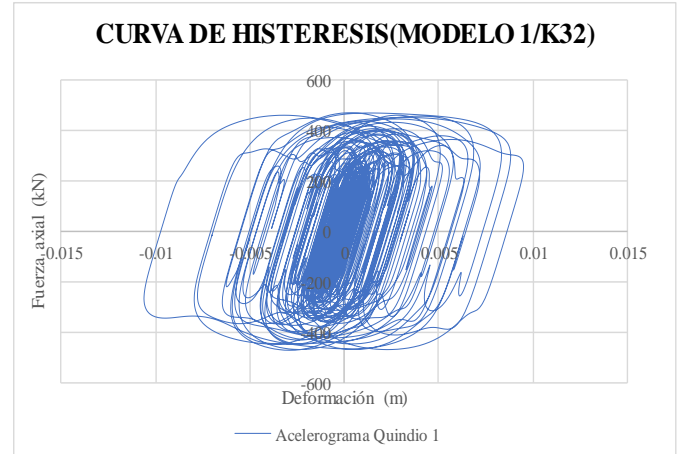
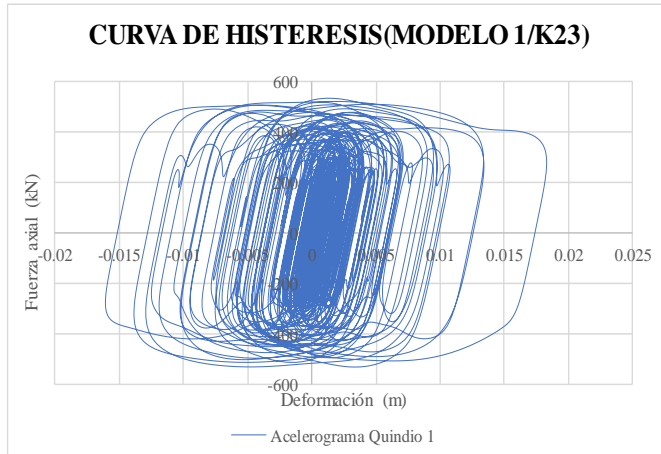
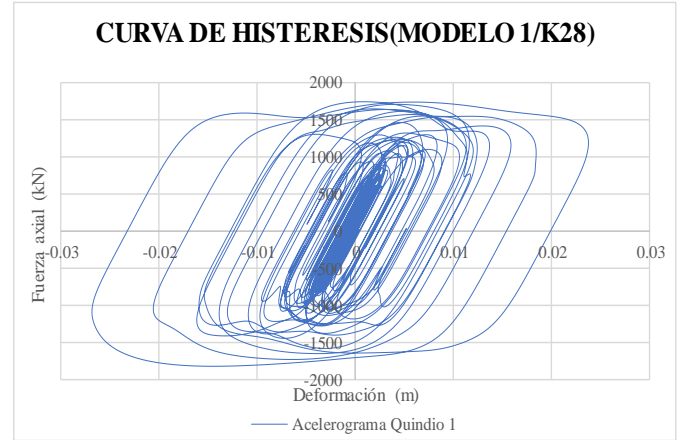
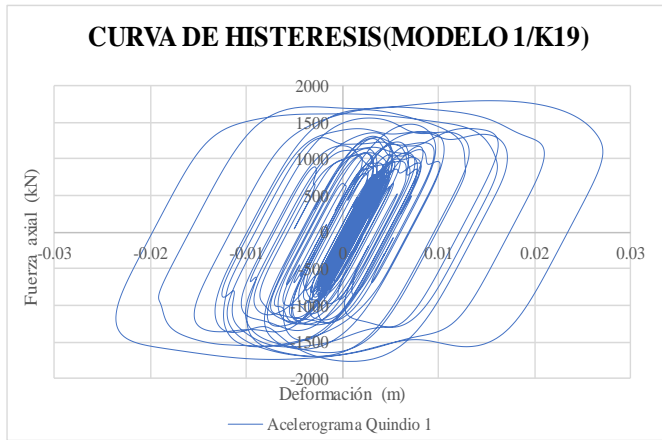
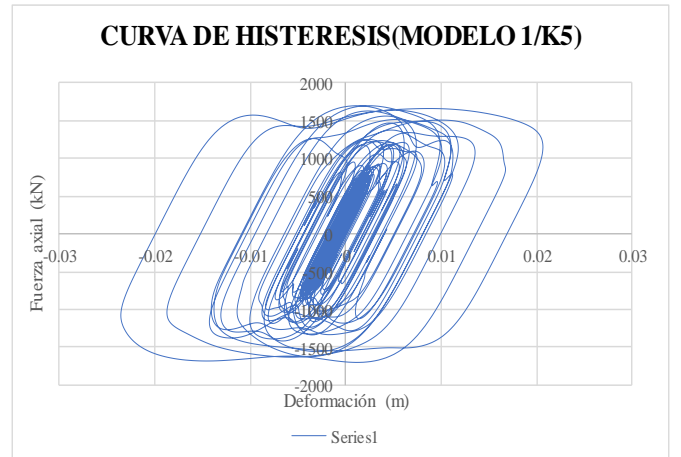
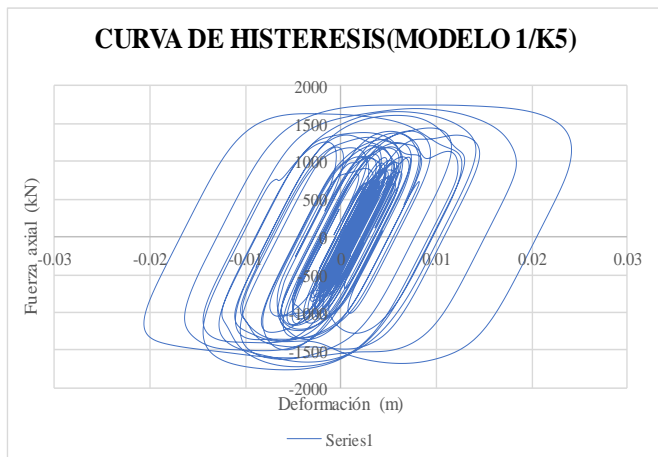
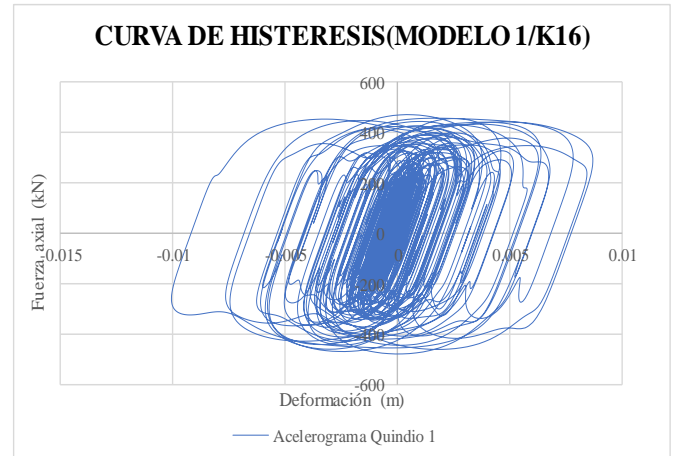
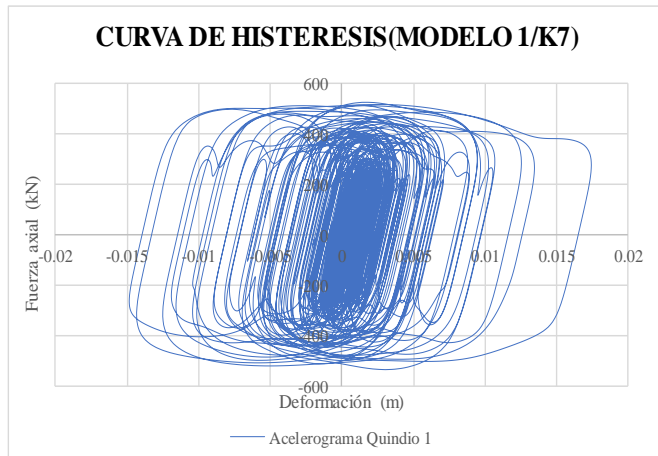
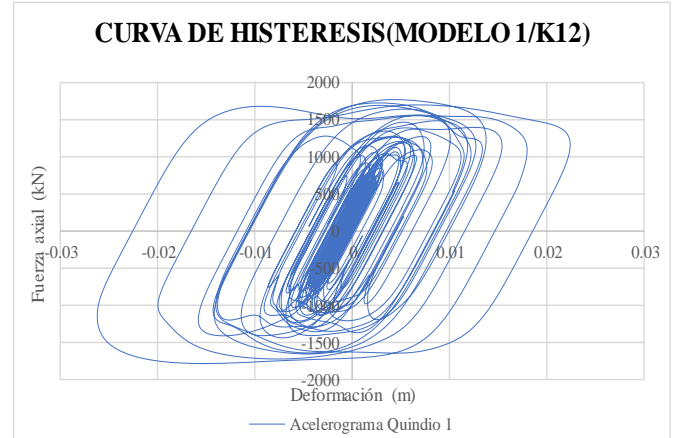
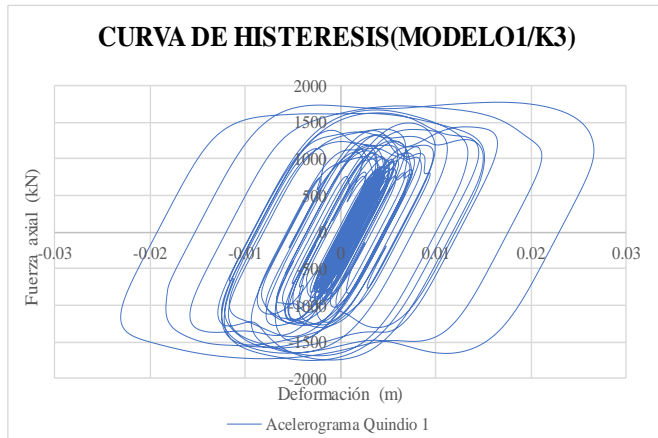


Ilustración 50 Curva histeretica sentido Y.



8.6. Cálculo del coeficiente de disipación de energía para estructura con disipadores.

Se realizó el análisis de plastificación progresiva *PushOver*, se definieron las articulaciones plásticas con la ayuda de la herramienta de ETABS de igual forma que se hizo en el apartado 8.3.

Con base a los datos arrojados por el software computacional y siguiendo la metodología propuesta en el ATC-40 mencionada anteriormente en el capítulo 7.4 se obtiene el espectro de capacidad y el espectro de demanda como espectros ADRS como graficados en la Ilustración 51 y la Ilustración 52.

Finalmente, con los valores obtenidos y aplicando la metodología del ATC-19 y el ingeniero Abdi mencionados en el capítulo 7.5, se encuentra el coeficiente de disipación de energía para cada sentido de la estructura.

Ilustración 51 Espectro de capacidad y demanda-Sentido X.

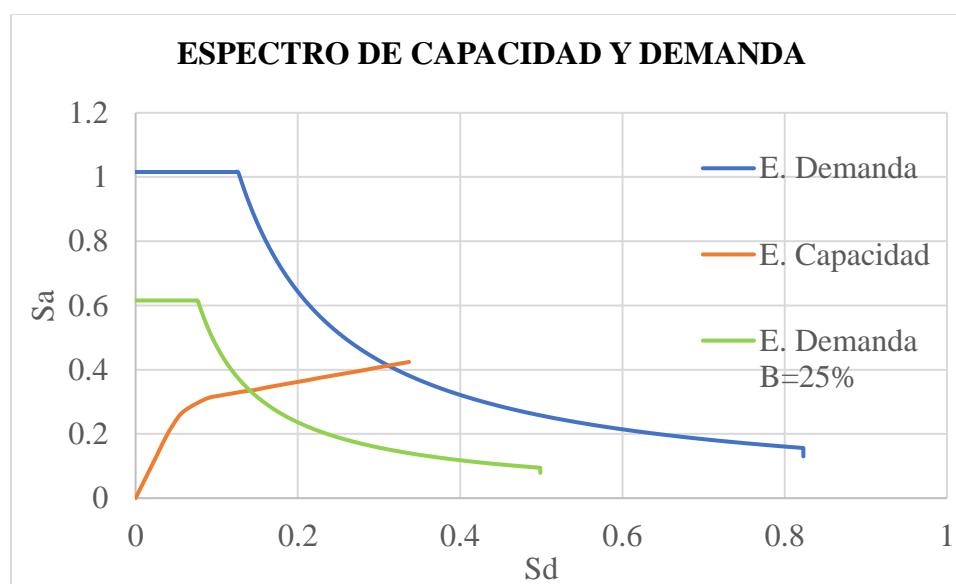


Ilustración 52 Espectro de capacidad y demanda-Sentido Y.

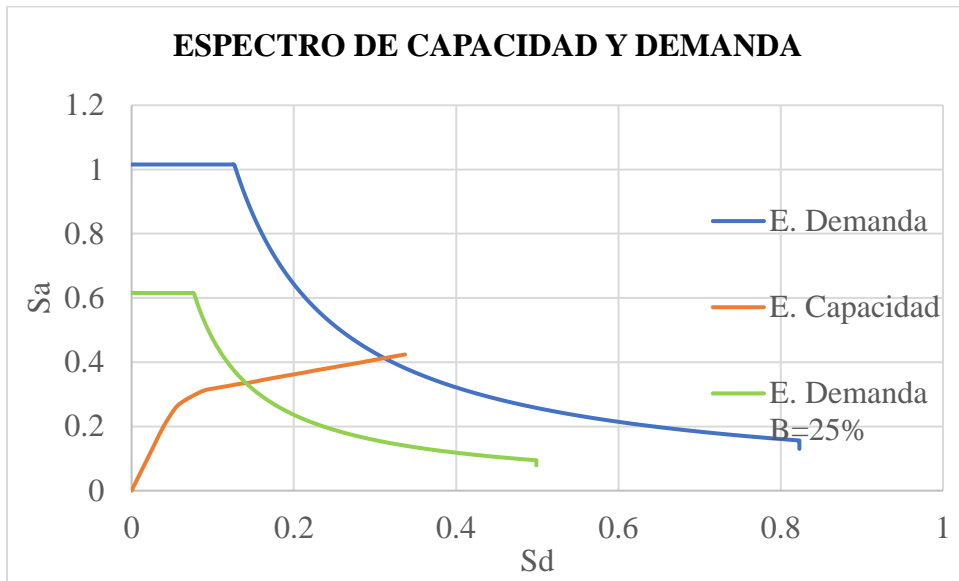


Ilustración 53 Cortante Vs Desplazamiento-Sentido X.

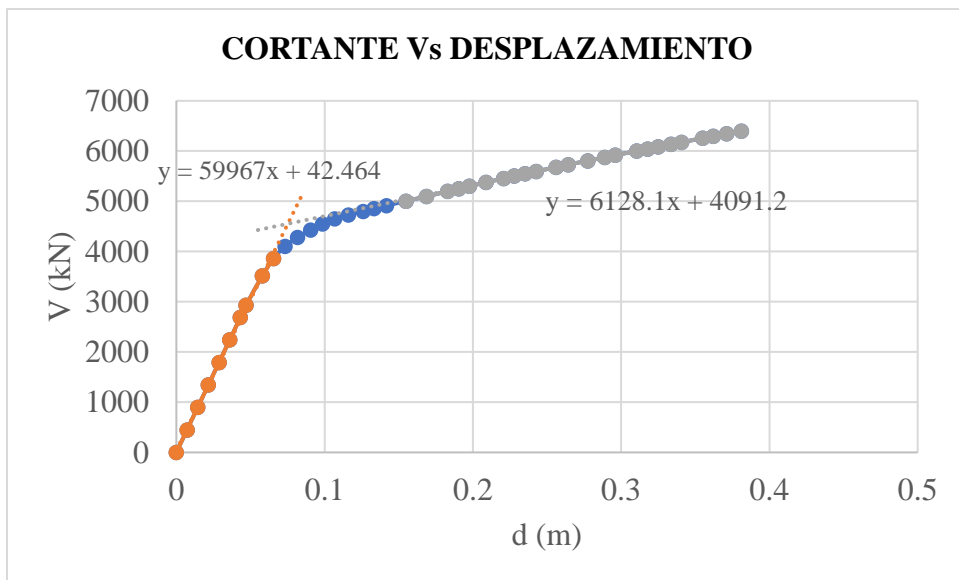
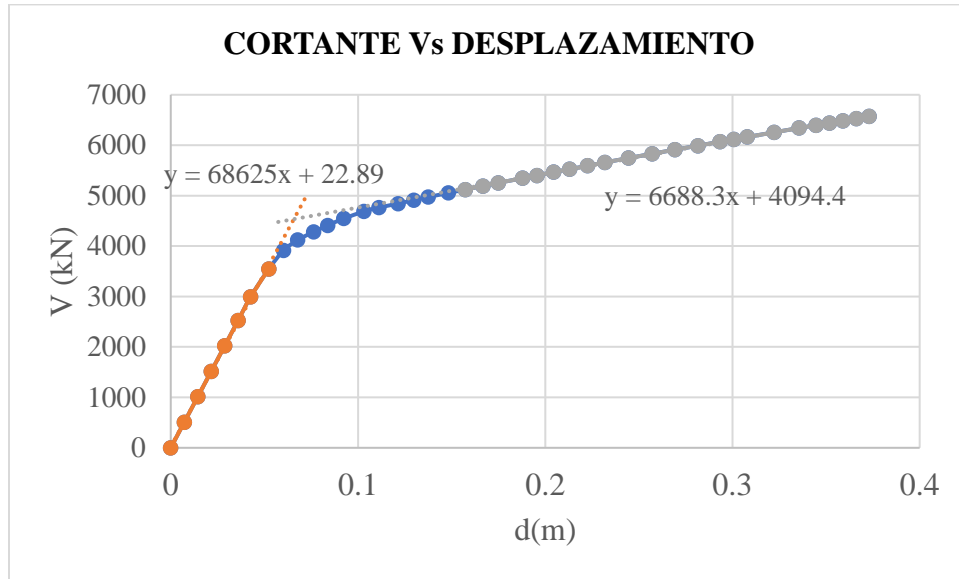


Ilustración 54 Cortante Vs Desplazamiento-Sentido Y.



Basado en los resultados obtenidos, se encuentra el punto fluencia, el punto donde se genera la primera rotula plástica con la ayuda de la gráfica cortante Vs desplazamiento de la Ilustración 53 y la Ilustración 54, además, se ubica el punto de desempeño con la Ilustración 51 y la Ilustración 52; se utiliza la ecuación 16 para el cálculo de la ductilidad, finalmente se calcula el $R\mu$, $R\Omega$ y R_r para calcular el coeficiente de disipación de energía. Los resultados de estos valores se consignan en la Tabla 29 y la Tabla 30.

Tabla 29 Calculo de R- Sentido X.

Desplazamiento	
Δ_y	0.0752
Δ_d	0.0360
Δ_E	0.1105
Cortante	
V_y	4552.04
V_d	2241.04
V_E	4681.45
Valores de R	
μ	1.469
R_μ	1.459
R_Ω	2.031
R_r	1
R	2.965

Tabla 30 Calculo de R- Sentido Y.

Desplazamiento	
Δ_y	0.0657
Δ_d	0.0360
Δ_E	0.1038
Cortante	
V_y	4534.1
V_d	2525.8
V_E	4690.9
Valores de R	
μ	1.579
R_μ	1.555
R_Ω	1.795
R_r	0.86
R	2.400

El procedimiento antes descrito paso a paso realizado con el modelo 1 -E1 se realizó igualmente para todos los demás modelos. A continuación, resumiremos algunos de los resultados obtenidos para los modelos.

9. RESULTADOS ESPERADOS

Con este trabajo de grado se pretende como objetivo principal, encontrar el coeficiente de disipación de energía para estructuras de concreto reforzado con disipadores de fluido viscoso y compararlo con el coeficiente de una estructura sin disipadores viscosos, por lo cual todo el procedimiento mostrado en el apartado 8, se realizó para las 6 estructuras ya mencionadas y se consigna en la Tabla 31 y la Tabla 32 los resultados del coeficiente de disipación de energía obtenido para cada edificio con y sin disipadores, además de las derivas obtenidas del diseño convencional, la estructura ya reducida pero sin los disipadores y la estructura con los disipadores sometida a los acelerogramas de diseño.

Tabla 31 Resultados para estructuras sin disipadores.

Modelo	#Pisos	Altura	Modelo sin Disipadores				
			Deriva X	Deriva Y	Rx	Ry	
1 E1	8	24	0.99	0.91	1.84	1.95	
2-E3	8	24	1.05	0.99	2.52	1.73	
3-E4	8	24	0.83	0.69	2.45	2.50	
					Promedio	2.268	2.059
4-E6	6	18	1.02	0.99	2.03	1.60	
5-E8	6	18	0.86	0.94	2.48	1.95	
6-E9	6	18	1.08	0.999	1.97	2.79	
					Promedio	2.16	2.11

Tabla 32 Resultados para estructuras con disipadores.

Modelo	Modelo reducido		Modelo con disipadores				
	Deriva X	Deriva Y	Deriva X	Deriva Y	Rx	Ry	
1 E1	1.399	1.28	0.99	0.99	2.97	2.40	
2-E3	1.75	1.64	1.01	1.00	3.58	2.60	
3-E4	1.42	1.43	1.20	1.03	2.98	2.58	
					Promedio	3.18	2.53
4-E6	2.39	2.19	0.83	0.89	2.47	1.82	
5-E8	1.476	1.68	0.88	0.88	2.62	2.29	
6-E9	1.753	1.60	0.89	0.92	2.23	2.47	
					Promedio	2.44	2.19

En la tabla 30 se ven los resultados de incremento del R para las estructuras con disipadores de fluido viscoso con relación al valor obtenido para las estructuras sin los disipadores.

Tabla 33 Porcentaje de incremento del R para estructuras con disipadores.

Modelo #pisos	Sin disipadores		Con disipadores		Incremento	
	R_x	R_y	R_x	R_y	X	Y
8	2.268	2.059	3.176	2.529	40.04%	22.84%
6	2.159	2.111	2.441	2.193	13.04%	3.89%

Desde la Ilustración 55 a la Ilustración 59 se presentan los modelos 3D con los disipadores para las estructuras trabajadas, adicionalmente desde la a la se presentan dos curvas histereticas por cada uno de eso modelos.

Ilustración 55 Modelo 3 - 3D de la estructura.

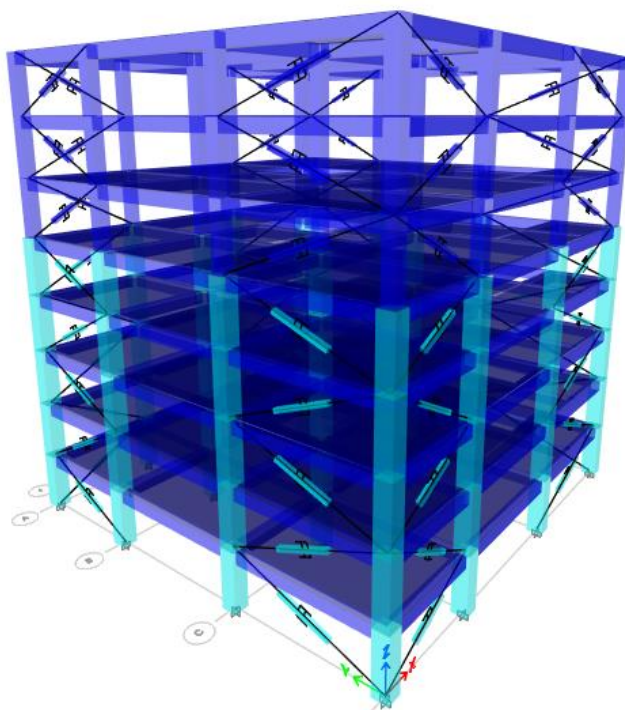


Ilustración 56 Modelo 4 - 3D de la estructura.

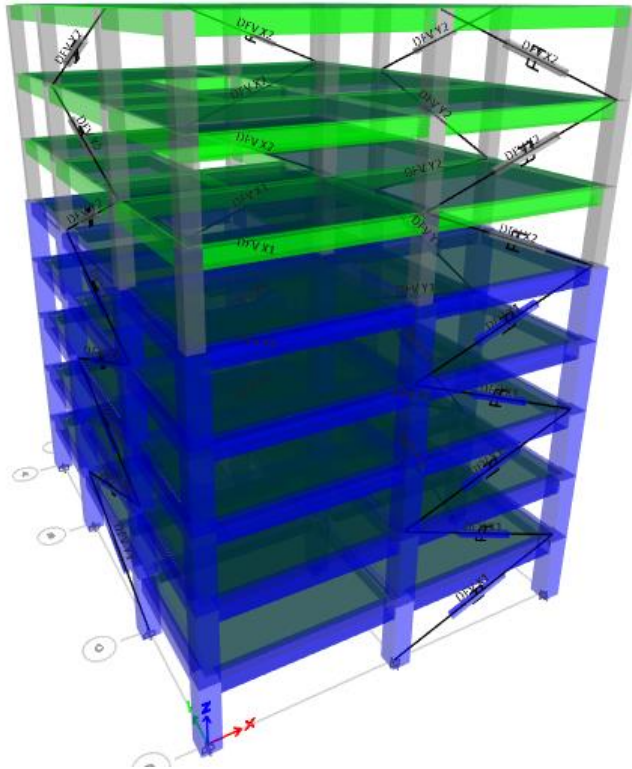


Ilustración 57 Modelo 6 - 3D de la estructura.

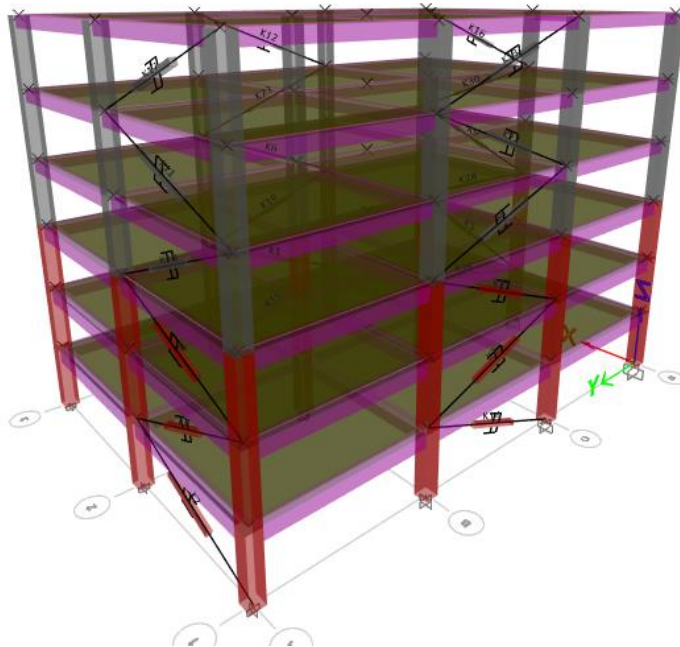


Ilustración 58 Modelo 8 - 3D de la estructura.

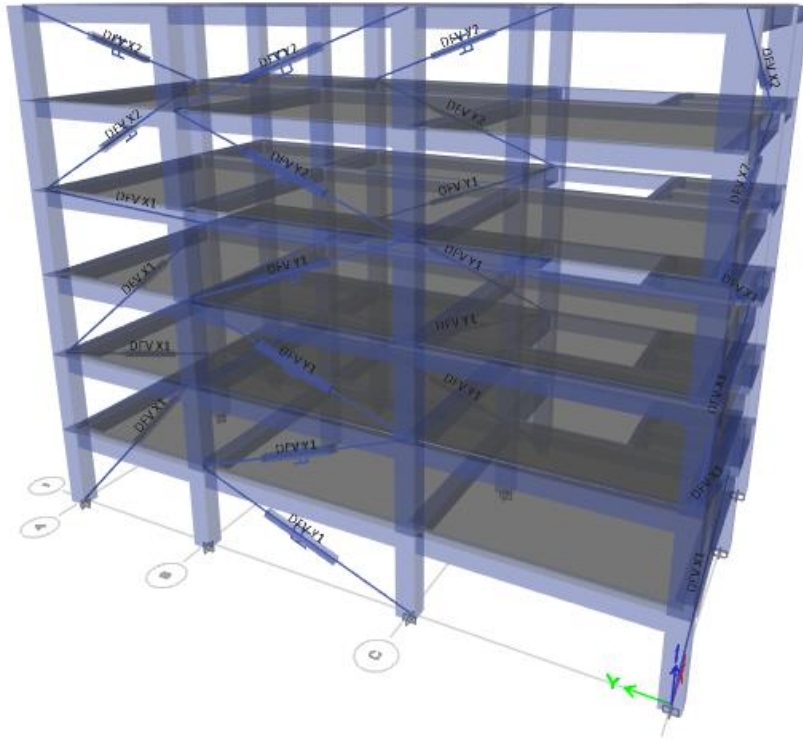


Ilustración 59 Modelo 9 - 3D de la estructura.

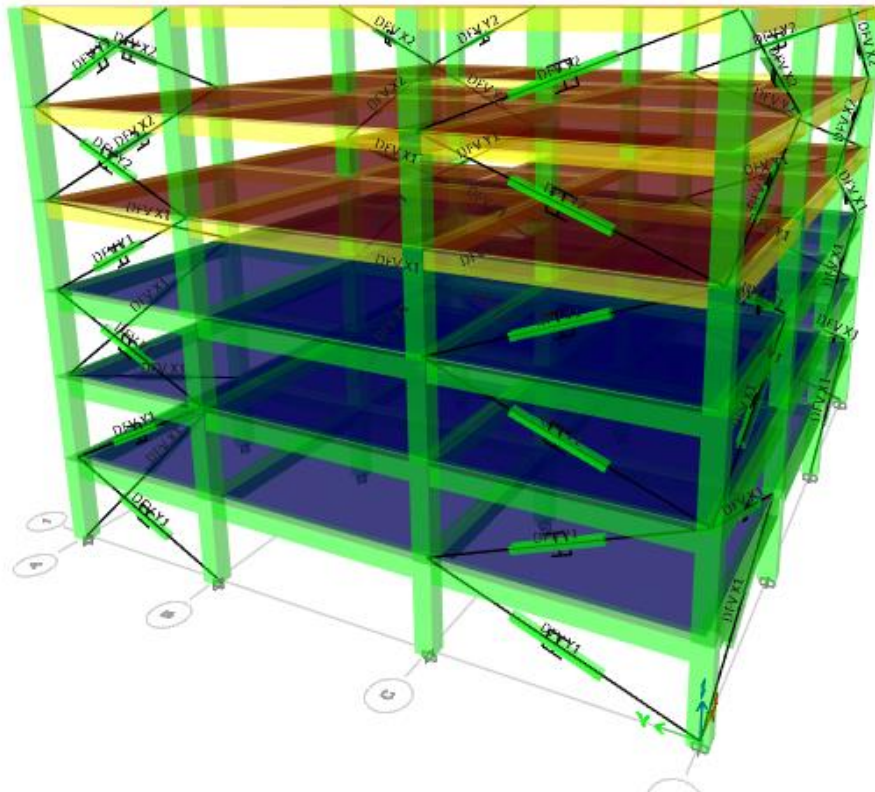


Ilustración 60 Curva de histéresis.

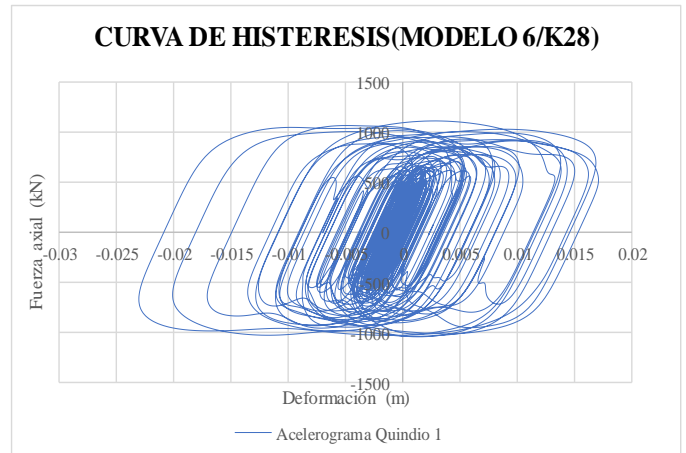
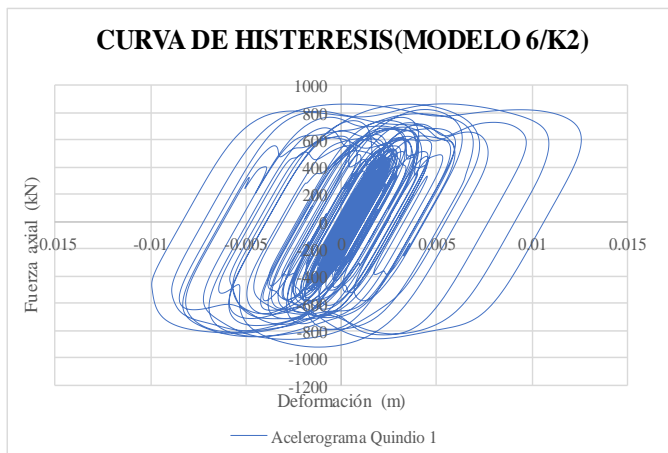
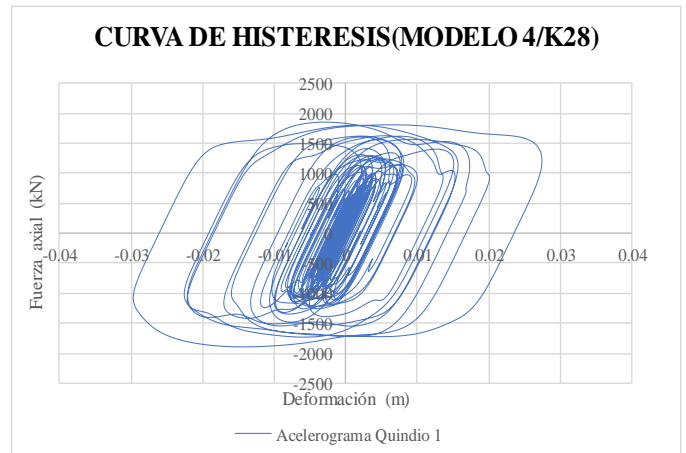
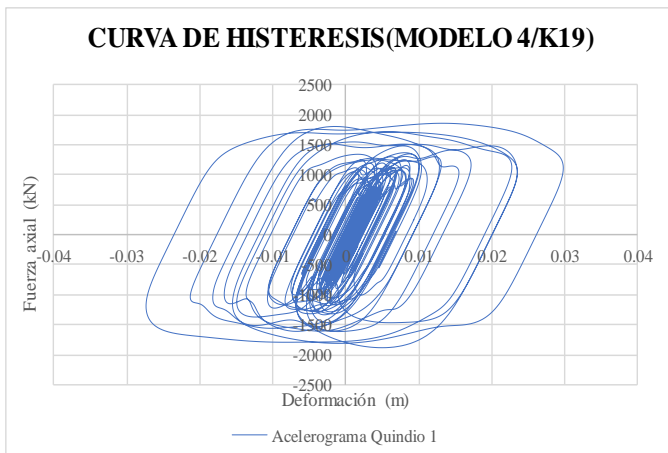
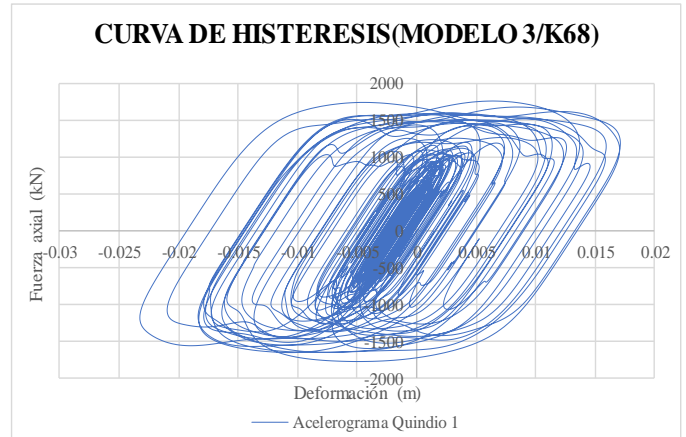
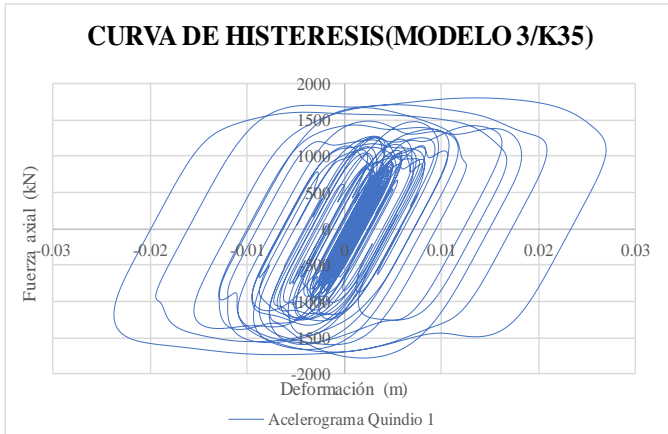
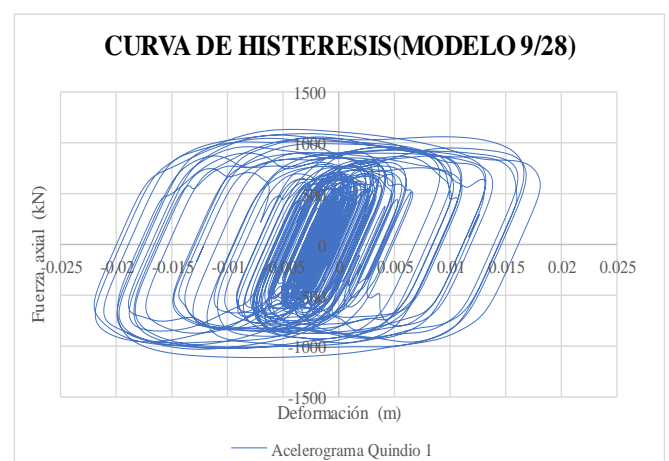
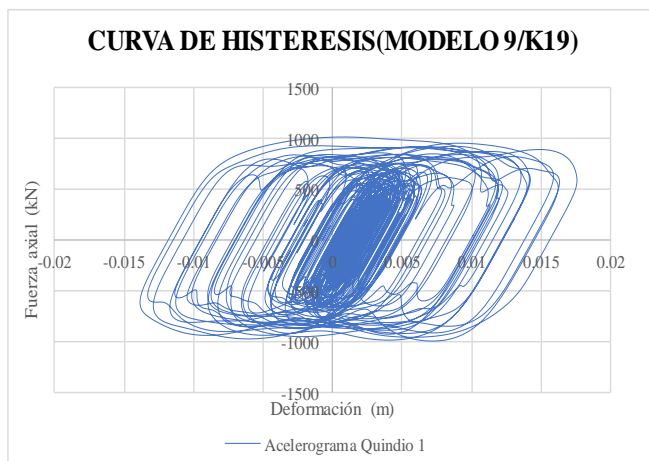
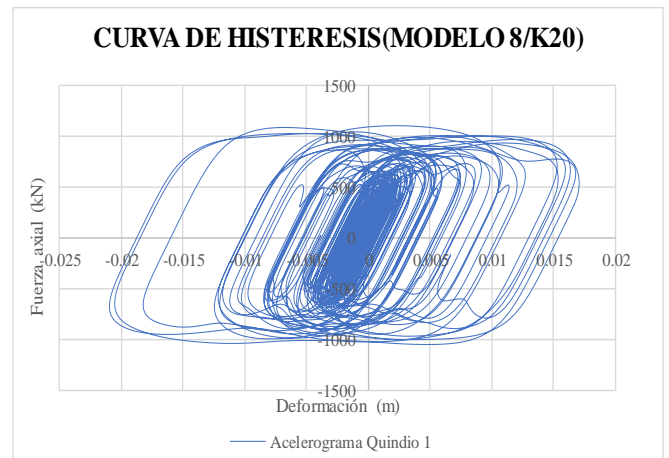
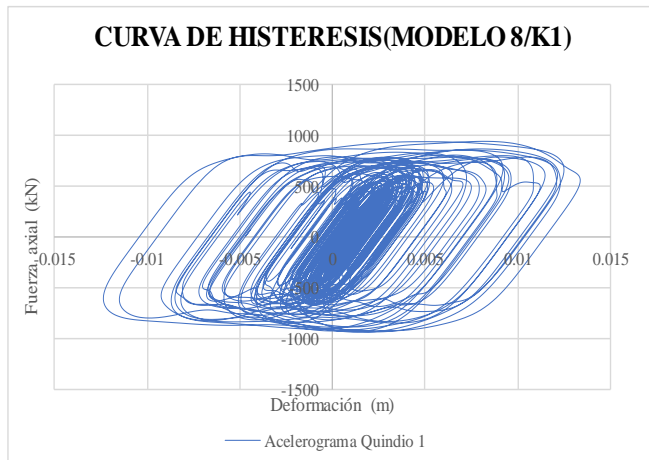


Ilustración 61 Curvas de histéresis.



Finalmente se logró implementar los disipadores de fluido viscosos en las estructuras trabajadas y encontrar un coeficiente de disipación de energía, implementando el método de plastificación progresiva *PushOver*, junto con las recomendaciones establecidas en normas que ya tienen en cuenta sistema de disipación, como es el caso de la ASCE 7-16.

Como se esperaba desde un inicio, el coeficiente de disipación de energía encontrado fue superior al obtenido para los edificios diseñados convencionalmente sin disipadores.

Según los resultados obtenidos, el número de pisos de la estructura afecta directamente el incremento en el coeficiente de disipación de energía con respecto al de la estructura sin disipadores.

Se puede apreciar que las secciones estructurales obtenidas para el diseño convencional se reducen significativamente al implementar los disipadores viscosos, la reducción mayor se observa en las secciones de las vigas, sin embargo, en las columnas, aunque la reducción fue un poco menor comparado con las vigas, existe una reducción en el acero de refuerzo requerido.

Con los porcentajes de incremento definidos, se podría pensar en aplicar este incremento al valor del coeficiente de disipación de energía dado en la norma colombiana el cual es $R=7$, obteniendo valor de R_0 para el sistema estructural de pórticos de concreto reforzado DES con disipadores de fluido viscosos, sin embargo y como se apreció en este trabajo, el número de pisos influye directamente en la amplificación del factor.

10. IDENTIFICACIÓN DEL DIRECTOR DEL TRABAJO DE GRADO

Director:

Orlando Cundumi Sánchez

C.C. 16275200 de Palmira

11. DESCRIPCIÓN DE RECURSOS

En la tabla 31 se presentan los recursos humanos, físicos y tecnológicos necesarios para el desarrollo del proyecto planteado.

Tabla 34 Recursos a utilizar.

Tipo de recurso	Descripción	Responsable
Humano	Director de Tesis	Orlando Cundumi Sanchez-Javeriana Cali
	Alumno	Camilo Jose Fierro Cogollo- Ingeniero Civil
Físicos	Portátil	Camilo Jose Fierro Cogollo- Ingeniero Civil
	Sala de Ingeniería Civil	Departamento de Ingeniería Civil e industrial
Software	Word	
	Excel	
	ETABS	
	Seismo Match	

12. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguiar, R. (2003). Análisis Sísmico por Desempeño, Centro de Investigaciones Científicas. Escuela Politécnica del Ejército,[Libro completo 342 p], Quito, Ecuador.
- Aguiar, R. (n.d.). *Capítulo 5 propuesta de cálculo del factor r* . [Capitulo 5 de articulo CEINCI].
- Aguiar, R. (2007). *Factor de reducción de fuerzas sísmicas en edificios de Hormigón armado sin muros de corte*. [Monografía CIMNE IS-58].
- Aguiar, R. (2008). Análisis del factor de reducción de las fuerzas sísmicas. *Revista Sul-Americana de Engenharia Estrutural*, [Articulo de revista] 3(1). <https://doi.org/10.5335/rsee.v3i1.319>
- Aguiar, R. (2016). *Análisis Sísmico por Desempeño. August 2015*. [Monografía CIMNE IS-75].
- Ahumada, J. L. (2010). Sistema de control en Estructuras. [Articulo de investigacion, revista de ingenieria], *Inge-CUC*, 6(6), 79–84.
- Ardilla, J. (2016). *Evaluación del coeficiente de disipación energía, r , para edificios con un sistema estructural combinado de muros y pórticos en concreto, con diferente número de pisos*. [Tesis de Maestria, Uniersidad nacional de colombia].
- Applied Technology Council. (1995a). ATC-19 Structural Response Modification Factors.
- Applied Technology Council. (1995b). ATC-40 Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings. ATC 40 (Vol. 1). California. <https://doi.org/10.1193/1.1586093>
- Candanedo, F., Miranda, C., Cedeño, R., Lozada, R., & Ramírez, Ó. (2015). *Diseño de estructuras con sistema de amortiguamiento viscoso lineal*. [Articulo, RIDTEC V-11], 26–34. <http://ridda2.utp.ac.pa/handle/123456789/1788>
- Cortes, A. Cundumi, O. Peña, F. (2021). Influence of the Dynamic Soil-Structure Interaction in concrete frames with incorporated viscous dampers. [Paper, Pontificia universidad Javeriana Cali].
- Cundumi, O. (2013). *Análisis Nolineal Estático – PushOver (Pórtico Plano)*. 4, 1–8.
- Cundumi, O., & Cundumi, J. S. (2021). *Comparison between dynamic nonlinear analysis with asce 7-10 and asce 7-16 in concrete frames with viscous*. [Paper, Pontificia universidad javeriana Cali], June, 2021.
- Cundumi, O., & Suárez, L. E. (2007). A new variable damping semiactive device for seismic response reduction of civil structures. *Journal of Mechanics of Materials and Structures*, 2(8), 1639–1656. <https://doi.org/10.2140/jomms.2007.2.1639>
- Cundumi, O., & Suárez, L. E. (2008). Numerical investigation of a variable damping semiactive device for the mitigation of the seismic response of adjacent structures.

- Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 23(4), 291–308.
<https://doi.org/10.1111/j.1467-8667.2007.00537.x>
- De Domenico, D., & Ricciardi, G. (2019). Earthquake protection of structures with nonlinear viscous dampers optimized through an energy-based stochastic approach. *Engineering Structures*, 179(November 2018), [Artículo, El SEVIER], 523–539.
<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.09.076>
- Díaz, M. A. (2014). Evaluación del proyecto estructural y optimización del diseño con disipadores de energía viscosos taylor para una edificación esencial de 6 pisos. *Universidad Privada Antenor Orrego - UPAO*, 214.
<http://repositorio.upao.edu.pe/handle/upaorep/637>
- Emilio, P., Giraldo, M., Ignacio, V., & Reyes, S. (2015). *Diseño estructural de un edificio de 6 pisos con aisladores de base elastomérico* [Tesis de pregrado, universidad estatal península de santa elena].
- SEISMOSOFT. (2021). Earthquake engineering software solutions, [Software computacional], SeismoMatch. <https://seismosoft.com/products/seisomatch/>
- American Society of Civil Engineers. (2017). ASCE 7-16. In Science (Vol. 69, Issue 1782).
<https://lccn.loc.gov/2017018275%0Awww.asce.org/bookstore>
- Fisco, N. R., & Adeli, H. (2011). Smart structures: Part I - Active and semi-active control. [Paper, universidad de Ohio, facultad de ingeniería]. *Scientia Iranica*, 18(3 A), 275–284.
<https://doi.org/10.1016/j.scient.2011.05.034>
- Gomez Navarrete, 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*. [Tesis de maestría, Universidad nacional de Colombia].
- Hamidia, M., Filiatrault, A., & Aref, A. (2014). Seismic Collapse Capacity–Based Evaluation and Design of Frame Buildings with Viscous Dampers Using PushOver Analysis. *Journal of Structural Engineering*, 141(6), 04014153.
[https://doi.org/10.1061/\(asce\)st.1943-541x.0001114](https://doi.org/10.1061/(asce)st.1943-541x.0001114)
- Hwang, J.-S., Huang, Y.-N., Yi, S.-L., & Ho, S.-Y. (2007). Design Formulations for Supplemental Viscous Dampers to Building Structures. *Journal of Structural Engineering*, 134(1), 22–31. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9445\(2008\)134:1\(22\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9445(2008)134:1(22))
- Industrial, C. D. E. I. (2012). *Pontificia Universidad Javeriana Contenido*. [Memorias de clase, Pontificia universidad javeriana], 1–140. [http://puj-portal.javeriana.edu.co/portal/page/portal/Facultad de Ingeniería/1pdf_car_industrial/EncuestaSeguimientoEgresadosIngenier%EDaIndustria l.pdf](http://puj-portal.javeriana.edu.co/portal/page/portal/Facultad%20de%20Ingenieria/1pdf_car_industrial/EncuestaSeguimientoEgresadosIngenier%EDaIndustria%201.pdf).
- Mark, A. R. A., Manikandan, S., & Sofi, A. (2014). *PushOver Analysis of Structures*. [Artículo de IUP, ingeniería estructural], VII(3), 28–38.
- Pardo, Juan Pablo. (2007). *Control de la respuesta dinámica de estructuras mediante el uso de disipadores de energía de fluido viscoso del tipo lineal*. [Tesis de pregrado,

universidad Austral de chile],174.

Park, R., & Paulay, T. (1975). *Estructuras de concreto reforzado*, [Libro completo] (p. 769). <https://doi.org/10.1002/9780470172834>.

Pekelnicky, R., & Poland, C. (2012). ASCE 41-13: Seismic Evaluation and Retrofit Rehabilitation of Existing Buildings. *Citeseer*, 1–12. <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:ASCE+41-13+:+Seismic+Evaluation+and+Retrofit+Rehabilitation+of+Existing+Buildings#0>.

Rodriguez, M. M., Mora, D., & Aguiar, R. (2016). *Análisis Sísmico de Estructuras con Disipadores de Energía ADAS o TADAS*, [Monografía de ingeniería sísmica], (Issue May). <https://www.researchgate.net/publication/303256522>.

Santos-santiago, M. A., Ruiz, S. E., & Santiago, A. S. (2017). *Comparación de dos métodos simplificados para el diseño sísmico*. September, [Paper, universidad nacional autonoma de Mexico]

SGC.(2021). Servicio geologico colombiano, catalogo simico integrado. <https://catalogosismico.sgc.gov.co/visor/index.html>.

Taylor Devices, I. (2020). *Fluid Viscous Dampers Manual*. [Manual de diseño y memorias de calculo].

Zhou, F. L., Tan, P., Cui, J., Xian, Q. L., Wei, L. S., Huang, D. Y., Santini, A., & Moraci, N. (2008). *Recent Research & Application on Seismic Isolation, Energy Dissipation and Control for Structures in China*. [Articulo, universidad de Guangzhou],17(1), 1294–1311. <https://doi.org/10.1063/1.2963750>.

(Zhou et al., 2008)
(Park & Paulay, 1975)
(Pekelnicky & Poland, 2012)
(Mark et al., 2014)
(Cundumi, 2013)
(Aguiar, 2016)
(Aguiar, 2008)
(Aguiar, 2007)
(Rodriguez et al., 2016)
(Engineers, 2017)
(Ardilla, 2016)
(Hwang et al., 2007)
(Aguiar, n.d.)
(Ardilla, 2016)
(Zhou et al., 2008)
(Pekelnicky & Poland, 2012)

(De Domenico & Ricciardi, 2019)
(Pardo, 2007)
(Santos-santiago et al., 2017)
(Rodriguez et al., 2016)
(Diaz, 2014)
(Emilio et al., 2015)
(Hamidia et al., 2014)
(ATC 40, 1996)
(Taylor Devices, 2020)
(Industrial, 2012)
(Gomez Navarrete, 2020)
(Aguiar, 2007)
(Cundumi, 2013)
(Cundumi & Suárez, 2007)
(Cundumi & Suárez, 2008)
(Fisco & Adeli, 2011)
(Cundumi & Cundumi, 2021)