

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD
CATÓLICA DEL PERÚ**

Escuela de Posgrado



Propuesta para la implementación de la Norma Peruana de
Análisis y Diseño de Edificios con Disipadores de Energía
de Fluido Viscoso

Tesis para obtener el grado académico de Maestro en Ingeniería
Civil con mención en Estructuras Sismorresistentes que presenta:

José Luis Loayza León

Asesor:

Ing. Juan Alejandro Muñoz Peláez

Lima, 2025

Informe de Similitud

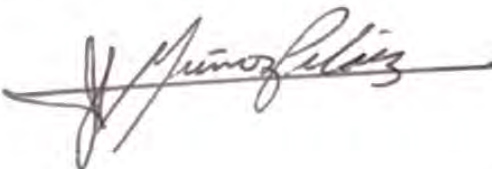
Yo, Juan Alejandro Muñoz Peláez, docente de la Escuela de Posgrado de la Pontificia Universidad Católica del Perú, asesor de la tesis titulada ***Propuesta para la implementación de la Norma Peruana de Análisis y Diseño de Edificios con Disipadores de Energía de Fluido Viscoso***, del autor José Luis Loayza León,

dejo constancia de lo siguiente:

- El mencionado documento tiene un índice de similitud con puntuación de 20%. Así lo consigna el reporte de similitud emitido por el software *Turnitin* el 03/01/2025.
- He revisado con detalle dicho reporte y el documento de Tesis no advierte indicios de plagio.
- Las citas a otros autores y sus respectivas referencias cumplen con las pautas académicas.

Lugar y fecha:

Lima 04 de enero del 2025

Apellidos y nombres del asesor: Muñoz Pelaez Juan Alejandro	
DNI: 09857570	Firma: 
ORCID: 0000-0002-3719-4721	



DEDICATORIA

A mis padres Rubén y María, por su amor incondicional y apoyo constante. Su fe en mí me ha enseñado a perseverar y nunca rendirme.

A mi hermana Silvana por sus consejos y aliento

A mi amada Ruth por su amor y compañía



AGRADECIMIENTO

Agradezco a mi asesor, el Ing. Alejandro Muñoz Peláez, por su guía, apoyo y valiosos consejos a lo largo de este proceso. Su dedicación, tiempo y conocimientos han sido fundamentales para la realización de esta tesis.



Resumen

Los sistemas de disipación de energía son actualmente usados en el Perú y se están ejecutando proyectos que emplean este tipo de tecnologías de protección sísmica. Debido a la no existencia de una normativa peruana para el diseño de edificaciones empleando este sistema de protección sísmica, el presente trabajo tiene como objetivo general contribuir a la seguridad sísmica de los edificios peruanos mediante la propuesta de una normativa peruana que contenga los requisitos generales y métodos simplificados para analizar y diseñar edificios con disipadores de fluido viscoso (DFV), tomando como referencia las normativas americana ASCE/SEI 7-22, chilena NCh3411-2017, mexicana NTCS 2020, europea EN 15129:2018, FEMA 273, FEMA 274 e importantes investigaciones científicas realizadas sobre la materia. Se revisaron los fundamentos teóricos que se emplearon para obtener los métodos simplificados en las normas internacionales antes mencionadas, y posteriormente se propuso la implementación de una Norma peruana de Análisis y Diseño de edificios con DFV utilizando parámetros sísmicos peruanos indicados en la Norma Técnica E.030 Diseño Sismorresistente. Los métodos propuestos se basan en la premisa de que una estructura con comportamiento inelástico y con disipadores puede representarse como una estructura lineal equivalente con rigidez y periodo efectivos. Finalmente, los lineamientos de la propuesta fueron aplicados en un edificio de concreto armado aperticado regular de 6 pisos ubicado en la costa peruana al cual se le incluyeron los DFV previamente dimensionados. Los resultados obtenidos de aplicar los métodos simplificados propuestos de análisis fueron mayores en un rango aproximado del 15% al 40% respecto a los resultados obtenidos de un análisis dinámico no lineal, esto debido a que los métodos presentan limitaciones a considerar como, para el caso del método de Fuerzas Laterales Equivalentes, la condensación de las respuestas de los modos superiores a un solo modo residual de vibración y la velocidad de la estructura que fue hallada como una pseudovelocidad, la cual difiere de la velocidad real de la estructura, sin embargo; esta diferencia porcentual, se condice con resultados encontrados en la literatura y por lo tanto se llegó a la conclusión de que se puede proponer una norma peruana para analizar y diseñar edificios con disipadores de fluido viscoso.

ÍNDICE.

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN	1
1.1 ANTECEDENTES.	1
1.2 JUSTIFICACIÓN.	2
1.3 OBJETIVOS	3
1.3.1 OBJETIVO GENERAL	3
1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.	3
1.4 METODOLOGÍA Y ALCANCES	3
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO	5
2.1 DISPOSITIVOS DEPENDIENTES DE LA VELOCIDAD.	5
2.1.1 DISIPADOR DE FLUIDO VISCOSO (DFV).	5
2.1.2 ECUACIÓN GENERAL DEL DISIPADOR DE ENERGÍA DE FLUIDO VISCOSO.	7
2.1.3 DISIPACIÓN DE ENERGÍA DE UN DFV.	8
2.1.4 MODELO MATEMÁTICO DE MAXWELL	10
2.2 RESPUESTA SÍSMICA DE ESTRUCTURAS CON DFV	13
2.3 AMORTIGUAMIENTO EFECTIVO EN ESTRUCTURAS CON DFV.	16
2.4 PROCEDIMIENTOS SIMPLIFICADOS DE ANÁLISIS Y DISEÑO DE ESTRUCTURAS CON DFV.	20
2.5 SUPOSICIONES PARA EL ANÁLISIS DE EDIFICIOS DE VARIOS GRADOS DE LIBERTAD CON DFV.	24
2.6 RESPUESTA ESPECTRAL MODIFICADA POR AMORTIGUAMIENTO.	24
2.6.1 COEFICIENTE DE REDUCCIÓN POR AMORTIGUAMIENTO PARA LA SISMICIDAD PERUANA.	27
CAPÍTULO III: REVISIÓN DE NORMATIVAS INTERNACIONALES	32
3.1 NORMATIVAS DE REFERENCIA.	32
3.2 REQUISITOS GENERALES PARA EL DISEÑO DEL SISTEMA ESTRUCTURAL.	34
3.3 REQUISITOS GENERALES PARA EL DISEÑO DEL SISTEMA DE AMORTIGUAMIENTO.	38
3.4 ACCIONES DE DISEÑO SÍSMICO.	40
3.4.1 ESPECTROS ESPECÍFICOS DE SITIO	40
3.4.2 FACTOR DE REDUCCIÓN DE RESPUESTA POR AMORTIGUAMIENTO.	45
3.5 PROCEDIMIENTOS DE ANÁLISIS.	48
3.5.1 PROCEDIMIENTOS SIMPLIFICADOS	49
3.5.2 PROCEDIMIENTOS DE RESPUESTA NO LINEAL EN EL TIEMPO.	52
3.6 ENSAYOS.	56
3.6.1 GENERALIDADES	56
3.6.2 ENSAYOS DE LOS PROTOTIPOS	56
3.7 DESEMPEÑO DE ESTRUCTURAS CON DISIPADORES APLICANDO LA NORMA AMERICANA ASCE/ SEI 7-16.	61
CAPÍTULO IV: PROPUESTA DE NORMA PERUANA PARA ANÁLISIS Y DISEÑO DE EDIFICIOS CON DISIPADORES DE ENERGÍA DE FLUIDO VISCOSO.	62
4.1 ALCANCE DE LA PROPUESTA	62
4.2 NOMENCLATURA	62

4.3 REQUISITOS GENERALES DE DISEÑO	64
4.3.1 SISTEMA SISMORRESISTENTE	64
4.3.2 SISTEMA DE AMORTIGUAMIENTO	65
4.4 ACCIONES SÍSMICAS	66
4.5 PROCEDIMIENTOS DE ANÁLISIS	67
4.5.1 REQUISITOS PARA LA APLICACIÓN DE LOS PROCEDIMIENTOS SIMPLIFICADOS.	71
4.5.2 PROCEDIMIENTO DE ANÁLISIS DE RESPUESTA ESPECTRAL	77
4.5.3 PROCEDIMIENTO DE FUERZAS LATERALES EQUIVALENTES (FLE)	83
4.6 RESPUESTA MODIFICADA POR AMORTIGUAMIENTO	86
4.6.1 AMORTIGUAMIENTO EFECTIVO.	87
4.7 FACTORES DE COMBINACIÓN PARA CARGAS SÍSMICAS DE DISEÑO.	89
4.8 DEMANDA DE DUCTILIDAD EFECTIVA MÁXIMA.	91
4.9 ENSAYOS Y PRUEBAS.	92
4.10 CRITERIOS DE ACEPTACIÓN DEL DISIPADOR.	93
<u>CAPÍTULO V: APLICACIÓN DE LA NORMA PROPUESTA A UN CASO DE ESTUDIO</u>	<u>94</u>
5.1 CARACTERÍSTICAS DEL EDIFICIO.	94
5.2 ANÁLISIS ESTÁTICO Y DINÁMICO DE LA ESTRUCTURA SIN DISIPADORES.	96
5.3 DESPLAZAMIENTO DEL TECHO Y DERIVA DE ENTREPISO DEL EDIFICIO SIN DISIPADORES.	97
5.4 ANÁLISIS SÍSMICO DEL EDIFICIO CON DFV	98
5.4.1 ANÁLISIS DEL EDIFICIO CON DFV LINEALES.	101
5.4.2 ANÁLISIS DEL EDIFICIO CON DFV NO LINEALES	114
5.5 ANÁLISIS COMPARATIVO DE LAS RESPUESTAS DEL EDIFICIO CON DFV LINEALES Y NO LINEALES.	117
5.5.1 DESPLAZAMIENTOS INELÁSTICOS.	117
5.5.2 DISTORSIONES INELÁSTICAS.	118
5.5.3 FUERZAS AXIALES EN LOS DFV.	119
5.5.4 FUERZAS CORTANTES BASALES.	120
5.6 RESPUESTAS TIEMPO HISTORIA NO LINEAL.	121
5.6.1 DESPLAZAMIENTOS INELÁSTICOS	121
5.6.2 DISTORSIONES DE ENTREPISO	122
5.6.3 FUERZAS AXIALES EN DISIPADORES	122
5.6.4 FUERZAS CORTANTES DE PISO.	124
5.7 ANÁLISIS Y DISEÑO ASISTIDO POR COMPUTADOR.	124
<u>CAPÍTULO VI: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.</u>	<u>127</u>
6.1 CONCLUSIONES	127
6.2 RECOMENDACIONES	129
<u>REFERENCIAS</u>	<u>130</u>
<u>ANEXO 1: PROPUESTA DE NORMATIVA PERUANA</u>	<u>133</u>
<u>ANEXO 2: RESUMEN DE CÁLCULOS</u>	<u>133</u>

LISTA DE TABLAS.

Tabla 1. Resumen de los métodos de análisis de edificios con DFV propuestos en códigos e investigaciones a lo largo de los años.	21
Tabla 2. Sismos empleados (Fuente http://ceмос.cismid-uni.org).....	28
Tabla 3. Factores de reducción de respuesta por amortiguamiento (B)	30
Tabla 4. Comparación de los requisitos generales de diseño del sistema sismorresistente.....	37
Tabla 5. Comparativo de la clasificación, definición y criterios de diseño del sistema de amortiguamiento.	39
Tabla 6. Comparativo de los espectros de diseño de las cuatro normas internacionales.....	45
Tabla 7. Coeficientes de reducción por amortiguamiento (B)	48
Tabla 8. Comparativo de requisitos para la aplicación de métodos de análisis de edificios con disipadores de energía de fluido viscoso.	55
Tabla 9. Cuadro resumen del comparativo de los ensayos realizados a los DFV viscoso.	60
Tabla 10. Valores del parámetro λ	89
Tabla 11. Valores del coeficiente básico de reducción y Coeficiente básico de sobre resistencia.	76
Tabla 12. Cargas de gravedad.....	95
Tabla 13. Periodos de vibración modal de la estructura	97
Tabla 14. Desplazamientos y derivas del edificio sin disipadores.....	97
Tabla 15. Masas por nivel y formas modales.....	100
Tabla 17. Cuadro resumen de los resultados para el modo fundamental, superiores y residual.	107
Tabla 18. Desplazamientos de piso (cm) para los modos fundamental, superiores y residual.	107
Tabla 19. Desplazamientos de entre piso (cm) para los modos fundamental, superiores y residual.	108
Tabla 20. Fuerzas sísmicas (tonf) por piso para los modos fundamental, superiores y residual correspondientes al desplazamiento elástico reducido	109
Tabla 21. Fuerzas por piso (tonf) para el instante de máximo desplazamiento.	109
Tabla 22. Velocidades relativas (cm/s) de entrepiso para los modos fundamental, superiores y residual.	110
Tabla 24. Fuerzas horizontales por piso (tonf) para el estado de máxima velocidad, 4 disipadores por piso.	111
Tabla 25. Cálculo de coeficientes CF1 y CF2.....	112
Tabla 26. Fuerzas sísmicas laterales (tonf) para el instante de máxima aceleración	113
Tabla 27. Fuerzas sísmicas laterales para los instantes de máximos desplazamiento, velocidad y aceleración.....	113
Tabla 29. Desplazamientos inelásticos (cm) de la estructura con disipadores DFV no lineales	116
Tabla 30. Fuerzas sísmicas laterales por piso para los instantes máximos de desplazamiento, velocidad y aceleración para DFV no lineales ($\alpha=0.5$)	116
Tabla 31. Comparativo de desplazamientos inelásticos del edificio de 6 niveles con DFV Lineales y No Lineales ($\alpha=0.5$) y con amortiguamientos agregados de 15% y 20%.....	117
Tabla 32. Distorsión de entrepiso en edificio de 6 niveles.	118

Tabla 33. Fuerzas axiales (tonf) en los DFV lineales y no lineales ($\alpha=0.5$) para amortiguamiento agregado de $\beta=15\%$ y $\beta=20\%$	119
Tabla 34. Fuerzas cortantes de entrepiso correspondientes al desplazamiento elástico de diseño D_s	120
Tabla 35. Desplazamientos inelásticos (RE, FLE) vs THNL – DFVNL ($\alpha=0.5$).....	121
Tabla 36. Distorsiones de entrepiso (RE, FLE) VS THNL.....	122
Tabla 37. Fuerzas axiales en los DFV (RE, FLE) Vs THNL	123
Tabla 38. Fuerzas cortantes de piso (RE, FLE) Vs THNL.....	124



LISTA DE FIGURAS.

Figura 1. Corte de elevación de un DFV. Tomada de (Constantinou & Symans, 1992)	6
Figura 2. Fuerza de DFV vs velocidad. Adaptada de (Ruiz, 2018)	8
Figura 3. Lazos histeréticos para DFV con tres valores de α bajo movimiento armónico. (Lin & Chopra, 2002).....	10
Figura 4. Modelo de Maxwell. Adaptado de (Wilson, 2002).....	10
Figura 5. Rigidez acumulada vs Frecuencia de excitación, tomada de (Chávez Aguirre, 2017).....	12
Figura 6. Coeficiente de amortiguamiento Vs Frecuencia de excitación. Tomado de (Chávez Aguirre, 2017).....	12
Figura 7. Aceleración, fuerza cortante por piso y distorsión de entrepiso. Tomado de (Constantinou & Symans, 1992).....	13
Figura 8. Aceleración, fuerzas cortantes y distorsión de entrepiso para una estructura de acero de 3 pisos con DFV lineales y no lineales. Tomado de (Seleemah & Constantinou, 1997).....	14
Figura 9. Lazo histerético idealizado.....	18
Figura 10. Sistema histerético bilineal amortiguado de 1 GDL. Tomado de (Tsopeles et al., 1997)...	23
Figura 11. Propuesta de la relación entre el coeficiente de reducción por amortiguamiento B y el periodo de vibración. Adaptado de (Ramirez et al., 2000)	27
Figura 12. Promedio de las 14 señales para un amortiguamiento de 2% a 50%.....	28
Figura 13. Promedio de las 14 señales para un amortiguamiento de 60% a 100%.....	29
Figura 14. Coeficiente de reducción por amortiguamiento B para (2% - 50%)	29
Figura 15. Coeficiente de reducción por amortiguamiento (60% - 100%).....	30
Figura 16. Espectro de Diseño Multiperiodo - Espectro de Diseño de dos periodos (Kircher et al., 2019).....	41
Figura 17. Desplazamiento de techo vs Fuerza cortante. Adaptado de (Whittaker, 2003)	73
Figura 18. Curva pushover idealizada elastoplástica del sistema sismorresistente.	79
Donde, V_y es la cortante de flu	80
Figura 19. Constante de amortiguamiento para DFV no lineales para modos superiores. Tomado de (Ramirez et al., 2000)	89
Figura 20. Relación fuerza - desplazamiento de una estructura con amortiguadores viscosos. (Hwang, 2002)	90
Figura 21. Edificio de 6 niveles de concreto armado.	94
Figura 22. Distribución de los disipadores en la estructura.....	111
Figura 24. Comparativo de las fuerzas axiales en DFV Lineales y No Lineales ($\alpha=0.5$) con amortiguamiento agregado de $\beta=15\%$ y $\beta=20\%$	120
Figura 25. Curva histerética de DFV No Lineal - Registro LIM74NS	123
Figura 26. Reducción de la aceleración espectral	125
Figura 27. Ingreso de valores de amortiguamiento efectivo para cada modo.....	126

CAPÍTULO I: Introducción

1.1 Antecedentes.

La primera normativa formal que incluyó tecnologías de disipación de energía fue el código Uniform Building Code (UBC) de 1994, el cual estableció criterios generales para el uso de dispositivos de disipación de energía pasiva, aunque no específicamente de DFV. Luego, en el año 1997, la Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings reporte 273, desarrollado por la Federal Emergency Management Agency (FEMA) en Estados Unidos, proporcionó criterios para la rehabilitación sísmica de estructuras con dispositivos de disipación de energía, lo que sentó las bases para el uso extendido de DFV. Entre el año 2000 y 2010 el uso de los disipadores de energía de fluido viscoso se consolidó, y sus aplicaciones principales fueron en edificios nuevos y la rehabilitación sísmica de estructuras existentes, principalmente en Japón, Estados Unidos y Europa.

Códigos como el International Building Code (IBC) empezaron a incluir de manera más detallada lineamientos para el diseño de edificios con dispositivos de disipación de energía, aunque su enfoque inicial era los aisladores sísmicos y otro tipo de disipadores. En el año 2000, el código FEMA 356 (Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings) brindó lineamientos técnicos detallados sobre la evaluación y rehabilitación sísmica, incluyendo los DFV. Es hasta el año 2010 que normativas como el ASCE 7-10 en Estados Unidos comenzaron a definir criterios más específicos para el uso de estos dispositivos en estructuras, evaluando su capacidad de disipación de energía y criterios de instalación. Para el año 2013, el código ASCE 41-13 incluyó pautas más detalladas para la rehabilitación sísmica con tecnologías de disipación incluyendo los DFV, lo que marcó un avance en el uso de esta tecnología en la normativa estadounidense. Posteriormente se implementaron las normativas americanas ASCE/SEI 7-16 y ASCE/SEI 7-22 en el año 2016 y 2022 respectivamente, estas normativas son similares en su Capítulo 18 y presentan los requerimientos generales de diseño, métodos simplificados de análisis manuales, métodos

dinámicos no lineales, y lineamientos específicos para los ensayos de laboratorios para estos dispositivos.

En el contexto latinoamericano, la Norma Chilena NCh3411 se implementó por primera vez en el año 2017. Esta norma indica los requisitos para el análisis de edificios, así como los métodos de ensayo a los dispositivos de disipación. Por otra parte, las Normas Técnicas Complementarias mexicana, fueron actualizadas en el año 2017 posterior al sismo ocurrido el 19 de septiembre del mismo año. Esta normativa incluye, en su apéndice B, lineamientos de diseño y comentarios acerca de las pruebas de laboratorio que se deben realizar a los disipadores antes de su instalación. Posteriormente, en el año 2020, se realizó una actualización de la misma incluyendo en esa versión los comentarios realizados por Ruiz (2018) los cuales dan mayores alcances acerca de los procedimientos simplificados para el análisis de edificios con disipadores de energía de fluido viscoso y hysteréticos.

1.2 Justificación.

Actualmente en el Perú no se cuenta con una normativa que indique los lineamientos requeridos para el análisis y diseño de edificios con (DFV) y que permitan calcular el comportamiento de un sistema estructural con fines de diseño, por lo tanto, existe la necesidad de generar aspectos técnicos que contribuyan con la seguridad sísmica de los edificios. La finalidad del presente trabajo es contribuir a la seguridad sísmica de los edificios peruanos mediante la propuesta de una norma peruana que permita analizar y diseñar edificios con DFV. Para cumplir con el cometido se han revisado investigaciones científicas y normas internacionales con el fin de proponer los requisitos mínimos de diseño de una estructura y los métodos de cálculo necesarios para lograr tal fin.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Contribuir a la seguridad sísmica de los edificios peruanos.

1.3.2 Objetivos específicos.

- a. Comparar los requisitos generales de diseño y procedimientos de análisis estructural de edificios con DFV de diferentes normas internacionales.
- b. Proponer una norma peruana que contenga los requisitos generales de diseño y procedimientos simplificados de análisis estructural para el diseño de edificios con DFV.
- c. Desarrollar un ejemplo de aplicación de la propuesta de norma en un edificio aporticado de concreto armado de 6 pisos.

1.4 Metodología y alcances

Para elaborar la propuesta de normativa peruana, primeramente, se estudiaron los conceptos de respuesta dinámica de estructuras con DFV y la aplicación de métodos simplificados de análisis no lineal en estos sistemas. Estos métodos fueron presentados y analizados en el Reporte 273 de FEMA, en estudios realizados por Tsopelas et al. (1997), Chopra y Goel (1999), y Ramirez et al. (2000). Seguidamente se estudiaron y compararon los códigos internacionales de diseño ya existentes como la Norma americana ASCE/SEI 7-22, la Normativa chilena NCh 3411, la Normativa mexicana NTCS-20 y el Estándar europeo EN 15129:2018.

Posteriormente, se desarrolló una propuesta de normativa peruana para el análisis y diseño de edificios con DFV. Esta normativa establece los requisitos mínimos necesarios para el análisis y diseño estructural y propone dos métodos simplificados de análisis: el método de Respuesta Espectral y el de Fuerzas Laterales Equivalentes (FLE).

Finalmente, la propuesta de norma fue aplicada a un edificio aporricado de concreto armado de 6 niveles ubicado en la costa peruana. El edificio se evaluó para un sismo de diseño raro ($PGA=0.45g$) considerando DFV lineales ($\alpha=1$) y no lineales ($\alpha=0.5$) que aportan un amortiguamiento viscoso del 15% y 20%, luego las respuestas halladas se compararon con los resultados obtenidos de un análisis tiempo-historia no lineal.



CAPÍTULO II: Marco Teórico

En este capítulo se describen los fundamentos de los disipadores de fluido viscoso (DFV), abarcando su ecuación general, modelo matemático y capacidad de disipación de energía. Se analizan su impacto en la respuesta sísmica, el amortiguamiento efectivo que aportan, los procedimientos simplificados de diseño, y un comparativo de coeficientes de reducción de amortiguamiento entre lo propuesto en normas internacionales y la sismicidad peruana.

2.1 Dispositivos dependientes de la velocidad.

El uso de fluidos viscosos para mitigar vibraciones es un concepto bien conocido en las industrias pesada y militar. En la década de 1970, se implementaron por primera vez disipadores de fluido viscoso (DFV) en puentes en Italia. Posteriormente, en la década de 1980, se realizaron esfuerzos significativos para aplicar estas tecnologías en el diseño de edificaciones, lo que permitió su desarrollo, análisis, modelado y pruebas a escala real.

Convencionalmente, los edificios se diseñan y construyen bajo criterios sismorresistentes, lo que implica que pueden soportar incursiones inelásticas durante sismos. Estas incursiones inelásticas suelen concentrarse en los extremos de vigas, columnas y muros, lo que provoca daños estructurales difíciles de reparar.

Para abordar esta problemática, se han desarrollado sistemas para disipar energía, entre los que destacan los DFV. La principal meta de incorporar estos sistemas en las estructuras es concentrar la disipación de energía durante eventos sísmicos en elementos que puedan reemplazarse fácilmente, con el fin de salvaguardar la integridad de la estructura.

2.1.1 Disipador de fluido viscoso (DFV).

Según Constantinou y Symans (1992) un DFV es un dispositivo ingenieril diseñado para mejorar la respuesta y resistencia de estructuras frente a cargas sísmicas. Entre los componentes esenciales de un DFV se encuentran el pistón, el cilindro contenedor, el fluido de silicona y las cámaras que albergan el fluido, tal como lo muestra la Figura 1.

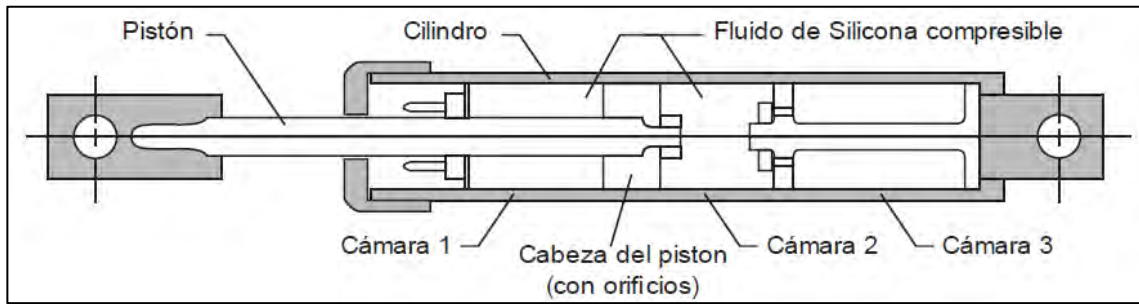


Figura 1. Corte de elevación de un DFV. Tomada de (Constantinou & Symans, 1992)

Cilindro: El dispositivo está compuesto de un cilindro sellado que contiene un fluido viscoso, como aceite o silicona de alta viscosidad. Este cilindro está diseñado para resistir las fuerzas sísmicas mientras mantiene el fluido confinado en su interior.

Pistón: En el interior del cilindro se encuentra un pistón, el cual es el responsable de la disipación de energía. Durante un evento sísmico, el movimiento relativo entre el pistón y el fluido viscoso genera fricción, lo que convierte la energía cinética en calor.

Fluido de Silicona: El cilindro está lleno de un fluido de silicona de alta viscosidad, el cual es fundamental para el funcionamiento del disipador. La viscosidad del fluido permite que la energía del movimiento se disipe eficazmente. A medida que el pistón se mueve, el fluido resiste dicho movimiento, lo que disipa la energía en forma de calor.

Cámaras de Fluido de Silicona: El interior del cilindro contiene varias cámaras de fluido separadas por discos o placas perforadas. Estas cámaras están diseñadas para controlar el flujo del fluido y proporcionar una resistencia distribuida de manera uniforme a lo largo del dispositivo.

Funcionamiento: Durante un evento sísmico, el pistón se desplaza en respuesta a las fuerzas aplicadas a la estructura. Este movimiento obliga al fluido de silicona a fluir a través de los orificios en los discos o la cabeza del pistón, creando una resistencia viscosa que disipa la energía cinética en forma de calor. Esta disipación de energía reduce significativamente las fuerzas transmitidas a la estructura principal, mejorando su capacidad para resistir las cargas sísmicas sin comprometer su integridad estructural.

2.1.2 Ecuación general del disipador de energía de fluido viscoso.

Los DFV presentan una relación fuerza-velocidad, que puede ser tanto lineal como no lineal.

$$F_D = C_o |\dot{u}|^\alpha \text{sgn}(\dot{u}) \quad (2.1)$$

La ecuación (2.1) F_D representa la fuerza que actúa en el disipador, C_o es la constante de amortiguamiento, \dot{u} denota la velocidad relativa entre los extremos del disipador, α es un exponente de velocidad que puede tomar valores en un rango de 0 a 1, y la función signo está definida como:

$$\text{sgn}(\dot{u}) = \begin{cases} 1, & \text{si } \dot{u} > 0 \\ 0, & \text{si } \dot{u} = 0 \\ -1, & \text{si } \dot{u} < 0 \end{cases} \quad (2.2)$$

La ecuación (2.1) se convierte en $F_D = C_o \dot{u}$ para un valor de $\alpha=1$, el cual representa un DFV lineal.

La Figura 2 presenta una gráfica que ilustra la relación entre la fuerza F_D y la velocidad \dot{u} en un dispositivo viscoso, considerando tres valores distintos del exponente de velocidad α . En esta figura, se puede apreciar que cuando α es igual a uno, la relación entre F_D y \dot{u} se presenta como una línea recta, lo que sugiere que la fuerza aumenta de forma proporcional a la velocidad. Además, se observa que, a velocidades bajas, los DFV lineales ($\alpha = 1$) transmiten menos fuerza a los elementos en contacto que los DFV no lineales ($\alpha < 1$). No obstante, cuando la velocidad es alta, los sistemas con dispositivos donde α es menor que uno tiende a transmitir una fuerza inferior a los elementos estructurales.

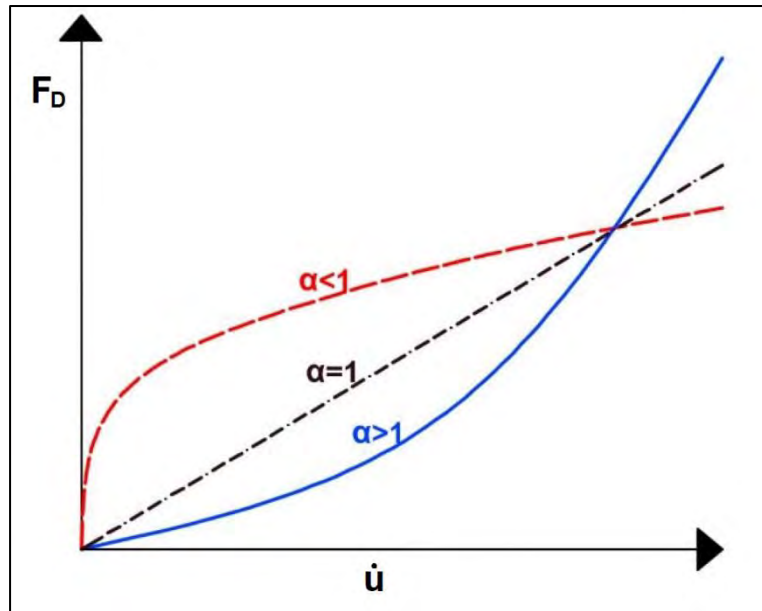


Figura 2. Fuerza de DFV vs velocidad. Adaptada de (Ruiz, 2018)

2.1.3 Disipación de energía de un DFV.

El estudio de Lin y Chopra (2002) determinó el porcentaje de amortiguamiento viscoso en función de la energía disipada para un sistema de un solo grado de libertad. Para ello consideró un sistema de un 1 GDL con masa m , una rigidez k y un DFV definido en la ecuación (2.1), el porcentaje de amortiguamiento viscoso β_v se basa en el concepto del amortiguamiento viscoso lineal equivalente, el cual se representa por medio de la siguiente ecuación.

$$\beta_v = \frac{E_D}{4\pi E_s} = \frac{E_D}{2\pi k u_0^2} \quad (2.3)$$

Donde E_D es la energía disipada por el sistema para un ciclo de movimiento armónico $u = u_0 \sin(\omega t)$, $\omega = \omega_n$ es la frecuencia natural del sistema. E_s es la energía elástica acumulada para el máximo desplazamiento del sistema (u_0). La energía disipada por el sistema E_D se define con la ecuación (2.4)

$$E_D = \lambda C_o \omega^\alpha u_0^{\alpha+1} \quad (2.4)$$

Donde C_o es la constante de amortiguamiento, α es el exponente de velocidad y el parámetro lambda λ está definida como

$$\lambda = 4 \cdot 2^\alpha \frac{\Gamma^2(1 + \frac{\alpha}{2})}{\Gamma(2 + \alpha)} \quad (2.5)$$

Donde, Γ es la función gamma. Para un DFV lineal ($\alpha=1$), el parámetro λ es igual a π y la disipación de energía E_D viene dada como

$$E_D = \pi C_1 \omega u_o^2 \quad (2.6)$$

Asumiendo que tanto el DFV lineal y no lineal disipan la misma cantidad de energía, se igualan las ecuaciones (2.4) y (2.6) y se obtiene

$$C_o = \frac{C_1}{\lambda} (\omega_n u_o)^{1-\alpha} \quad (2.7)$$

Si se reemplaza la Ec. (2.7) en la Ec. (2.1), se obtiene la siguiente relación de fuerzas entre un disipador no lineal y un lineal.

$$\frac{F_D(t)}{F_{D_o}(\alpha = 1)} = \frac{1}{\lambda} \frac{(\omega_n u_o)^{1-\alpha}}{\dot{u}_o} \operatorname{sgn}(\dot{u}) |\dot{u}|^\alpha \quad (2.8)$$

Donde $F_{D_o}(\alpha = 1) = C_1 \dot{u}_o$ es la fuerza máxima para un DFV lineal. La ecuación (2.8) está graficada en la Figura 3 para un movimiento armónico $u = u_o \operatorname{sen}(\omega t)$ y para tres valores de α : 1, 0.5, 0. Sin embargo estas curvas histeréticas tienen la misma área y por consiguiente disipan igual cantidad de energía para un ciclo de oscilación, ya que β_v se definió bajo el concepto de igual energía de disipación. El gráfico varía desde una elipse para un disipador lineal ($\alpha=1$) hasta un rectángulo ($\alpha=0$) para un disipador friccionante.

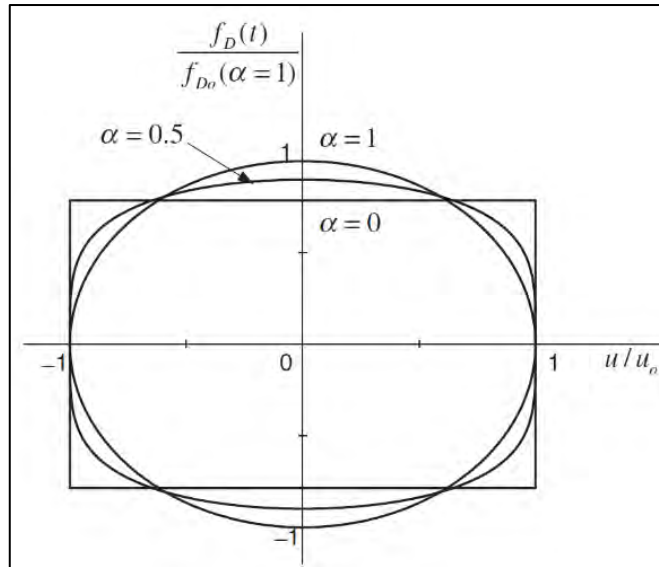


Figura 3. Lazos histeréticos para DFV con tres valores de α bajo movimiento armónico.

(Lin & Chopra, 2002)

2.1.4 Modelo matemático de Maxwell

Según Wilson (2002), el modelo matemático de Maxwell, se puede adaptar para representar el comportamiento de un DFV mediante la combinación de un resorte y un amortiguador viscoso en serie tal como lo representa la Figura 4, donde el fluido disipa energía en función de la velocidad del desplazamiento.

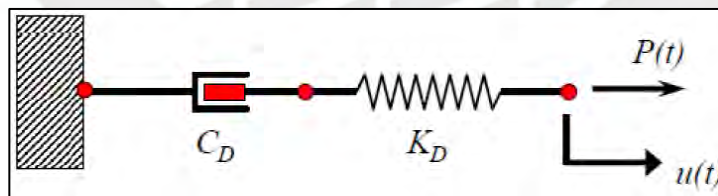


Figura 4. Modelo de Maxwell. Adaptado de (Wilson, 2002)

C_D representa la constante de amortiguamiento de fluido viscoso, K_D es la rigidez que describe la elasticidad del sistema, $P(t)$ es la fuerza en función del tiempo aplicada al sistema y $u(t)$ es el desplazamiento total del sistema.

La fuerza $P(t)$ aplicada en el resorte está relacionada con la deformación del resorte $u_s(t)$ y la rigidez K_D mediante la expresión $P(t) = K_D \cdot u_s(t)$. La fuerza en el amortiguador está dada mediante la expresión $P(t) = C_D \cdot \dot{u}_d(t)$, en donde $\dot{u}_d(t)$ es la velocidad en función del tiempo. El desplazamiento total del sistema se expresa como la suma del desplazamiento en el resorte y el amortiguador viscoso como $u(t) = u_s(t) + u_d(t)$. Derivando la expresión anterior en función del tiempo, se tiene

$$\dot{u}(t) = \dot{u}_s(t) + \dot{u}_d(t) \quad (2.9)$$

además, se tiene que $\dot{u}_s(t) = \frac{\dot{P}(t)}{K_D}$ y $\dot{u}_d(t) = \frac{P(t)}{C_D}$, reemplazándolos en la ecuación anterior (2.9), se obtiene la ecuación diferencial

$$P(t) + \frac{C_D}{K_D} \dot{P}(t) = C_D \dot{u}(t) \quad (2.10)$$

Luego, aplicando la Transformada de Fourier a la ecuación diferencial para llevarla al dominio de la frecuencia $\bar{\omega}$, se obtiene la siguiente ecuación

$$P(\bar{\omega}) + i\bar{\omega} \frac{C_D}{K_D} P(\bar{\omega}) = i\bar{\omega} C_D u(\bar{\omega}) \quad (2.11)$$

De la anterior ecuación se obtienen los siguientes términos

$K^*(\bar{\omega}) = \frac{C_D \lambda \bar{\omega}^2}{1 + \lambda^2 \bar{\omega}^2} + i \frac{C_D \bar{\omega}}{1 + \lambda^2 \bar{\omega}^2}$	Rigidez compleja: Es una propiedad de los sistemas viscoelásticos que describe como el sistema responde a las excitaciones en el dominio de la frecuencia.
$K_s(\bar{\omega}) = \Re[K^*(\bar{\omega})] = \frac{K_D \lambda^2 \bar{\omega}^2}{1 + \lambda^2 \bar{\omega}^2}$	Rigidez Almacenada: (representada como la parte real de la expresión de la rigidez compleja). Esta rigidez está asociada a la capacidad del sistema para almacenar energía
$K_L(\bar{\omega}) = \Im[K^*(\bar{\omega})] = \frac{C_D \bar{\omega}}{1 + \lambda^2 \bar{\omega}^2}$	Rigidez disipativa: (representada como la parte imaginaria de la expresión de la rigidez compleja). Esta rigidez está asociada con la capacidad del sistema para disipar energía
$C(\bar{\omega}) = \frac{K_L(\bar{\omega})}{\bar{\omega}} = \frac{C_D}{1 + \lambda^2 \bar{\omega}^2}$	Constante de amortiguamiento en función de la frecuencia, el cual describe cómo varía la capacidad de un sistema para disipar energía.
$\lambda = \frac{C_D}{K_D}$	Tiempo de relajación: Es el tiempo que el sistema tarda en retornar hacia su estado original (o hacia un nuevo equilibrio) después de haber sido deformado.

La Figura 5 muestra que la expresión de la rigidez almacenada en función del dominio de la frecuencia $K_s(\bar{\omega})$, para frecuencias altas, el disipador almacena rigidez hasta un valor de K_D (rigidez del sistema elástico) y la Figura 6 muestra que, para frecuencias bajas, la rigidez almacenada $K_s(\bar{\omega})$ tiende a cero, y la constante $C(\bar{\omega})$ llega a un máximo valor de C_D , lo cual hace que el sistema trabaje como puramente viscoso.

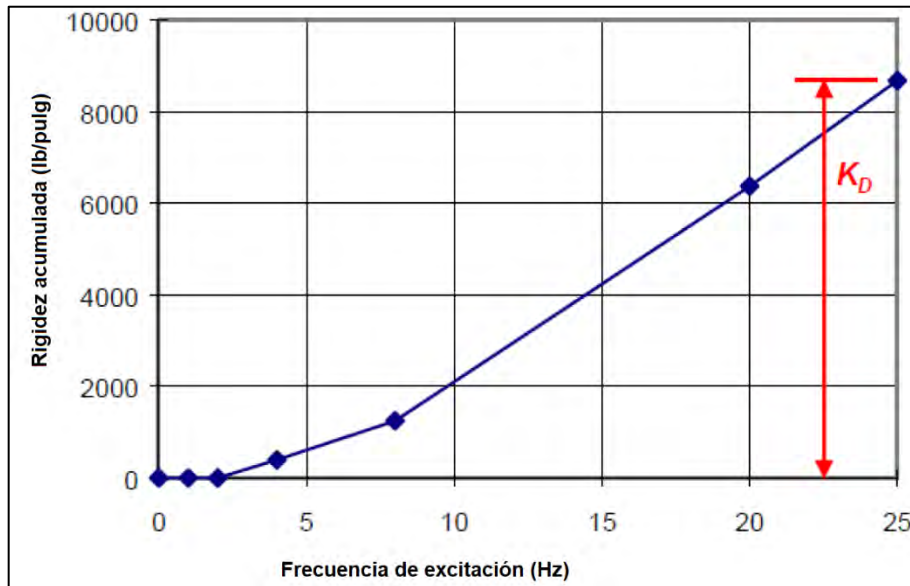


Figura 5. Rigidez acumulada vs Frecuencia de excitación, tomada de (Chávez Aguirre, 2017)

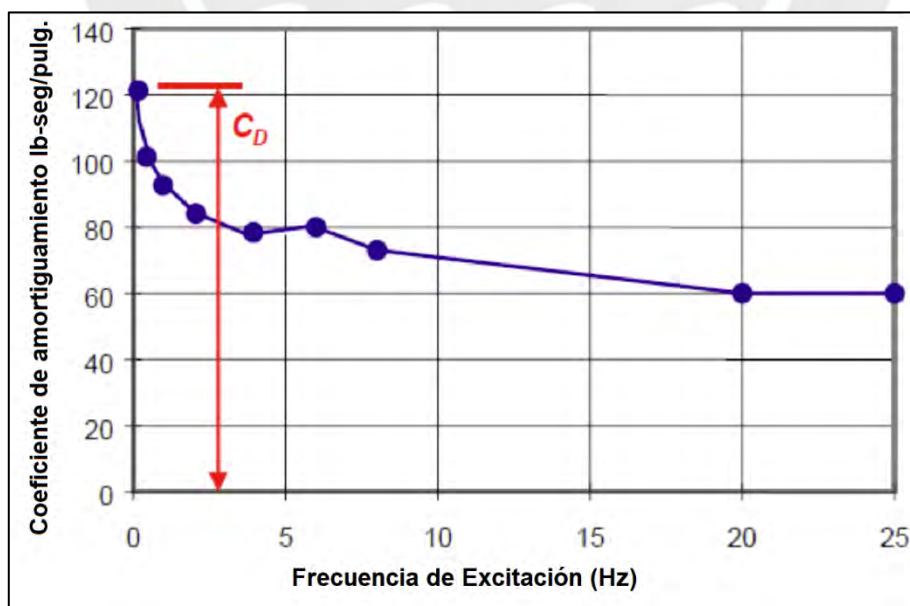


Figura 6. Coeficiente de amortiguamiento Vs Frecuencia de excitación. Tomado de (Chávez Aguirre, 2017)

2.2 Respuesta sísmica de estructuras con DFV

La investigación realizada por Constantinou y Symans (1992) fue una de las primeras en evaluar la respuesta sísmica de estructuras equipadas con DFV. En dicho estudio, se llevaron a cabo simulaciones de terremotos en estructuras de acero de uno y tres pisos, donde se observó que los disipadores exhibían un comportamiento linealmente viscoso para frecuencias menores a 4 Hz. Por encima de este umbral, los disipadores mostraban características viscoelásticas. Además, se concluyó que la temperatura influía mínimamente en el rendimiento de estos dispositivos. En cuanto a su integración en las estructuras, se encontró que la inclusión de DFV lograba reducir las distorsiones de entrepiso en un rango del 30% al 70%, y las fuerzas cortantes de entrepiso entre un 40% y 70%.

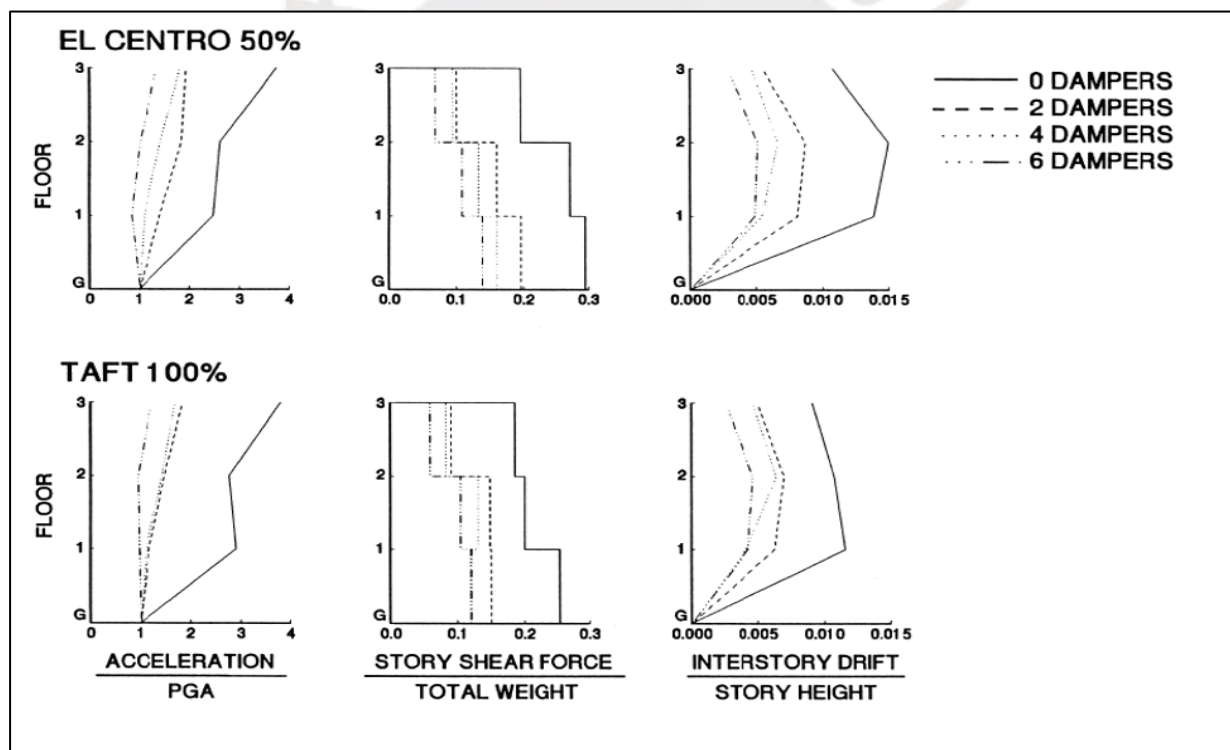


Figura 7. Aceleración, fuerza cortante por piso y distorsión de entrepiso. Tomado de (Constantinou & Symans, 1992)

La Figura 7 muestra la reducción de la aceleración, fuerzas cortantes por piso y la distorsión de entrepiso de un edificio de 3 pisos sometido a dos movimientos sísmicos. Como se puede observar, la adición de más disipadores genera una mayor reducción en la respuesta sísmica.

Posteriormente, el estudio realizado por Seleemah y Constantinou (1997) evaluó la respuesta sísmica de una estructura con DFV lineales y fue pionero en investigar la respuesta de estructuras equipadas con DFV no lineales. Al igual que en el estudio de Constantinou y Symans (1992), se analizaron estructuras de acero de uno y tres pisos que incorporaban disipadores tanto lineales como no lineales. En cuanto a la inclusión de DFV lineales en la estructura, se obtuvieron resultados consistentes con los del estudio anterior, donde se logró una reducción significativa en la fuerza cortante basal al mantenerse la estructura en régimen elástico. Sin embargo, cuando la estructura experimentaba incursiones inelásticas, no se observó una disminución en la fuerza cortante basal. Por otro lado, se encontró que los DFV no lineales lograron una mayor reducción en las distorsiones de entrepiso en comparación con los disipadores lineales, con un incremento moderado en las fuerzas cortantes. Este estudio también marcó el inicio del uso de métodos simplificados para considerar el comportamiento de disipadores no lineales en el diseño de estructuras.

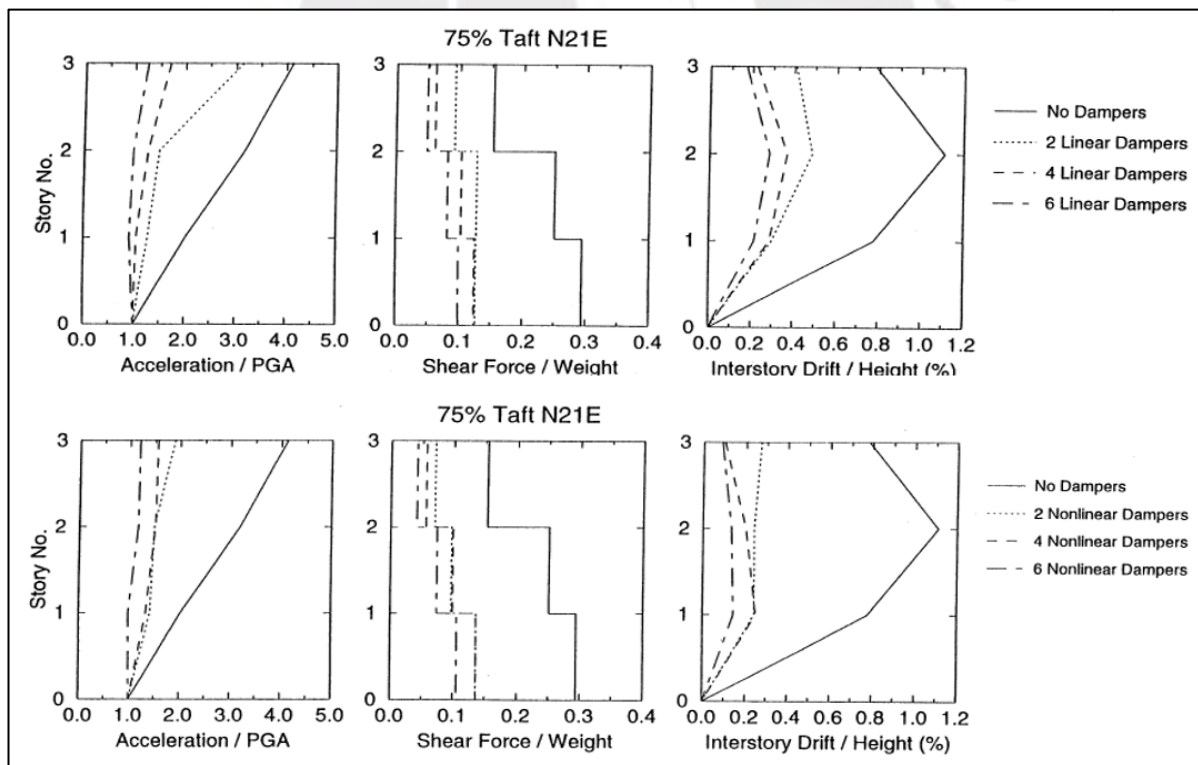


Figura 8. Aceleración, fuerzas cortantes y distorsión de entrepiso para una estructura de acero de 3 pisos con DFV lineales y no lineales. Tomado de (Seleemah & Constantinou, 1997)

La Figura 8 muestra la aceleración, fuerzas cortantes y distorsión de entrepiso de la estructura de 3 pisos equipado con disipadores lineales y no lineales sometido a un mismo registro sísmico. Se puede observar que efectivamente los disipadores no lineales logran una mayor reducción en la distorsión de entrepiso, sin embargo, la reducción de fuerzas cortantes de piso y aceleración es mucho menor.

El estudio realizado por Lin y Chopra (2002) se centró en el estudio de un sistema de 1 GDL (SDF) que incorporaba DFV no lineales, en donde entró a tallar la no linealidad considerado en un parámetro denominado α . Encontró que la no linealidad del disipador no tiene influencia en la respuesta máxima del sistema en la región espectral de la velocidad, pero se observaron diferencias de hasta un 14% en otras regiones espectrales. La reducción en las distorsiones de entre piso fueron similares a la de los estudios anteriores, sin embargo, los DFV no lineales lograron prácticamente la misma reducción que un no lineal, pero con una fuerza en el disipador significativamente menor.

En la investigación hecha por Arshad Qadri y Kacker (2022) se evaluó la respuesta sísmica de un edificio de 10 pisos de concreto armado equipado con DFV y sometido a cargas sísmicas estáticas y cargas de viento según el código indio IS 1893 2022 y Indian IS87:1987 respectivamente, este estudio mostró que se lograron reducir las derivas de entrepiso y fuerzas cortantes en un rango del 40% al 70%, lo cual es consistente con los estudios antes mencionados.

2.3 Amortiguamiento efectivo en estructuras con DFV.

Según Ramirez et al. (2000), el amortiguamiento presente en una estructura con un sistema de disipación se compone de tres factores: el amortiguamiento inherente (β_i), el amortiguamiento viscoso (β_v) y el amortiguamiento histerético (β_H).

$$\beta_{\text{eff}} = \beta_i + \beta_v + \beta_H \quad (2.12)$$

Se suele considerar un valor entre el 2% y el 5% del amortiguamiento crítico como el amortiguamiento inherente (β_i) de la estructura, el cual se produce gracias a los mecanismos de disipación de energía propios de la estructura. Por otro lado, el amortiguamiento viscoso (β_v) representa el amortiguamiento adicional que brindan los dispositivos de amortiguamiento a la estructura. Finalmente, el amortiguamiento histerético, considera la disipación de energía de la estructura cuando su desplazamiento va más allá del punto de fluencia.

De acuerdo con Chopra (2014), es conveniente representar los tres tipos de amortiguamiento (inherente, viscoso e histerético) como un único amortiguamiento viscoso equivalente.

Amortiguamiento viscoso

La Ec. (2.13) indica que el amortiguamiento viscoso se puede representar mediante la relación entre la energía disipada E_D por el sistema (estructura-disipador), para un ciclo de movimiento armónico, y la energía disipada por deformación elástica E_S . Esta simplificación es beneficiosa ya que simplifica la resolución de problemas dinámicos mediante la aplicación de métodos de superposición modal.

$$\beta_v = \frac{E_D}{4\pi E_S} \quad (2.13)$$

Según lo explicado en la sección 2.1.3, la ecuación (2.13) expresada en función al periodo elástico de la estructura, se expresa de la siguiente manera:

$$\beta_v = \frac{E_D}{4\pi E_S} = \frac{\lambda C_o \omega^\alpha u_o^{\alpha+1}}{4\pi \frac{K u_o^2}{2}} = \frac{\lambda C_o}{2\pi m} u_o^{\alpha-1} \left(\frac{2\pi}{T_e}\right)^{\alpha-2} \quad (2.14)$$

Donde la variable T_e es el periodo elástico del sistema, α es el exponente de velocidad y el coeficiente λ fue definido en la ecuación (2.5).

Para el caso de un sistema de varios grados de libertad con DFV no lineales, se aplica el mismo concepto, con lo cual la energía disipada del sistema para un ciclo de movimiento armónico viene dada por:

$$E_D = \sum_j \left(\frac{2\pi}{T_m}\right)^{\alpha j} C_{oj} \lambda_j (D_t * f_j * \varphi_{rj})^{1+\alpha j} \quad (2.15)$$

Y la energía disipada por deformación elástica viene dada por:

$$E_S = \frac{2\pi^2}{T_m^2} \sum_i \left(\frac{w_i}{g}\right) (D_t * \varphi_{im})^2 \quad (2.16)$$

La sumatoria sobre el subíndice "j" se extiende a todos los DFV y la sumatoria sobre el subíndice "i" se extiende a todos los pisos del sistema. T_m es el periodo de vibración para el modo de vibración "m", C_{oj} es la constante de amortiguamiento de cada disipador, λ_j es el parámetro lambda que depende del exponente de velocidad α , D_t es el desplazamiento del techo, $f_j = \cos \theta_j$ representa el ángulo de inclinación del DFV respecto de la horizontal, $\varphi_{rj} = \varphi_{jm} - \varphi_{(j-1)m}$ es el desplazamiento modal relativo para dos pisos consecutivos y φ_{im} es la forma modal para el modo de vibración "m" del sistema, en donde, normalizando $\varphi_{im} = 1$ corresponde al desplazamiento del techo y w_i es el peso de cada piso.

Considerando el primer modo de vibración del sistema $m=1$ y sustituyendo las ecuaciones (2.15) y (2.16) en (2.13), se obtiene:

$$\beta_{v1} = \frac{\sum_j (2\pi)^{\alpha_j} \cdot T_1^{2-\alpha_j} \cdot C_{oj} \cdot \lambda_j \cdot f_j^{1+\alpha_j} \cdot D_t^{\alpha_j-1} \cdot \varphi_{rj}^{1+\alpha_j}}{8\pi^3 \sum_i \left(\frac{w_i}{g}\right) \varphi_{i1}^2} \quad (2.17)$$

Para el caso de un sistema de varios grados de libertad con DFV lineales y un periodo de vibración "m", solo basta reemplazar el valor de $\alpha=1$ y $\lambda_j = \pi$, y se obtiene

$$\beta_{vm} = \left(\frac{T_m}{4\pi}\right) \frac{\sum_j C_{oj} \cdot f_j^2 \cdot \varphi_{rj}^2}{\sum_i \left(\frac{w_i}{g}\right) \varphi_{im}^2} \quad (2.18)$$

Amortiguamiento histerético

El amortiguamiento histerético se determina empleando el mismo concepto indicado en la ecuación (2.13).

El comportamiento inelástico de una estructura de 1 GDL se muestra en la Figura 9.

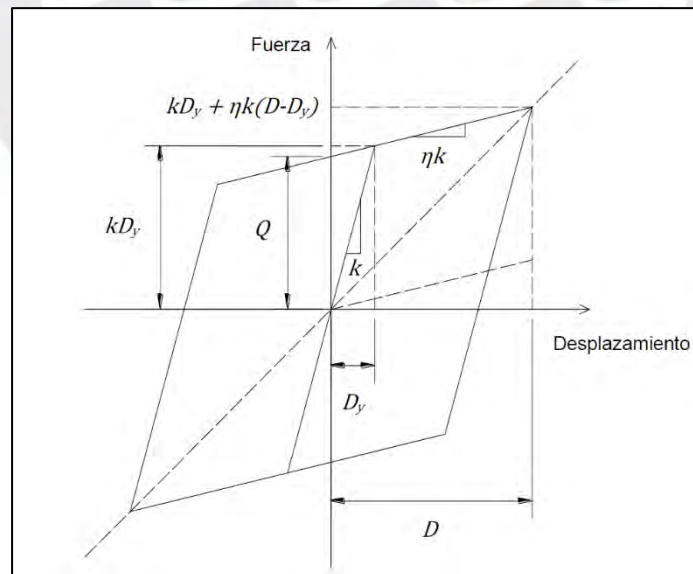


Figura 9. Lazo histerético idealizado.

Donde la demanda de ductilidad por desplazamiento se expresa como:

$$\mu = \frac{D}{D_y} \quad (2.19)$$

Las variables D y D_y son el desplazamiento máximo y desplazamiento de inicio de la fluencia de la estructura respectivamente. Para un ciclo histerético idealizado, la energía disipada viene dada por el área total del lazo histerético idealizado, en donde se tiene:

$$E_D = 4Q(D - D_y) = 4kD_y(1 - \eta)(D - D_y) = 4k\mu D_y^2(1 - \eta)(\mu - 1) \quad (2.20)$$

Donde el valor de Q representa la ordenada en el lazo histerético idealizado cuando el desplazamiento es cero, k indica la rigidez del sistema, y η es una constante que define la relación de proporcionalidad de la rigidez después de que la estructura ha alcanzado su punto de fluencia. La capacidad de la estructura para almacenar energía de deformación elástica para el mayor desplazamiento D viene dado por:

$$E_s = \frac{1}{2}D[kD_y + \eta k(D - D_y)] = \frac{1}{2}k\mu D_y^2(1 + \eta\mu - \eta) \quad (2.21)$$

Reemplazando las ecuaciones (2.20) y (2.21) en la ecuación (2.13), se tiene una expresión que indica el amortiguamiento histerético del sistema estructural

$$\beta_H = \frac{4k\mu D_y^2(1 - \eta)(\mu - 1)}{4\pi \left[\frac{1}{2}k\mu D_y^2(1 + \eta\mu - \eta) \right]} = \frac{2(1 - \eta) \left(1 - \frac{1}{\mu}\right)}{\pi(1 + \eta\mu - \eta)} \quad (2.22)$$

Para un sistema elastoplástico ($\eta = 0$) y al introducir un factor de ajuste q_H para aproximar el área real de la curva histerética, se tiene:

$$\beta_H = q_H \frac{2}{\pi} \left(1 - \frac{1}{\mu}\right) \quad (2.23)$$

El estudio de Ramirez et al. (2000) presentó expresiones para calcular el factor q_H . Para hacerlo, se utilizó el método de la fuerza lateral equivalente y se calibró el factor tomando en cuenta la región de aceleraciones y velocidades del espectro.

Los resultados mostraron que q_H está en función del factor de reducción de resistencia R_μ y de la relación T_1/T_s . Sin embargo, para simplificar el cálculo, se decidió utilizar una expresión más sencilla y conservadora como $q_H = 0.67 T_1/T_s$.

NEHRP (2000) propuso que el factor $2/\pi$ sea reemplazado por la ecuación $(0.64 - \beta_i)$ para considerar aquellas estructuras que cuenten con un amortiguamiento inherente variable distinto al 5%, por lo tanto, la expresión para calcular el amortiguamiento histerético es

$$\beta_H = q_H(0.64 - \beta_i)\left(1 - \frac{1}{\mu}\right) \quad (2.24)$$

2.4 Procedimientos simplificados de análisis y diseño de estructuras con DFV.

Para predecir el comportamiento real de las estructuras sometidas a fuerzas sísmicas, en la actualidad se utilizan procedimientos no lineales, tanto estáticos como dinámicos (tiempo-historia). Sin embargo, estos métodos de análisis requieren una descripción detallada y compleja del sistema estructural, lo que incluye el comportamiento de las secciones transversales de los elementos estructurales, las propiedades de los materiales y el movimiento del suelo. Por esta razón, a lo largo de los años se han desarrollado métodos simplificados para el análisis de edificios con DFV.

La Tabla 1 presenta de manera resumida las primeras propuestas de métodos simplificados de análisis no lineal para estructuras con DFV, tal como se encuentran en la literatura y que fueron incorporados en la normativa americana más reciente, ASCE/SEI 7-22. Seguidamente, se presenta una descripción de los métodos de análisis considerados en Federal Emergency Management Agency (FEMA 273), investigaciones como la de Tsopelas et. al. (1997) y Ramirez et al. (2000).

Tabla 1. Resumen de los métodos de análisis de edificios con DFV propuestos en códigos e investigaciones a lo largo de los años.

Año	Documento/Investigación	Contenido
1992	SEAONC Energy Dissipation Working Group	Primer borrador de requisitos para el diseño e implementación de sistemas de disipación de energía pasiva en edificios. Se adoptó una filosofía que consiste en mantener el sistema resistente a cargas gravitatorias en el régimen elástico y confinar la actividad inelástica a los disipadores. Dos tipos de disipadores fueron identificados: dependientes de la velocidad y del desplazamiento.
1994	NEHRP Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings	Se permitía utilizar los disipadores para reducir la fuerza cortante basal de la edificación. Se asumía que un edificio con disipadores sufriría el mismo o menor daño que un edificio sin ellos. Introdujo dos tipos de disipadores: dispositivos viscosos lineales y otros dispositivos de disipación de energía.
1997	NEHRP Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings (FEMA 273)	Se presentaron procedimientos unificados para la implementación de dispositivos de disipación de energía en la rehabilitación de edificios. Se promovió el uso de análisis no lineal, presentando dos métodos de análisis estático no lineal. Se identificaron dos tipos de disipadores: dependientes del desplazamiento y dependientes de la velocidad.
1999	Linear Procedures for structures with velocity-dependent dampers.	En este estudio presentado por (Sadek et al., 1999), se evalúan los procedimientos propuestos en FEMA 273 y se recomienda el uso de factores de corrección para el cálculo de la velocidad espectral.
1999	SEAOC Recommended Lateral Force Requirements	Se publicaron lineamientos para implementar dispositivos de disipación de energía pasiva en edificios. Los métodos de análisis (lineal y no lineal) eran consistentes con el Uniform Building Code. Se permitió el uso de análisis no lineal.
2000	NEHRP Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings	Se publicaron procedimientos para la implementación de dispositivos de disipación de energía en nuevas construcciones. Se desarrollaron procedimientos lineales robustos para el uso de disipadores dependientes del desplazamiento y de la velocidad. Estos procedimientos se convirtieron en el estándar nacional para la implementación de estos dispositivos.
2000	Development and Evaluation of Simplified Procedures for Analysis and Design of Buildings with Passive Energy Dissipation Systems	Estudio presentado por (Ramirez, y otros, 2000) donde se desarrollaron métodos no lineales simplificados. Se representó el comportamiento no lineal de una estructura mediante un modelo lineal equivalente, usando propiedades modales efectivas para simular la degradación de la rigidez. El estudio abordó estructuras con disipadores de fluido viscoso lineales y no lineales y determinó la mínima fuerza permitida para el diseño estructural. Estos conceptos fueron implementados en el Capítulo 18 de las normas ASCE/SEI 7-16 y ASCE/SEI 7-22.

Procedimientos No Lineales Estáticos propuestos en FEMA 273.

La respuesta sísmica de sistemas con incursiones elásticas puede ser estimadas utilizando métodos simplificados de análisis en el cual estos sistemas pueden ser reemplazados por un sistema lineal equivalente con un amortiguamiento viscoso.

El Método 2 presentado en FEMA (1997) está basado en el método espectro capacidad desarrollado por Freeman (1994) pero orientado para incluir estructuras con un sistema de amortiguamiento. A continuación, se describen de manera breve los pasos a seguir para ejecutar este método.

Paso 1. Se elabora un modelo matemático de la estructura con el sistema de disipación, estableciendo una relación entre la fuerza cortante en la base y el desplazamiento del techo, conocida como curva Pushover.

Paso 2. Se asume un desplazamiento del techo y se determina un amortiguamiento efectivo

$$\beta = \frac{W_D}{4\pi W_S},$$

en donde W_D es la energía disipada por el sistema para un ciclo de movimiento armónico, y W_S es la energía disipada para el desplazamiento asumido. El valor de W_D incluye un amortiguamiento efectivo que incluye del amortiguamiento inherente, el del sistema de disipación y el histerético. Para el valor de desplazamiento asumido y usando las propiedades modales de la estructura, la curva pushover se transforma en una curva de capacidad espectral (Sd vs Sa), en donde la aceleración espectral está representada como $S_a = \frac{V}{\bar{W}_1} g$ donde V es la cortante basal y \bar{W}_1 es el peso modal para el primer modo.

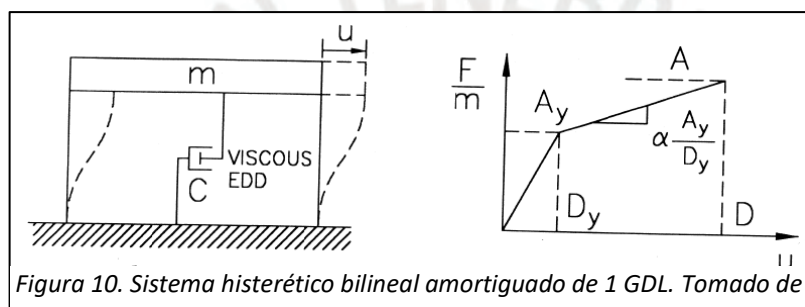
Paso 3. La curva de capacidad hallada en el paso 2 se superpone al espectro de diseño expresado en función de (Sd vs Sa) y reducido por el amortiguamiento efectivo hallado en el paso 2. El desplazamiento de demanda se determina en el punto de intersección de ambas curvas.

Paso 4. El desplazamiento asumido es comparado con el desplazamiento calculado y el proceso se repite hasta encontrar una convergencia.

Paso 5. La contribución de los modos superiores a la respuesta total se calcula de manera similar, pero asumiendo un comportamiento elástico, finalmente la respuesta final se obtiene por medio de una regla de combinación.

Procedimientos propuestos por (Tsopelas et al, 1997)

El estudio de Tsopelas et al. (1997) empleó el Método 2 propuesto en FEMA 273 para analizar estructuras nuevas con incursiones inelásticas y equipadas con DFV. El estudio se basó en considerar una estructura de 1 grado de libertad con un comportamiento histerético bilineal con amortiguamiento agregado por DFV, tal como lo muestra Figura 10.



(Tsopelas et al., 1997)

Procedimientos propuestos por (Ramírez et al, 2000)

El estudio de Ramírez et al. (2000) extendió el estudio de Tópelas et al. (1997) e incluyó DFV no lineales en los análisis. En este estudio presentó expresiones para calcular el amortiguamiento viscoso agregado por los DFV no lineales, el cálculo de las respuestas sísmicas máximas dependientes del desplazamiento, velocidad, y aceleración considerando incursiones inelásticas de la estructura, y además planteó que el amortiguamiento viscoso efectivo debería estar compuesto por el inherente, viscoso e histerético. Por último, detalló el límite mínimo de la fuerza cortante basal de diseño de una estructura con disipadores. Finalmente, estos métodos fueron incluidos en la actual norma americana ASCE/SEI 7-22 (Capítulo 18) y se denominan métodos de análisis alternativos.

2.5 Suposiciones para el análisis de edificios de varios grados de libertad con DFV.

Según el estudio de Pekcan et al. (1999) y Ramirez et al. (2000), hay que tener en cuenta cuatro supuestos al momento de utilizar los métodos simplificados.

- Se requiere que el edificio en estudio tenga un mecanismo de colapso de un solo grado de libertad que implica la aparición de rótulas plásticas en las vigas y bases de las columnas. Además, la deformación del sistema debe ser similar a la forma modal fundamental del edificio, específicamente, debe presentar una deformación plástica con forma de triángulo invertido para el modo fundamental, lo que asegura la respuesta del sistema en este modo durante todas las etapas de análisis.
- El edificio se sometió a un análisis en 2D sin tener en cuenta los efectos de torsión en planta. También se tuvo en cuenta 1 GDL traslacional por planta del edificio.
- El comportamiento del edificio se representó por medio de un diagrama elastoplástico.
- El cortante plástico del edificio V_y se puede estimar como el cortante de diseño reducido amplificado por el factor de sobre resistencia Ω_o .

2.6 Respuesta Espectral Modificada por amortiguamiento.

En la actualidad, las regulaciones para el diseño de estructuras resistentes a sismos se basan en métodos que utilizan espectros elásticos de pseudo aceleraciones para obtener las cargas sísmicas. Estos métodos se fundamentan en la respuesta de un sistema viscoelástico lineal de 1 GDL y consideran un amortiguamiento del 5% del crítico. Por lo tanto, se supone que el sistema que se está analizando tiene este valor como su amortiguamiento inherente.

En el análisis y diseño de estructuras con sistemas de disipación de energía se requiere la utilización de espectros de pseudo aceleraciones que tengan en cuenta la reducción en la respuesta causada por amortiguamientos superiores al 5%. Por lo tanto, las ordenadas espectrales deben ser modificadas mediante un factor de reducción por amortiguamiento (B). Esta relación se expresa mediante la ecuación (2.25)

$$Psa(\beta, T) = \frac{Psa(0.05, T)}{B} \quad (2.25)$$

Donde $Psa(\beta, T)$ es la aceleración espectral para una razón de amortiguamiento crítico β y un periodo de vibración T.

Es importante notar que la pseudo aceleración está asociada al desplazamiento espectral (S_d) y también a la pseudo velocidad (S_v) por medio de la frecuencia angular natural, por tal motivo el factor de reducción (B) también afecta a estas variables.

Uno de los primeros estudios en los que se calculó el factor B fue realizado por Newmark y Hall (1982), quien propuso factores de reducción de la respuesta para niveles de amortiguamiento superiores al 5% del crítico y fue pionero en el uso del enfoque modal espectral como procedimiento de diseño. El estudio sugería formulaciones para reducir el desplazamiento espectral de un sistema viscoelástico lineal.

La ecuación (2.26) fue propuesta por Newmark y Hall (1982), donde B es el factor de reducción de respuesta debido a un amortiguamiento β para la región de velocidad constante del espectro.

$$B = \frac{1.65}{2.31 - 0.41 \ln(100\beta)} \quad (2.26)$$

Los valores indicados en la ecuación (2.26) fueron adoptados por FEMA (1997) y extendieron su aplicabilidad para ratios de amortiguamiento superiores al 20%.

La extensión a valores más altos del coeficiente de amortiguamiento fue necesaria, ya que los métodos simplificados de análisis introducidos en FEMA 273 dieron lugar a un alto amortiguamiento efectivo debido a los efectos combinados de las incursiones inelásticas del edificio y el amortiguamiento viscoso adicional.

Posteriormente, en el estudio realizado por Ramirez et al. (2000) se utilizó un grupo de 20 registros sísmicos escalados para construir espectros de respuesta elástica que considere ratios de amortiguamiento en un rango de 2% a 100%.

El coeficiente de reducción por amortiguamiento (B), respecto a un ratio de 5%, se calculó mediante la siguiente expresión.

$$B = \frac{Psa(0.05, T)}{Psa(\beta, T)} \quad (2.27)$$

Donde, $Psa(0.05, T)$ es el valor de la aceleración espectral para un amortiguamiento del 5% y $Psa(\beta, T)$ es la aceleración espectral para un amortiguamiento β variable.

La investigación de Ramirez et al. (2000) propuso un modelo trilineal del comportamiento del factor de reducción por amortiguamiento (B) vs el Periodo (T), tal y como se observa en la Figura 11. Para la región de velocidad constante del espectro ($T > T_s$), el valor de B permanece constante, sin embargo, para periodos menores a T_s , estos disminuyen hasta llegar a la unidad. Finalmente, los valores de B fueron considerados en FEMA (2001) y posteriormente en la actual norma norteamericana ASCE/SEI 7-22.

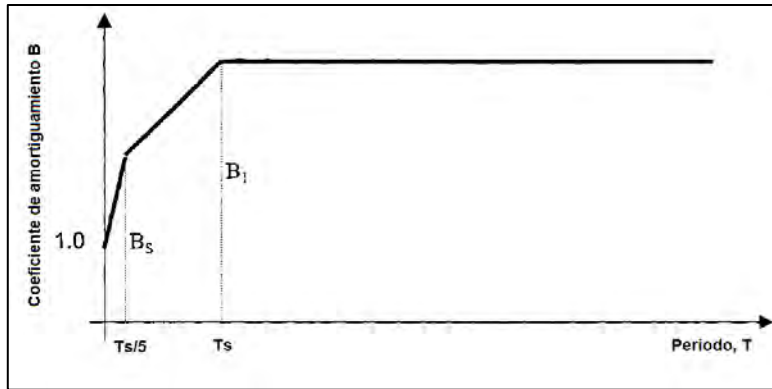


Figura 11. Propuesta de la relación entre el coeficiente de reducción por amortiguamiento B y el periodo de vibración. Adaptado de (Ramirez et al., 2000)

2.6.1 Coeficiente de reducción por amortiguamiento para la sismicidad peruana.

En este apartado, siguiendo lo realizado por Ramirez et al. (2000), se evaluó el coeficiente de reducción por amortiguamiento (B) con fines de comparar con los coeficientes existentes en la literatura. Para ello se utilizaron 7 pares de señales sísmicas de terremotos de subducción en la costa-sur del Perú y norte de Chile, para un rango de amortiguamiento crítico del 2% al 100%. Las señales seleccionadas se muestran en la Tabla 2. El promedio de las 14 señales escaladas (2 por cada par) para amortiguamiento de 2% a 100% se muestran en las Figura 12 y Figura 13. El coeficiente B por amortiguamiento fue determinado como el cociente de la pseudoaceleración del espectro con 5% y los amortiguamientos desde 2% a 100%.

Tabla 2. Sismos empleados (Fuente <http://cecos.cismid-uni.org>)

Año	Terremoto	Estación	Aceleración Máxima del suelo			Magnitud
			Componente EW (cm/s ²)	Componente NS (cm/s ²)	SRSS	
1966	Lima	Parque de la Reserva	259	247	358	8.1Mw
1970	Ancash	Parque de la Reserva	95.25	90.51	131	7.9Mw
1974	Lima	Parque de la Reserva	191.89	178.86	262	7.6Ms
2001	Ático	César Vizcarra	239.03	230.60	332	8.4Mww
2005	Moquegua	Alberto Giesecke Matto	119.11	111.15	134.65	7.2ML
2007	Pisco	Única	209.40	299.57	366	8.0 Mwc
2014	Iquique	Alberto Giesecke Matto	71.29	65.27	96.66	8.2 Mw

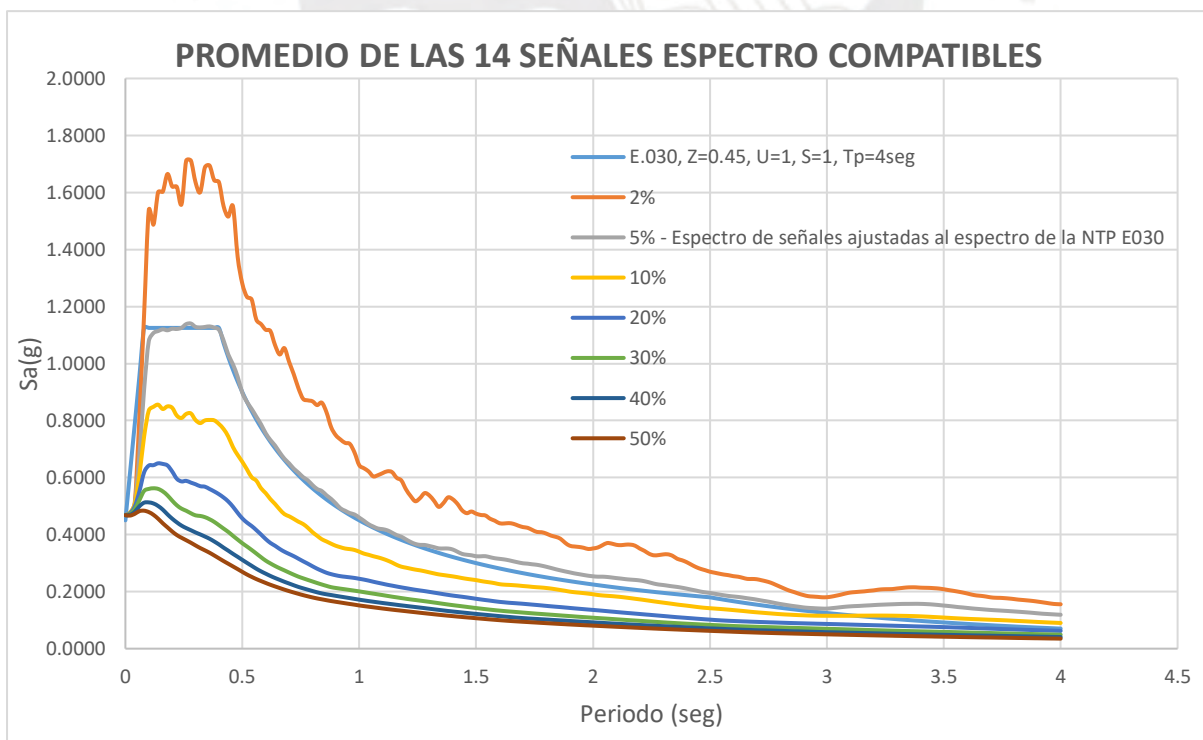


Figura 12. Promedio de las 14 señales para un amortiguamiento de 2% a 50%

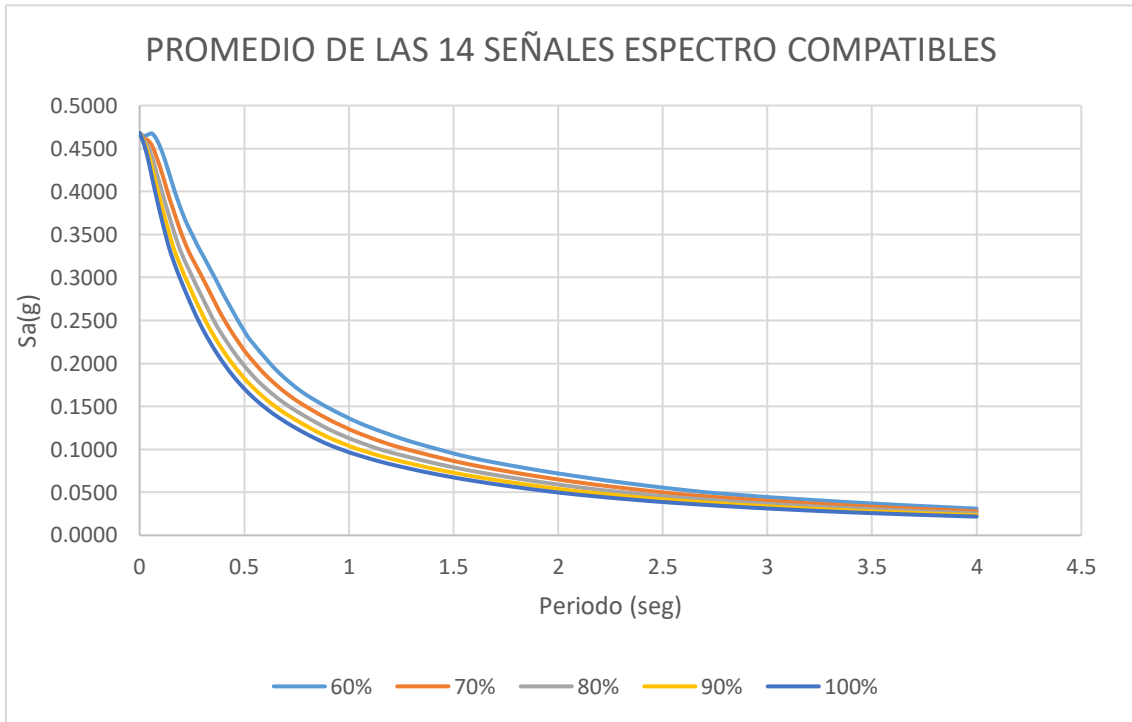


Figura 13. Promedio de las 14 señales para un amortiguamiento de 60% a 100%

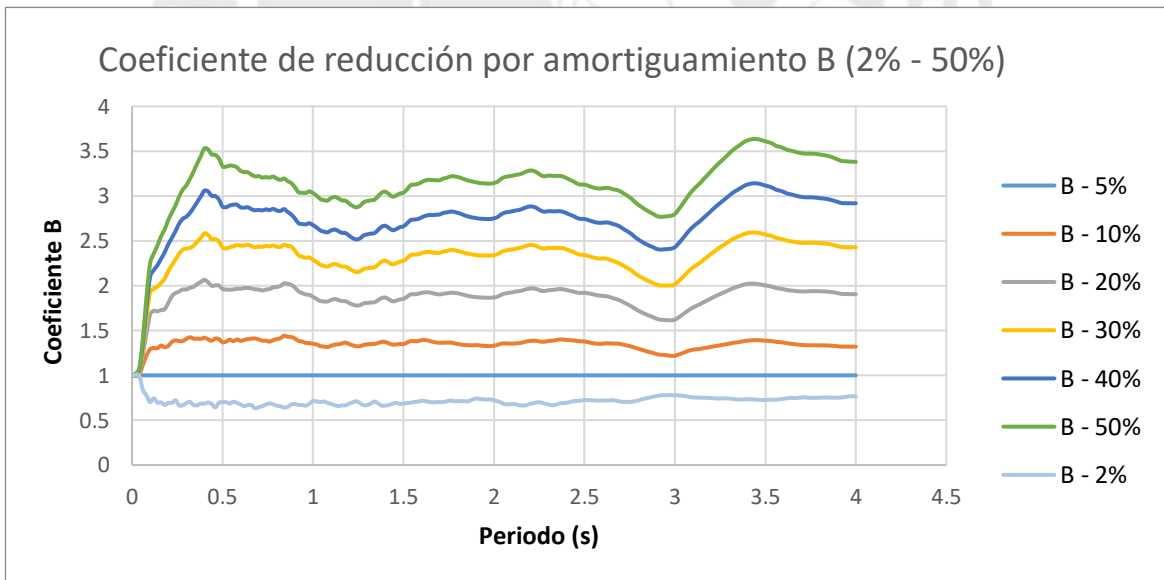


Figura 14. Coeficiente de reducción por amortiguamiento B para (2% - 50%)

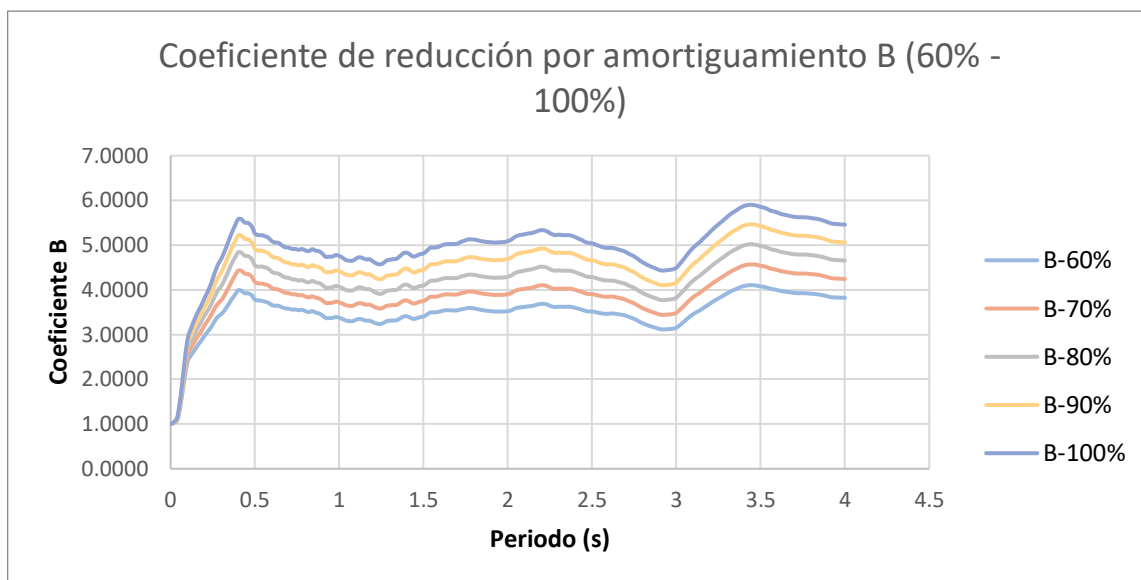


Figura 15. Coeficiente de reducción por amortiguamiento (60% - 100%)

La Tabla 3 muestra los factores B hallados como el promedio de la división de las pseudo aceleraciones de (2% – 100%) entre las pseudo aceleraciones de 5% en la región de las velocidades del espectro (con $T_p = 0.4$). Estas cifras son típicas de los terremotos de subducción que se han producido en el norte de Chile y a lo largo de la costa sur de Perú. Además, se muestra un comparativo de los valores propuestos por Newmark y Hall (1982), Ramirez et al. (2000), la norma americana ASCE/SEI 7-22, Mendo (2015), FEMA 440 (2005), Eurocodigo 8 (2005) y los hallados en el presente trabajo.

Tabla 3. Factores de reducción de respuesta por amortiguamiento (B)

Amortiguamiento (%)	Newmark & Hall (1982)	Ramírez (2000)	ASCE/SEI 7-22	Mendo (2015)	FEMA 440	Eurocódigo 8 (2005)	Tesis (Registros peruanos)
2	0.81	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.70
5	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
10	1.21	1.20	1.20	1.25	1.20	1.20	1.35
20	1.53	1.50	1.50	1.70	1.50	1.60	1.86
30	1.80	1.70	1.80	2.05	1.80	1.90	2.28
40	2.07	1.90	2.10	2.35	2.10	2.10	2.66
50	2.34	2.20	2.40	2.65	2.40	2.30	3.03
60	2.61	2.60	2.70	-	-	-	3.38
70	2.90	2.90	3.00	-	-	-	3.73
80	3.21	3.30	3.30	-	-	-	4.07
90	3.55	3.70	3.60	-	-	-	4.41
100	3.91	4.00	4.00	-	-	-	4.75

Los valores obtenidos en la tesis con registros peruanos muestran un comportamiento diferenciado respecto a las normativas y estudios internacionales. Para un de amortiguamiento 2%, los valores son similares o ligeramente menores en comparación con Newmark & Hall (1982) y las normativas internacionales como ASCE/SEI 7-22 y Eurocódigo 8. Sin embargo, a partir del 10%, los valores de los registros peruanos tienden a ser más altos, lo que indica un enfoque más conservador en la reducción de la demanda sísmica, particularmente para amortiguamientos elevados (30% o más).

En los rangos de 20% a 50%, las diferencias entre los registros peruanos y las normativas internacionales se vuelven más relevantes, con los valores locales superando consistentemente a los propuestos en estudios como Ramírez (2000), FEMA 440, y el Eurocódigo 8.

Aunque los valores obtenidos en la tesis aportan información relevante para el contexto peruano, su uso generalizado podría ser complejo debido a la falta de una expresión paramétrica que permita calcular el factor de reducción de demanda sísmica "B" para cualquier porcentaje de amortiguamiento. En contraste, el modelo de Newmark & Hall (1982) ofrece una fórmula que facilita este cálculo, siendo ampliamente aceptada y utilizada en normativas internacionales.

Por lo tanto, por motivos de practicidad y estandarización, en el presente trabajo, se utilizaron los valores propuestos por Newmark & Hall (1982), ya que presentan una expresión matemática que permite calcular B para cualquier porcentaje de amortiguamiento utilizando la Ec. (2.26).

CAPÍTULO III: Revisión de normativas internacionales

En el presente capítulo se realizará una revisión general de cuatro lineamientos de análisis y diseño sísmico de estructuras con DFV, con el fin de comparar sus similitudes y diferencias, y en función a ello, hacer una propuesta de modelo de norma peruana presentada en el capítulo IV. Los códigos de diseño analizados son la norma norteamericana “Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures (ASCE/SEI 7-22), norma chilena NCh3411 “Diseño sísmico de edificios con sistemas pasivos de disipación de energía – Requisitos y métodos de ensayo”, norma mexicana “Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo (NTCS-20)” y el estándar europeo “Antiseismic devices” EN 15129:2018.

El análisis se centrará en las siguientes secciones: Requisitos generales de diseño, acciones de diseño sísmico, selección del tipo de análisis, y pruebas de los disipadores.

3.1 Normativas de referencia.

Normativa americana ASCE/SEI 7-22

El capítulo 18 de la norma americana ASCE/SEI 7-22 (American Society of Civil Engineers, 2022), titulado "Seismic Design Requirements for Structures with Damping Systems", denominada como norma americana, se centra en el diseño y análisis de estructuras equipadas con dispositivos de disipación de energía, esenciales para mitigar los efectos sísmicos en edificaciones. Este capítulo proporciona lineamientos detallados sobre los tipos de disipadores de energía, incluyendo dispositivos dependientes de la velocidad y desplazamiento, así como los procedimientos de análisis no lineales y alternativos definidos como procedimientos de Respuesta Espectral y Fuerza Lateral Equivalente. Además, se incluyen criterios de aceptación, requisitos de desempeño, y directrices para la verificación experimental y ensayos de laboratorio de estos dispositivos. La elaboración de este capítulo se fundamentó en una extensa bibliografía, incluyendo normativas anteriores como FEMA P-1050 y AISC 341, investigaciones de instituciones como el Earthquake Engineering Research Institute (EERI) y el Pacific Earthquake Engineering Research Center (PEER).

Normativa chilena NCh3411:2017

La norma chilena NCh 3411 (Instituto Nacional de Normalización - INN, 2017), titulada "Diseño sísmico de edificios con sistemas pasivos de disipación de energía – Requisitos y métodos de ensayo", en adelante denominada como norma chilena, presenta, al igual que la norteamericana, lineamientos para la implementación de dispositivos de disipación de energía en estructuras, con el objetivo de mejorar la seguridad y el desempeño sísmico de los edificios. Esta normativa se aplica tanto a edificaciones nuevas como existentes y abarca una clasificación de diferentes tipos de disipadores, incluyendo fluidos viscosos e histeréticos. Los procedimientos de análisis y diseño estructural descritos incorporan métodos de respuesta no lineal en el tiempo y de respuesta espectral, asegurando que las construcciones cumplan con los niveles de desempeño esperados durante eventos sísmicos. Además, la norma define criterios de desempeño y aceptación específicos, y establece requisitos rigurosos para la verificación experimental y ensayos de laboratorio, garantizando que los disipadores cumplan con las especificaciones técnicas y de desempeño. Asimismo, incluye recomendaciones para la correcta instalación y mantenimiento de los dispositivos, asegurando su efectividad a lo largo del tiempo.

Normativa mexicana NTCS-20

El Apéndice B de la norma mexicana (Reglamento de Construcciones del Distrito Federal, 2020), titulada "Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo (NTCS-20)", en adelante denominada como norma mexicana, proporciona alcances para el diseño, análisis y evaluación de edificios equipados con disipadores de energía sísmica. Este apéndice cubre criterios generales de diseño y define requisitos esenciales para integrar eficientemente los disipadores en el sistema estructura-disipador. Además, especifica procedimientos para la inspección de estructuras y proporciona lineamientos para la realización de pruebas de laboratorio, incluyendo control de calidad y requisitos de rendimiento.

Estándar europeo “Antiseismic devices” EN 15129:2018

La EN 15129:2018 (European Committee for Standardization, 2018), titulada "Anti-Seismic Devices", en adelante denominado como estándar europeo, se centra principalmente en los ensayos, instalación y mantenimiento de dispositivos de disipación de energía, garantizando que estos elementos mejoren significativamente el comportamiento sísmico de las estructuras. En particular, el Capítulo 7 presenta requisitos para el funcionamiento de los disipadores, características de los materiales de fabricación, requerimientos generales de diseño, y lineamientos de ensayos y control de calidad. Complementando esta normativa, el Eurocódigo 8 (EN 1998) ofrece principios generales para el análisis sísmico, aunque no detalla procedimientos específicos para el análisis de edificios con DFV.

3.2 Requisitos generales para el diseño del sistema estructural.

Las normativas y estándares internacionales establecen lineamientos fundamentales para el diseño de estructuras con DFV, planteando para ello requisitos generales de diseño. A continuación, se presenta un comparativo acerca de los requisitos generales para el diseño del sistema estructural de las 4 normativas indicadas anteriormente.

La norma americana establece que, tanto la estructura sismorresistente como el sistema de disipación deben cumplir con ciertos requisitos generales de diseño. Es importante destacar que esta normativa indica de manera individual los requisitos generales de diseño para el sistema sismorresistente, conformado por todos los elementos estructurales que soportan las cargas gravitacionales y sísmicas, así como para el sistema de amortiguación, compuesto por los DFV y sus elementos de fijación a la estructura. Finalmente, indica que la combinación de ambos sistemas se usa para determinar los desplazamientos y máximas derivas permitidas. Para el sistema sismorresistente, la norma americana establece que, las estructuras deben satisfacer, en cada dirección de análisis, una fuerza cortante basal mínima dada por el mayor valor de $V_{min} = \frac{V}{B_{v+i}}$ y $V_{min} = 0.75V$. Aquí, V es la cortante basal

sísmica en la dirección de interés del sistema estructural sin incluir el sistema de disipación, y B_{v+i} es el coeficiente de reducción debido al amortiguamiento efectivo para el modo fundamental de vibración de la estructura. El amortiguamiento efectivo para un comportamiento elástico de la estructura está compuesto por el amortiguamiento inherente (β_i) de la estructura más el amortiguamiento viscoso (β_v) dado por el sistema de disipación. Además, indica que el sistema puede ser diseñado considerando 1.0V en caso de que haya menos de dos dispositivos de amortiguamiento por piso, configurados para resistir la torsión o que el edificio presente irregularidades en planta o altura.

Por su parte, la norma chilena, basada en la norma americana ASCE/SEI 7-10 indica que, sus criterios son más estrictos respecto a su par norteamericana. Además, es más conservadora con los requerimientos debido a que esta es la primera norma que propone el diseño sísmico de estructuras con disipadores de energía; sin embargo, a través del tiempo pueden ser modificados y ajustados de acuerdo a eventos sísmicos posteriores. Esta norma considera tres categorías de sistemas sismorresistentes dependiendo de la función que desempeñan los disipadores de energía. La primera categoría se refiere a los sistemas de disipación de energía que forman parte del sistema sismorresistente de la estructura y han sido incorporados con el fin de mejorar el comportamiento sísmico de la edificación. Ejemplos de estos sistemas son los sistemas de diagonales con pandeo restringido, los sistemas disipadores de energía basados en fricción y otros sistemas histeréticos. Es necesario que el sistema disipador reciba no menos del 75% del corte basal total de la estructura y se requiere la realización de un extenso programa de ensayos de prototipos a nivel de subsistemas y de dispositivos de manera individual. La segunda categoría incluye los sistemas de disipación de energía que no cumplen con los requisitos para ser clasificados en la primera categoría. En esta categoría se incluyen los disipadores de energía considerados en adición al sistema sismorresistente principal para mejorar la respuesta sísmica de la estructura, controlar el daño en secciones críticas de la estructura o para mejorar el confort de los ocupantes. Para que un sistema sismorresistente clasifique en esta categoría se requiere una reducción no menor a

un 20% en la energía que debe disipar la estructura sismorresistente cuando se incorporan los disipadores de energía en la estructura. La tercera categoría abarca aquellas estructuras en las que los sistemas de disipación tienen una contribución menor en el control de la respuesta sísmica y estructural. La estructura sismorresistente debe ser diseñada en función a lo que indica el código de diseño sísmico chileno NCh 433.Of96 Diseño sísmico de edificios, modificando o adicionando disposiciones que tomen en cuenta los efectos derivados de la incorporación de dispositivos de disipación de energía. El cortante basal mínimo exigido viene dado por el mayor valor que resulte de las ecuaciones $V_{min} = Q_{SDS}$ y $V_{min} = \left(\frac{IA_oSP}{B_1 6g}\right)$, en donde B_1 es el coeficiente de reducción debido al amortiguamiento efectivo agregado por los dispositivos de disipación. Para sistemas sismorresistentes de categoría 1 B_1 es igual 1.33 para cada dirección de análisis, mientras que para los sistemas sismorresistentes de categoría 2 o 3, B_1 es igual al cociente de los cortantes basales del edificio que incluye y no incluye disipadores de energía.

La norma mexicana NTCS-20 denomina al sistema sismorresistente como un sistema primario, el cual es capaz de resistir tanto fuerzas laterales y de gravedad. Este sistema, combinado con el sistema secundario conformado por los disipadores y sus conexiones al sistema primario, forman el sistema estructura disipador. El sistema primario debe ser diseñado de manera convencional tomando en consideración lo indicado en su Capítulo 2. Sin embargo, la norma indica que se deben hacer modificaciones a los métodos de análisis para poder aplicarlos al análisis de edificios con DFV; es decir, se deben considerar los factores de reducción de respuesta por amortiguamiento. A diferencia de las normativas americana y chilena, la NTCS-20 no presenta restricciones sobre el cortante mínimo basal para el diseño del sistema estructura disipador.

Por otro lado, el estándar europeo no presenta requisitos generales para el diseño de estructuras con DFV. Sin embargo, menciona que el diseño de las estructuras sismorresistentes debe realizarse considerando los lineamientos presentados en el Eurocódigo 8 (EN 1998-1:2004), el cual ofrece principios generales y métodos para el análisis

sísmico de estructuras, pero no presenta requisitos específicos para el análisis y diseño de edificios con DFV.

A través de esta comparación, se puede observar que mientras la normativa americana y chilena proporcionan restricciones para el cortante basal, la norma mexicana es más flexible en cuanto a restricciones de cortante basal, por el contrario, el estándar europeo se enfoca en principios generales sin especificar requisitos para establecer un cortante de diseño para edificios que incluyan disipadores de energía.

A continuación, se muestra la Tabla 4 en donde se observa de manera resumida un comparativo de los requisitos generales de diseño para el sistema sismorresistente.

Tabla 4. Comparación de los requisitos generales de diseño del sistema sismorresistente.

Aspecto	Norma americana	Norma chilena	Norma mexicana	Estándar europeo
Sistema Sismorresistente	Fuerza cortante basal mínima: El mayor valor de $V_{min} = \frac{V}{B_v+i}$ $V_{min} = 0.75V$	Tres categorías según función de disipadores. Cortante basal mínimo: $V_{min} = Q_{SDS}$ $V_{min} = \left(\frac{IA_oSP}{B_1 6g} \right)$	Sistema primario diseñado convencionalmente con modificaciones por amortiguamiento. Sin restricciones sobre cortante mínimo basal.	Diseñado según Euro código 8. No presenta requisitos específicos para análisis y diseño con disipadores
Reducción de la fuerza cortante basal en la etapa elástica por amortiguamiento agregado.	Considera la reducción de cortante basal	Considera la reducción del cortante basal por un factor establecido $B_1=1.33$	Considera la reducción de cortante basal	No especifica un cortante basal mínimo

Q_{SDS} = Cortante basal obtenido de aplicar el espectro de sismo de servicio chileno

A_o = Aceleración efectiva máxima del suelo de acuerdo a NCh433

S = Parámetro que depende del tipo de suelo de acuerdo a NCh433

P = Peso sísmico del edificio sobre el nivel basal de acuerdo a NCh433

3.3 Requisitos generales para el diseño del sistema de amortiguamiento.

Al analizar las normativas internacionales sobre el diseño de sistemas de amortiguamiento, se identifican similitudes, diferencias y omisiones en diversos aspectos fundamentales que definen su aplicación práctica. En cuanto a los tipos de dispositivos, las normas presentadas clasifican los dispositivos en dependientes de desplazamiento y de velocidad.

La definición del sistema de amortiguamiento tanto en las normas chilena y americana lo describen como un conjunto que abarca tanto los dispositivos de disipación como los elementos de sujeción (brazos metálicos, conexiones, etc.) necesarios para transferir las fuerzas al sistema sismorresistente, lo que implica una integración clara entre ambos. Por su parte, la norma mexicana lo define como un sistema secundario que complementa al sistema primario (sistema sismorresistente), por último, el estándar europeo se enfoca más en los dispositivos individuales que en la idea de un sistema en su totalidad.

En cuanto al diseño del sistema de amortiguamiento, la normativa americana indica en su apartado de comentarios que los elementos de sujeción de los DFV deben ser diseñados con una fuerza cortante proveniente de un análisis para un Sismo Máximo Considerado y tener un comportamiento elástico, por su parte la norma chilena tiene similar alcance. Además de ello, estas fuerzas deben amplificarse en un 20% y 15% respectivamente. La normativa mexicana indica el uso de un espectro de diseño para el caso del estado límite de prevención de colapso amplificado en un 20% y el estándar europeo no mencionan el uso de un espectro de diseño para un SMC, pero sí especifica que las fuerzas de diseño deben amplificarse en un 10%. Adicionalmente, la norma americana señala que, para determinar la fuerza máxima de diseño del sistema disipador, se debe realizar una combinación de las fuerzas que inciden en la estructura correspondientes al desplazamiento y velocidad máximos relativos utilizando para ello factores de combinación. Por su parte, la norma mexicana establece que la fuerza de diseño debe ser el mayor valor entre la fuerza generada por el máximo desplazamiento y velocidad relativa. En contraste, la norma chilena y el estándar europeo no proporcionan indicaciones específicas sobre la consideración de la fuerza máxima para el diseño.

Las consideraciones en el diseño abarcan aspectos como la degradación a lo largo del tiempo, donde todas las normativas coinciden en la importancia de tener en cuenta factores ambientales y cíclicos que pueden afectar la integridad de los dispositivos. Sin embargo, el estándar europeo proporciona un enfoque más riguroso al abordar específicamente la expansión térmica en los DFV, lo que no se detalla con tanto énfasis en las otras normativas.

En cuanto a los puntos de conexión de los disipadores con el sistema estructural, tanto la norma americana, chilena y mexicana coinciden en que estas conexiones deben permitir suficiente articulación para acomodar desplazamientos en múltiples direcciones. Sin embargo, el estándar europeo no aborda en profundidad este aspecto, centrándose más en las características de los dispositivos.

La Tabla 5 presenta un cuadro comparativo de la clasificación, definición y criterios de diseño del sistema de amortiguamiento contemplado en las normas americana, chilena, mexicana y estándar europeo.

Tabla 5. Comparativo de la clasificación, definición y criterios de diseño del sistema de amortiguamiento.

Aspecto	Norma americana	Norma chilena	Norma mexicana	Estándar europeo
Clasificación de Dispositivos	Dependientes del desplazamiento y velocidad	Dependientes del desplazamiento y velocidad	Dependientes del desplazamiento y velocidad	Dependientes del desplazamiento y velocidad
Diseño del sistema disipador	Diseño para un SMC, verificar que los elementos de sujeción permanezcan elásticos. Aumento de 20% en las fuerzas.	Diseño elástico para un SMC incrementado en 15%	Diseño elástico para un espectro de prevención de colapso incrementado en 20%	Especifica solo un incremento del 10% en las fuerzas. No especifica un diseño para un SMC
Fuerza máxima de diseño del sistema disipador.	Combinación de las fuerzas generadas por el desplazamiento y velocidad máximos relativos de la estructura.	No se indica un procedimiento específico para determinar la fuerza máxima.	Se considera el mayor valor de la fuerza generada por el desplazamiento y velocidad relativos de la estructura	No se indica un procedimiento específico para determinar la fuerza máxima.

*SMC: Sismo Máximo Considerado

3.4 Acciones de diseño sísmico.

Las cuatro normas de diseño analizadas en esta sección establecen las acciones sísmicas de diseño a través de espectros de diseño, cuyas características están determinadas por el peligro sísmico de la zona en cuestión. Se aborda en detalle dos aspectos clave: los espectros específicos para cada sitio y los factores de reducción de respuesta debidos al amortiguamiento adicional.

3.4.1 Espectros específicos de sitio

Norma americana

La sección 18.2.2 establece que, para el análisis y diseño de estructuras con amortiguamiento suplementario, se deben considerar tanto un Sismo de Diseño como un Sismo Máximo Considerado (MCER) como excitaciones sísmicas. El Sismo de Diseño corresponde a dos tercios del Sismo Máximo Considerado. Ambos espectros se construyen siguiendo las especificaciones detalladas en el apartado 11.4.4.

El apartado indica la manera en que se deben obtener los parámetros de aceleraciones espectrales SDS y SD1, donde el término SDS está definido como los dos tercios de la aceleración espectral para periodos cortos para un Sismo Máximo Considerado (MCER) con un 5% de amortiguamiento ($SDS = 2/3 SMS$) y SD1 está definido como los dos tercios de la aceleración espectral para un periodo de 1 segundo para un SMC con un 5% de amortiguamiento ($SD1 = 2/3 SM1$).

Se indica, además, que los parámetros de aceleración espectral SMS y SM1 se obtienen de la base de datos USGS Seismic Design Geodatabase según el sitio donde se encuentre la estructura.

Para determinar el espectro de diseño, la norma americana propone, en su apartado 11.4.5.1, como primer método, el uso de un espectro de respuesta multiperiodo (MPRS, por sus siglas en inglés) que permite mejorar la precisión del contenido de frecuencia del movimiento sísmico de diseño y por lo tanto incrementar la confiabilidad de los parámetros de diseño

sísmico obtenidos a partir de tales movimientos de terreno. Esta metodología permite definir el MCER para 22 periodos diferentes (desde el PGA hasta 10 segundos) para la clase de sitio de interés. Tiene como ventaja importante la mejora en los procesos de selección y escalamiento de registros sísmicos para los análisis tiempo historia no lineales.

Como un segundo método, en su apartado 11.4.5.2, la norma americana propone un método alternativo para determina el espectro de diseño denominado Espectro de Respuesta de Diseño de dos periodos, el cual es similar al método propuesto por la norma antecesora ASCE 7-16, este método alternativo se utiliza para la caracterización de los movimientos de terreno para los casos en los que no se disponga de los valores para determinar un espectro multiperiodo de la USGS.

En el estudio de Kircher et al. (2019) establece que, para el caso en que se deban definir cargas sísmicas utilizando métodos de análisis de fuerzas simplificados, el cálculo de los aceleraciones de diseño SMS y SM1, se calculan de manera similar a lo expuesto en la norma antecesora ASCE 7-16.

La Figura 16 indica un comparativo entre los dos métodos antes mencionados, la línea roja indica el espectro hallado con el método del espectro de diseño multiperiodo y la línea negra es el espectro de diseño convencional considerado en las normas antecesoras.

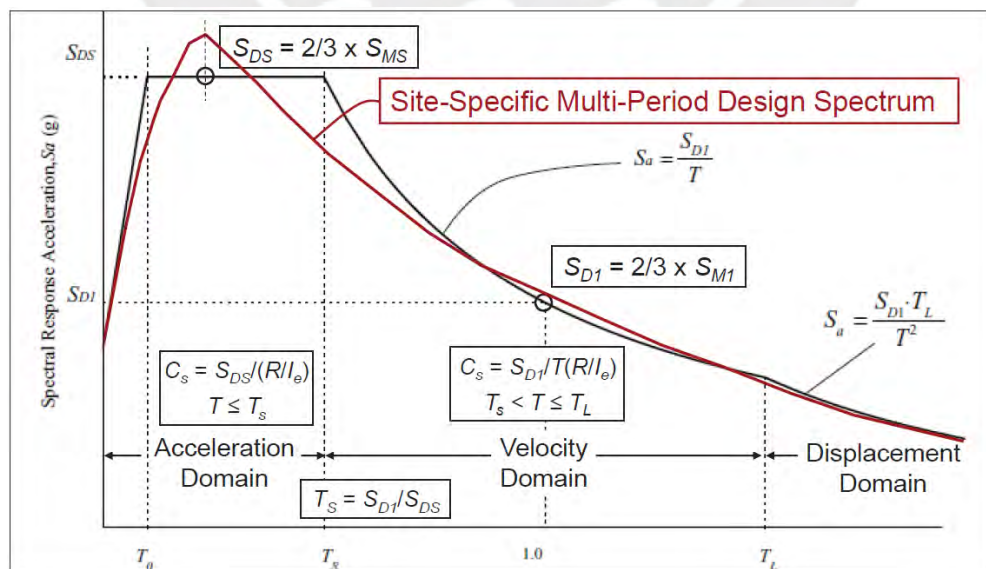


Figura 16. Espectro de Diseño Multiperiodo - Espectro de Diseño de dos periodos (Kircher et al., 2019)

Como se mencionó anteriormente, en caso de que se utilice métodos simplificados de análisis y diseño de estructuras como lo son los métodos de respuesta espectral y fuerzas laterales equivalentes, los términos SMS y SM1 se definen de la siguiente manera:

$SMS = F_a \times S_s$ y $SM1 = F_v \times S_1$, donde F_a y F_v son coeficientes de sitio para periodos cortos y largos respectivamente, estos valores están definidos en las tablas 11.4-1 y 11.4-2 de la norma ASCE/SEI 7-16 y los parámetros de aceleración de respuesta espectral S_s y S_1 se determinan utilizando mapas de riesgo indicados en el capítulo 22 de la norma actual.

Norma chilena NCh3411:2017

Para el análisis y diseño de estructuras con un sistema de amortiguamiento, la norma chilena define tres niveles de demanda sísmica de diferentes intensidades.

El primer nivel de demanda sísmica está representado por el Sismo de Servicio (SDS), que se refiere al espectro de diseño utilizado para establecer la resistencia sísmica de las estructuras, de acuerdo con la norma chilena NCh433 sobre Diseño Sísmico, Instituto Nacional de Normalización INN-Chile, (1997). Este espectro se ajusta además mediante el factor de reducción por amortiguamiento B_1 y el factor de modificación según el tipo de suelo S . Este espectro estipulado por la norma chilena NCh433 se define como:

$$S_a = \frac{S A_0 \alpha}{\left(\frac{R}{I}\right)}$$

En donde S_a corresponde a la aceleración espectral de diseño, S representa el tipo de suelo, A_0 es la aceleración efectiva máxima del suelo que tiene una variación según la zona sísmica y tiene valores constantes, I es el factor de importancia, R es el factor de reducción por ductilidad del edificio y α es un factor que depende del periodo de vibración de la estructura y el suelo. La norma *NCh433* asume un periodo de retorno de 475 años para el diseño sísmico. Sin embargo, según Toro et al. (2023), el análisis detallado de las ordenadas espectrales reveló que este periodo puede variar

considerablemente oscilando entre aproximadamente 40 y 6400 años. Esta variabilidad depende de factores como la ubicación geográfica, el tipo de suelo, y el periodo de vibración considerado.

El segundo nivel corresponde a un Sismo de Diseño (SDI) el cual se refiere al nivel de movimiento del suelo determinado por los parámetros indicados en la norma chilena NCh3411. Para definir el SDI, se ha utilizado la combinación de los espectros de diseño de la norma NCh2745:2013 y el decreto supremo DS61:2011. Para los suelos tipo A, B, y C, se aplican los espectros de NCh2745:2013, mientras que, para el suelo tipo D, se usa el espectro del DS61:2011 ajustado.

Finalmente, para un tercer nivel se encuentra el Sismo Máximo Posible (SMP), que se define como el movimiento del suelo cuyo espectro se calcula multiplicando el espectro del Sismo de Diseño (SDI) por un factor de 1.2. El dimensionamiento del sistema disipador se realiza para el SMP, siendo crucial estimar los desplazamientos en los sistemas de disipación para un diseño adecuado. El espectro de servicio (SDS) no es adecuado para estimar estos desplazamientos, ya que no cumpliría con los objetivos mínimos de seguridad establecidos por la norma.

Norma Técnica Complementaria Mexicana NTCS-20

La norma mexicana, en su apéndice B titulado Edificios con disipadores de energía sísmica indica que los espectros de diseño utilizados para el análisis deben ser aquellos indicados en su Capítulo 3 titulado Espectros para diseño, así como el apartado 6.2.1. Movimiento del Terreno.

El capítulo 3 de la norma indica que los espectros de aceleraciones de diseño para el sistema sismorresistente se obtienen a través de un software especializado llamado SASID, disponible en internet (www.SASID.gob.mx). Además, se permite el desarrollo de espectros específicos del sitio cuando los estudios geotécnicos revelan anomalías en las características del suelo en comparación con los suelos circundantes. Esta normativa indica que el sistema

disipador debe diseñarse elásticamente empleando un espectro correspondiente a un estado de límite de prevención de colapso (ordenadas espectrales asociadas a un periodo de retorno de 250 años) y amplificado en un 20%.

Estándar Europeo EN 15129:2018

El Estándar europeo, indica que las acciones sísmicas de diseño a considerar son aquellas que están definidas en el Capítulo 3 del Eurocódigo 8-1, European Committee for Standardization (2004). Este capítulo señala una serie de tipos de suelos, los cuales se encuentran clasificados en función a perfiles estratigráficos que dependen de velocidades promedio de onda de corte.

El Eurocódigo 8-1, en su capítulo 3 menciona que un movimiento sísmico en cualquier punto de una superficie de suelo es representado por medio de un espectro de respuesta elástico, cuya forma está determinada de igual manera para dos niveles de acción sísmica (estado límite último y sismo de diseño). Además, define el uso de dos tipos de espectros de respuesta elástico en función a la magnitud de sismos. Sin embargo, al igual que la normativa mexicana, para el caso de diseño de edificios con un sistema de DFV la norma no indica las consideraciones a tener en cuenta respecto al empleo de espectros de sismo de diseño o sismos máximos considerados.

En conclusión, se observa que las normativas analizadas anteriormente aplican los mismos espectros utilizados para el diseño convencional de edificios en el caso de estructuras con un sistema de amortiguamiento incorporado. Sin embargo, estos espectros se ajustan mediante un factor de reducción de respuesta que está relacionado con el amortiguamiento proporcionado por el sistema disipador.

La Tabla 6 muestra un comparativo de los espectros de diseño que considera cada normativa para el diseño del sistema sismorresistente y el sistema amortiguador.

Tabla 6. Comparativo de los espectros de diseño de las cuatro normas internacionales.

Aspecto	Norma americana	Norma chilena NCh3411	Norma mexicana NTCS-20	Estándar europeo
Espectros para el diseño de la estructura sin incluir disipadores	Sismo de diseño (2/3 del MCER) Reducido por los por B	Sismo de servicio (SDS). Reducido por B	Espectros de diseño indicados en el Capítulo 3 de la NTCS-20.	Espectros de respuesta reducidos Capítulo 3- Eurocódigo 8-1
Espectros para el diseño del sistema de amortiguamiento	Sismo Máximo Considerado (MCER) y amplificado en un 20%	Sismo Máximo Posible = 1.2 SDI, y amplificado en un 15%	Espectro para un estado de límite de prevención de colapso amplificado en 20%	No define un espectro en específico para el diseño del sistema de amortiguamiento.

B= Factor de reducción por amortiguamiento agregado.

3.4.2 Factor de reducción de respuesta por amortiguamiento.

Las cuatro normas internacionales anteriormente mencionadas permiten la reducción de la respuesta espectral mediante un factor que depende del amortiguamiento agregado por la incorporación de DFV. Los factores de amortiguamiento específicos que se establecen en cada uno de estos lineamientos son los siguientes:

Norma americana

Los valores del coeficiente de amortiguamiento B, indicados en la Tabla 18.7-1 de la norma norteamericana, son equivalentes a los de la Tabla 17.5-1 para estructuras aisladas cuando los niveles de amortiguamiento son de hasta el 20%. Sin embargo, según Ramirez et al. (2000) estos valores se amplían a niveles de amortiguamiento superiores.

Ramirez et al. (2000) determinó el coeficiente de amortiguamiento B utilizando la relación $B = S_a(T, 5\%) / S_a(T, \beta)$ para diversos períodos y movimientos sísmicos seleccionados, donde B se define como relación de una aceleración espectral con amortiguamiento de 5% y una aceleración espectral con amortiguamiento β mayor a 5%. Los resultados se procesaron estadísticamente para obtener valores promedio. Este procedimiento se basó en sismos escalados que representan un espectro de respuesta de diseño específico, preservando el contenido de frecuencias y asegurando una contribución equitativa al espectro de respuesta

promedio. Luego seleccionó 20 componentes horizontales de 10 sismos, asegurando que no incluyeran registros en suelos blandos ni con características cercanas a la falla.

Los movimientos escalados se utilizaron para generar espectros de respuesta elástica para diferentes niveles de amortiguamiento, y propuso un modelo trilineal para el coeficiente de amortiguamiento, que se mantiene constante en la región de velocidad del espectro y disminuye hacia la unidad en cero. Este modelo, fue calibrado y ajustado para alinearse con los valores establecidos en (FEMA, 273) asegurando la consistencia con los lineamientos existentes. Estos datos fueron fundamentales en el desarrollo del modelo de dos parámetros del coeficiente de amortiguamiento que se presentó en las Disposiciones Recomendadas en (NEHRP, 2000)

Norma chilena

Esta norma establece un factor de reducción de respuesta por amortiguamiento B_1 igual a 1.33 cuando se analizan sistemas sismorresistentes de categoría uno. Estos sistemas se caracterizan por lo siguiente:

- El cociente entre la fuerza de corte basal del sistema de amortiguamiento y el cortante basal de diseño total del sistema sismorresistente es mayor a 0.75.
- El sistema de amortiguamiento cuenta con disipadores de energía en todos sus niveles.
- Los disipadores de energía se encuentran conectados concéntricamente a vigas y columnas.

Seguidamente, para sistemas sismorresistente de categoría dos y tres, el factor de reducción por amortiguamiento B_1 , se define como el cociente de las fuerzas cortantes basales del edificio sin disipadores y con ellos. Además, la norma indica que estos cortantes se deben calcular con procedimientos dinámicos no lineales indicados en su cláusula 6.

Norma mexicana

La norma mexicana presenta el factor de amortiguamiento que se muestra en la siguiente expresión

$$\beta = \begin{cases} 1 - \left[1 - \left(\frac{0.05}{\xi} \right)^\lambda \right] \frac{T}{T_a}; & \text{si } T \leq T_a \\ \left(\frac{0.05}{\xi} \right)^\lambda; & \text{si } T_a < T < \tau T_b \\ 1 + \left[\left(\frac{0.05}{\xi} \right)^\lambda - 1 \right] \left(\frac{\tau T_b}{T} \right)^\varepsilon; & \text{si } T \geq \tau T_b \end{cases}$$

Esta expresión matemática fue propuesta por Castillo y Ruiz (2014) para estimar los factores de reducción de espectros por amortiguamiento en el diseño sísmico de sistemas con amortiguadores viscosos. Esta expresión se obtuvo a partir de las razones entre las ordenadas de espectros de amenaza uniforme asociadas con dos distintos intervalos de retorno (50 y 125 años), correspondientes a sitios con diferentes tipos de suelo dentro del Valle de México. La expresión propuesta depende del período dominante del suelo (T_s), así como del período de vibración y la razón de amortiguamiento del sistema estructural (T). La ecuación se divide en tres partes, la primera se aplica a estructuras con periodo corto de vibración, la segunda para periodos de vibración intermedio y la última para periodos largos. Los parámetros λ , ξ y τ dependen del periodo dominante del suelo (T_s), los cuales están definidos en la Tabla 3.1.1 de la norma mexicana NTCS-20.

Estándar europeo

El Estándar Europeo EN 15129:2018 se refiere al factor de reducción de respuesta por amortiguamiento (B) establecido en el Eurocódigo 8-1 (EN 1998-1:2004). La ecuación que define este factor de reducción por amortiguamiento, tal como se incluye en el código europeo, es la siguiente

$$B = \sqrt{\frac{5 + \beta}{10}}$$

Donde β es el coeficiente de amortiguamiento crítico expresado como porcentaje. Esta ecuación no proviene de un único estudio, sino que es el resultado de una simplificación y adaptación de varios estudios previos sobre la relación entre amortiguamiento y respuesta sísmica. Sin embargo, uno de los estudios más influyentes que llevó la adopción de expresiones similares en otros códigos internacionales es el estudio realizado por Newmark y Hall (1982)

En resumen, aunque las normativas analizadas comparten un objetivo común de reducir la respuesta sísmica mediante el uso de coeficientes de amortiguamiento, cada una adapta sus modelos a las necesidades y condiciones locales.

Tabla 7. Coeficientes de reducción por amortiguamiento (B)

Amortiguamiento efectivo β (%)	Norma americana ASCE/SEI 7-22	Norma chilena NCh3411	Norma mexicana NTCS-20	Estándar Europeo Euro código 8-1
2	0.8	Presenta un solo valor $B=1.33$ para reducción por amortiguamiento	Presenta una expresión que depende del periodo de vibración de la estructura y el suelo.	0.8
5	1.0			1.0
10	1.2			1.2
20	1.5			1.6
30	1.8			1.9
40	2.1			2.1
50	2.4			2.3

3.5 Procedimientos de Análisis.

Las cuatro normativas revisadas en esta sección ofrecen procedimientos para el análisis no lineal de la respuesta en el tiempo; sin embargo, tres de ellas (la americana, la chilena y la mexicana) también incluyen métodos de respuesta espectral, siendo la normativa americana la única que incorpora el método de fuerza lateral equivalente. Aunque estos métodos simplificados exigen cumplir con ciertos requisitos para su aplicación, son más fáciles de aplicar y pueden proporcionar resultados significativos para el diseño estructural.

3.5.1 Procedimientos Simplificados

La norma americana establece dos procedimientos simplificados para el análisis sísmico de edificios con DFV: el Procedimiento de Respuesta Espectral y el Procedimiento de Fuerzas Laterales Equivalentes (ELF), el cual fue mejorado por Whittaker (2003). Ambos métodos se basan en las respuestas del modo fundamental y modos superiores de vibración de la estructura reducidas por un factor que depende del amortiguamiento agregado. En la aplicación de estos métodos se asume las propiedades no lineales de la estructura, las cuales se expresan en términos de la ductilidad, sobre resistencia y la idealización elastoplástica de la curva pushover de la estructura.

El procedimiento de Respuesta Espectral exige el cumplimiento de dos condiciones, las cuales son:

- a) En cada dirección principal, el sistema de amortiguamiento debe contar con al menos dos dispositivos.
- b) El amortiguamiento efectivo para el modo fundamental no debe superar el 35% del valor crítico.

Por su parte, el amortiguamiento efectivo se compone del amortiguamiento inherente de la estructura en su etapa elástica, el porcentaje de amortiguamiento viscoso aportado por el sistema disipador y el porcentaje de amortiguamiento histerético generado por las incursiones inelásticas de la estructura. Para el sistema sismorresistente, la fuerza cortante basal sísmica se determina mediante una combinación modal, mientras que las fuerzas de diseño en los dispositivos de amortiguamiento se calculan en función de los desplazamientos, derivas, y velocidades de entrepiso, además se debe considerar la inclinación de cada dispositivo respecto de la horizontal.

El procedimiento de Fuerzas Laterales Equivalentes (ELF), exige el cumplimiento de los siguientes requisitos.

- a) El sistema de amortiguamiento debe incluir al menos dos dispositivos por piso y por dirección de análisis.
- b) El amortiguamiento efectivo total del modo fundamental no debe superar el 35% del valor crítico.
- c) El sistema sismorresistente no debe presentar irregularidades en planta ni en altura, y los diafragmas de piso deben ser rígidos.
- d) La altura de la estructura no debe exceder los 30 metros.

Este procedimiento se diferencia al de Respuesta Espectral en que condensa todos los modos superiores en un único modo residual. Las fuerzas de diseño en los DFV se calculan considerando los desplazamientos, derivas y velocidades, con una superposición modal.

Es importante destacar que la norma americana no proporciona una expresión específica para calcular el amortiguamiento de los DFV lineales y no lineales, sin embargo, sí presenta expresiones para calcular la máxima ductilidad. Asimismo, indica que para determinar la fuerza máxima que aplican en los disipadores, se debe combinar las fuerzas obtenidas por el desplazamiento máximo y la velocidad.

La norma chilena a diferencia de la americana, se enfoca principalmente en el Procedimiento de Respuesta Espectral, el cual debe cumplir con los requisitos establecidos en la Norma Técnica chilena NCh433 Diseño sísmico de edificios, y cuyas respuestas espectrales deben estar reducidas por el factor B1, el cual depende del amortiguamiento agregado.

La norma chilena NCh433, en su capítulo 6, establece dos métodos de análisis: el estático y el espectral. El análisis estático puede emplearse en todas las estructuras de las categorías 1 y 2, así como en aquellas con una altura máxima de 20 metros, sin embargo, este método no está considerado para analizar estructuras con un sistema de amortiguamiento incorporado. Por otra parte, el análisis de Respuesta Espectral es el usado para estos fines y no presenta limitaciones de altura.

Es relevante mencionar que la norma chilena no ofrece expresiones para calcular el amortiguamiento viscoso proporcionado por los DFV lineales y no lineales y tampoco una expresión para calcular la ductilidad máxima de la estructura.

Por otro lado, la norma mexicana, indica que los procedimientos de análisis de estructuras con disipadores se basan en los comentarios realizados por Ruiz (2018) en el cual adopta el procedimiento de Respuesta Espectral e indica que se deben cumplir las siguientes exigencias:

- a) El porcentaje efectivo de amortiguamiento crítico no debe exceder del 35%.
- b) Se deben colocar al menos dos disipadores por piso y en cada dirección principal de análisis para minimizar los posibles efectos de torsión.

A diferencia de la norma estadounidense, el porcentaje efectivo de amortiguamiento toma en cuenta únicamente el amortiguamiento inherente de la estructura y el que aportan los disipadores, sin incluir el amortiguamiento histerético. Por su parte, la norma mexicana proporciona fórmulas para calcular el porcentaje de amortiguamiento viscoso generado por los DFV, tanto lineales como no lineales, así como para determinar el desplazamiento de diseño en la azotea, las derivas entre entrepisos y la pseudovelocidad entre entrepisos, lo cual es necesario para calcular las fuerzas en los disipadores.

Finalmente, el estándar europeo aborda los requerimientos de diseño para DFV en su apartado 7.3. Según este estándar, los disipadores deben ser diseñados considerando las aceleraciones horizontales, tal como se indica en la sección 5.4.3, y se requiere una amplificación del 10% en las fuerzas de diseño. Sin embargo, el estándar no menciona ni recomienda ningún procedimiento específico de análisis, diferenciándose así de las normativas previamente descritas.

En conclusión, todas las normativas anteriormente analizadas tienen como procedimiento simplificado común el de Respuesta Espectral y se observó que sus requerimientos para su aplicación son similares para todos los casos. Por otro lado, tanto la norma americana como la mexicana presentan de manera detallada la aplicación del procedimiento de Respuesta Espectral, así como expresiones para calcular el amortiguamiento agregado por el sistema disipador a la estructura. La norma chilena por su parte, menciona al método de Respuesta Espectral e indica que las estructuras con un sistema de amortiguamiento se deben analizar y diseñar de manera convencional usando para ello la norma NCh433, sin embargo, no presenta ninguna expresión para calcular el amortiguamiento agregado por los disipadores. En contraparte, el estándar europeo, no menciona ni recomienda ningún método en específico para el diseño de estructuras con DFV.

3.5.2 Procedimientos de Respuesta No Lineal en el Tiempo.

Las normativas de Estados Unidos, Chile, México y Europa abordan el análisis de respuesta no lineal en el tiempo y el diseño de estructuras con disipadores de energía sísmica, compartiendo ciertos principios fundamentales mientras exhiben diferencias importantes que responden a sus contextos regionales.

En términos generales, todas las normativas coinciden en que el análisis de respuesta no lineal debe basarse en un modelo matemático detallado que capture el comportamiento histerético no lineal de los elementos estructurales y sus conexiones.

Este modelo debe reflejar de manera coherente los resultados de pruebas de laboratorio, evitando extrapolaciones más allá de las deformaciones probadas. Además, se establece que el amortiguamiento inherente de la estructura no debe exceder el 3% del crítico, lo que es un estándar común entre las normativas en mención. Un aspecto compartido es la utilización de registros de aceleración sísmica representativos en el análisis. En Estados Unidos, se requieren al menos 11 registros, mientras que en Chile se solicitan 3 eventos sísmicos. En ambos casos, estos registros deben ser ajustados para que sus espectros de respuesta cumplan con los requisitos normativos.

En cuanto al diseño del sistema de amortiguamiento, las normativas coinciden en que los dispositivos de amortiguamiento y sus conexiones deben diseñarse para resistir las fuerzas y desplazamientos generados por los movimientos sísmicos más severos, como aquellos correspondientes al terremoto máximo considerado (MCER) y sus equivalentes en las otras normas. También se enfatiza la importancia de modelar cualquier cambio en las propiedades de los dispositivos de amortiguamiento debido al tiempo y la temperatura, garantizando así un comportamiento adecuado durante la vida útil de la estructura.

Sin embargo, existen diferencias notables entre las normativas. La normativa estadounidense exige que el análisis no lineal se realice tanto para el SD como para SMC, utilizando los resultados de estos análisis para el diseño del sistema de resistencia sísmica y el sistema de amortiguamiento, respectivamente.

Por su parte, la normativa chilena simplifica el proceso al recomendar que el análisis no lineal se utilice principalmente para el diseño del sistema disipador, debido a la complejidad de aplicar este método a toda la estructura. Para el diseño del sistema sismorresistente, se sugiere utilizar el procedimiento de respuesta espectral, considerando un amortiguamiento del 5% para todos los modos de vibración. No obstante, si la estructura presenta irregularidades, se recomienda realizar un análisis no lineal en el tiempo.

La normativa mexicana enfatiza la importancia de realizar un análisis no lineal paso a paso para todas las edificaciones que incorporen disipadores de energía, incluyendo la degradación de las propiedades mecánicas del sistema sismorresistente y los posibles cambios en los disipadores debido a la temperatura y el tiempo. Además, la norma indica la cantidad de pares de movimientos representativos que deben utilizarse en función del periodo del sitio, variando entre 8 y 12 pares.

Finalmente, el estándar europeo no presenta recomendaciones específicas para el análisis dinámico no lineal de estructuras con DFV. Sin embargo, el Euro código 1998-1:2004 indica directrices para el análisis de respuesta en el tiempo no lineal de estructuras convencionales en donde se considera un amortiguamiento inherente de la estructura de 5%, el uso de un mínimo de 3 registros de aceleraciones.

En la Tabla 8 se muestra un cuadro resumen del comparativo de los requisitos específicos para la aplicación de los métodos de análisis de edificios con disipadores de energía de fluido viscoso indicados en cada norma internacional que se está analizando en la presente sección.

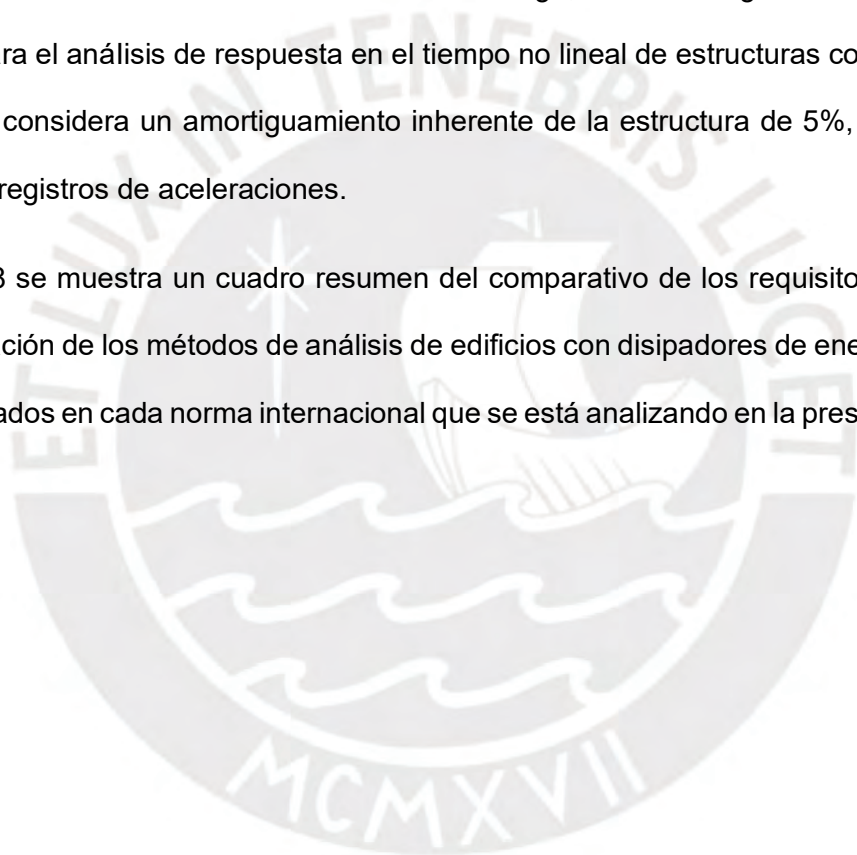


Tabla 8. Comparativo de requisitos para la aplicación de métodos de análisis de edificios con disipadores de energía de fluido viscoso.

Aspecto	Norma americana ASCE/SEI 7-22	Norma chilena NCh3411	Norma mexicana NTCS-20	Estándar europeo EN15129:2018
Procedimientos simplificados.	Respuesta Espectral y Fuerzas Laterales Equivalentes (FLE).	Respuesta Espectral, cumpliendo la normativa NCh433.	Respuesta Espectral, basado en los comentarios de Ruiz Gómez (2018).	No menciona procedimientos simplificados de análisis y diseño
Requisitos para el método de respuesta espectral.	Mínimo 2 disipadores por piso. Amortiguamiento efectivo menor a 35%	No presenta número mínimo de disipadores ni amortiguamiento efectivo	Mínimo 2 disipadores por piso. Amortiguamiento efectivo menor a 35%. No considera el amortiguamiento histerético.	No presenta requisitos específicos para el método de respuesta espectral
Requisitos para el método de fuerzas laterales equivalentes.	Requisitos similares al método de respuesta espectral y además aplicable en edificios regulares y menores a 30 metros de altura	No presenta	No presenta	No presenta
Expresión para el cálculo de amortiguamiento viscoso dado por el sistema disipador	Presenta una expresión genérica	No presenta	Presenta una ecuación para el cálculo de amortiguamiento de disipadores lineales y no lineales	No presenta
Procedimiento de respuesta no lineal en el tiempo	Análisis para Sismo de Diseño y Sismo Máximo Considerado (MCER).	Análisis no lineal para el sistema disipador, no toda la estructura.	Análisis no lineal para todas las estructuras con disipadores	Análisis para estructuras convencionales, pero no especifica requerimientos para estructuras con disipadores
Registros de aceleraciones sísmica	Al menos 11 registros sísmicos	Requiere como mínimo 3 registros sísmicos	Requiere entre 8 y 12 pares de registros sísmicos	Recomienda usar como mínimos 3 registros sísmicos.

3.6 Ensayos.

En todas las normas internacionales, se enfatiza la importancia de confirmar las propiedades de fuerza-velocidad-desplazamiento y amortiguamiento de los disipadores mediante pruebas rigurosas.

3.6.1 Generalidades

Las normas americana y chilena exigen que las propiedades del dispositivo se basen en pruebas de prototipos, asegurando que estos sean representativos y fabricados con los mismos materiales y procesos que los dispositivos finales. La norma mexicana permite el uso de resultados de pruebas previas de dispositivos similares, siempre que se garantice que la documentación y los métodos sean adecuados. Por último, el Estándar Europeo, mientras gestiona la energía y la temperatura durante las pruebas, también se alinea con la idea de usar ensayos específicos para confirmar las propiedades del dispositivo. En resumen, todas las normas coinciden en la necesidad de realizar pruebas exhaustivas para verificar las propiedades del dispositivo, y en la aceptación de pruebas previas para asegurar la validez de los resultados en el contexto del diseño y la operación.

3.6.2 Ensayos de los Prototipos

Las normativas americana, chilena y mexicana coinciden en la exigencia de realizar pruebas en al menos dos dispositivos a escala real para cada tipo de disipador que se utilizará en la obra. Estas pruebas buscan garantizar que la fabricación y control de calidad sean consistentes. La norma europea, aunque no especifica un número exacto de dispositivos para ensayar, recomienda un enfoque en la división de los ensayos en grupos para evitar el sobrecalentamiento del dispositivo, lo cual es un aspecto complementario, pero no se enfoca en la cantidad o escala de los dispositivos.

3.6.2.1 Registros de datos.

En este primero ensayo, en todas las normativas se exige que las relaciones fuerza-velocidad-deformación para cada ciclo de cada prueba deberá registrarse electrónicamente.

3.6.2.2 Secuencias y ciclos de ensayos.

Las normativas americana, chilena y mexicana exigen someter los dispositivos de amortiguamiento a al menos 2000 ciclos continuos de ensayo bajo cargas de viento. En todas se establece que la carga de viento debe aplicarse con amplitudes y frecuencias igual al inverso del periodo fundamental de la estructura. Tanto la normativa americana, chilena y mexicana permiten omitir estas pruebas si los dispositivos no están expuestos a fuerzas o desplazamientos significativos por el viento. Por su parte, el estándar europeo no hace ninguna mención a pruebas que impliquen cargas de viento.

La norma americana en su sección 18.6.2.2 indica que cada dispositivo deberá ser sometido a una secuencia de ciclos sinusoidales a una frecuencia de $1/1.5T_1$, donde T_1 es el periodo fundamental de la estructura.

- a) 10 ciclos completos de desplazamiento en el dispositivo correspondiente a 0.33 veces el desplazamiento bajo condiciones de MCER
- b) 5 ciclos completos de desplazamiento en el dispositivo correspondiente a 0.67 veces el desplazamiento bajo condiciones de MCER
- c) 3 ciclos completos de desplazamiento en el dispositivo correspondiente a 1.0 veces el desplazamiento del dispositivo bajo las condiciones de MCER.

Por su parte, la norma chilena, en su sección 9.2.2.2.1 indica la siguiente secuencia

- a) Cada dispositivo se someterá a 10 ciclos sinusoidales completos de desplazamiento con amplitud igual al desplazamiento del disipador más solicitado para un Sismo Máximo Probable (SMP) a frecuencias iguales a $0.8/T_1$, $1/T_1$ y $2.5/T_1$.

- b) Cada disipador debe ser sometido a una deformación tal que se alcance la velocidad máxima para el disipador más solicitado para un SMP.

La norma mexicana, en su sección B.4.4.2 presenta un enfoque similar pero adecuado a sus condiciones sísmicas. Las secuencias se deben realizar considerando una frecuencia de $1/T1$.

- a) 15 ciclos completos cuando la estructura se localice en un suelo blando, con un periodo T_s mayor a 1 segundo.
- b) 5 ciclos completos cuando no se presenten las condiciones descritas en el punto anterior.

El estándar europeo, indica un grupo de pruebas distintas, las cuales son:

- a) Ensayo de Presión Interna: Se aplica una presión del 125% de la carga máxima del amortiguador por 120 segundos. No debe haber fugas ni deterioro visible.
- b) Ensayo de Baja Velocidad: Se evalúa la fuerza de reacción axial bajo movimientos térmicos simulados. El dispositivo debe mantener una fuerza no mayor al 10% de la fuerza de diseño durante todo el ciclo, a una velocidad mínima de 0,01 mm/s y 0.1 mm/s.
- c) Ensayo de Ley Constitutiva: Determina la curva característica de fuerza versus velocidad del amortiguador, repitiéndose a temperaturas de diseño mínima y máxima para evaluar la influencia térmica. Se deben realizar 3 ciclos invertidos a diversas velocidades.
- d) Ensayo de Eficiencia de Amortiguamiento: Evalúa la eficiencia para disipar energía y la estabilidad de reacción del dispositivo mediante 5 ciclos completos de desplazamiento sinusoidal. La reacción de fuerza y la disipación de energía deben estar dentro de las tolerancias de diseño.
- e) Ensayo de Desgaste del Sello: Se realiza durante 10,000 ciclos con amplitud igual al desplazamiento térmico máximo esperado, garantizando que no haya fugas de fluido.

3.6.2.3 Criterios de aceptación del disipador.

Las normativas americana, chilena y mexicana establecen criterios de aceptación para los disipadores de energía basados en la consistencia y la integridad de su desempeño. En términos generales, estas normativas coinciden en lo siguiente:

1. **Integridad Física:** En todas las normativas, no se permite la aparición de daños visibles como fugas, deformaciones, roturas, o fallas en los sellos.
2. **Consistencia de Fuerza en Desplazamiento Nulo:** La diferencia entre las fuerzas máximas y mínimas en desplazamiento cero, para cualquier ciclo, no debe exceder el 15% respecto al promedio de estas fuerzas a lo largo de todos los ciclos de prueba.
3. **Estabilidad de la Energía Disipada:** El área del bucle de histéresis, que significa la energía disipada por el dispositivo, debe mantenerse dentro de un margen del 15% respecto al área promedio hallada para todos los ciclos, considerando las condiciones de temperatura y frecuencia especificadas en la prueba.

La Tabla 9 presenta un cuadro en donde se resumen las consideraciones generales que indican las normativas internacionales analizadas respecto a los ensayos de prototipo que se deben hacer a los disipadores de energía antes de ser utilizados en obra.

Tabla 9. Cuadro resumen del comparativo de los ensayos realizados a los DFV viscoso.

Aspecto	Norma americana ASCE/SEI 7-22	Norma chilena NCh3411	Norma mexicana NTCS-20	Estándar europeo EN15129:2018
Generalidades de ensayos	Exige pruebas de prototipos representativos fabricados con los mismos materiales y procesos que los dispositivos finales.	Similar a la norma americana ASCE 7-22	Similar a la norma americana ASCE 7-22	Se gestiona la energía y temperatura durante las pruebas; permite el uso de ensayos específicos para confirmar propiedades del dispositivo.
Ensayos de prototipos	Pruebas en al menos dos dispositivos a escala real.	Similar a la norma americana ASCE 7-22	Similar a la norma americana ASCE 7-22	No especifica un número exacto de dispositivos, pero divide los ensayos en grupos para evitar sobrecalentamiento.
Registros de datos	Se exige el registro electrónico de las relaciones fuerza-velocidad-deformación para cada ciclo.	Similar a la norma americana ASCE 7-22	Similar a la norma americana ASCE 7-22	Similar a la norma americana ASCE 7-22
Secuencias y ciclos de ensayos	(a) 10 ciclos al 0.33 del desplazamiento MCER; (b) 5 ciclos al 0.67 del desplazamiento MCER; (c) 3 ciclos al 1.0 del desplazamiento MCER. Además, se requieren 2000 ciclos bajo cargas de viento (si aplica).	(a) 10 ciclos sinusoidales al desplazamiento máximo del disipador a frecuencias de $0.8/T1$, $1/T1$, y $2.5/T1$; (b) deformación para alcanzar la velocidad máxima para el SMP. Se requieren 2000 ciclos bajo cargas de viento (si aplica).	(a) 15 ciclos completos si la estructura está en suelo blando ($T_s > 1s$); (b) 5 ciclos completos en otros casos. Las pruebas se realizan con una frecuencia de $1/T1$. Se permiten omitir las pruebas de viento si no hay exposición significativa.	No menciona ensayos bajo cargas de viento. Realiza pruebas específicas como ensayo de presión interna, ensayo de baja velocidad, ensayo de ley constitutiva, ensayo de eficiencia de amortiguamiento y ensayo de desgaste del sello.
Criterios de aceptación	No se permiten daños visibles ni fallas; la diferencia de fuerzas en desplazamiento nulo no debe exceder el 15% respecto al promedio.	Criterios similares a la norma americana en cuanto a integridad, consistencia y energía disipada.	Similares a las normas americana y chilena en cuanto a integridad física, consistencia de fuerza y estabilidad de energía disipada.	Además de los criterios comunes, exige que no haya fugas ni deterioro durante el ensayo de presión interna, y que la reacción de fuerza y disipación de energía se mantengan dentro de las tolerancias de diseño.

3.7 Desempeño de estructuras con disipadores aplicando la norma americana ASCE/ SEI 7-16.

A continuación, se describe los resultados obtenidos de estudios que aplicaron la norma americana ASCE/SEI 7-16, similar en requisitos a la actual ASCE/SEI 7-22, para evaluar el desempeño de estructuras equipadas con DFV.

En el estudio de Gilani y Miyamoto (2018) se evaluaron tres modelos de edificios de acero con marcos de momento especial (SMF) que incluían disipadores, aplicando los requisitos de la norma ASCE 7-16, y se compararon con un modelo de referencia diseñado sin disipadores. Este estudio determinó que los modelos con DFV experimentaron una reducción significativa en la formación de rótulas plásticas, menores aceleraciones y menores distorsiones de entrepiso. Una de las conclusiones más relevantes fue que el modelo diseñado con el 100% de la cortante basal nominal e incorporando un mayor amortiguamiento mostró un mejor rendimiento, manteniéndose elástico durante un Sismo Máximo Considerado.

Por su parte el estudio de Kitayama y Constantinou (2018) enfocó su estudio en la probabilidad de colapso de estructuras con disipadores diseñados conforme a los procedimientos de la norma americana, en donde encontraron, al igual que el estudio de Gilani y Miyamoto (2018) que al incrementar la fuerza cortante de diseño a 1.0V en lugar de 0.75V y aumentar el amortiguamiento, reducen las probabilidades de colapso y las distorsiones de entrepiso.

Finalmente, el estudio realizado por Cundumi Garcia y Cundumi Sánchez (2021) compararon las respuestas de edificios aporticados de concreto armado equipados con DFV utilizando las metodologías de análisis no lineal dinámico propuesto en las normas ASCE7-10 y ASCE 7-16. Encontraron que la aplicación de la norma ASCE 7-16 provee resultados menores en un 15% y 5% en los desplazamientos máximos y derivas respectivamente.

CAPÍTULO IV: Propuesta de Norma Peruana para Análisis y Diseño de Edificios con Disipadores de Energía de Fluido Viscoso.

El objetivo de este capítulo es proponer una normativa peruana para el análisis y diseño de edificios equipados con DFV. Esta propuesta se fundamenta en el análisis comparativo de normas internacionales expuestas en el Capítulo III, complementándose con los lineamientos de la Norma Técnica Peruana E.030 de Diseño Sismorresistente. Asimismo, se incluirán comentarios y justificaciones teóricas en las secciones que lo demanden con el fin de facilitar una mejor comprensión de los conceptos abordados.

4.1 Alcance de la propuesta

La propuesta establece los requisitos generales para el análisis y diseño de edificios que incorporen disipadores de energía de fluido viscoso, considerando la sismicidad peruana. Se abordan, además, las acciones sísmicas, métodos simplificados de análisis necesarios para determinar los desplazamientos y fuerzas sísmicas que afectan a la estructura y el sistema de amortiguamiento. Además, se detallan los ensayos y pruebas que deben realizarse en los dispositivos para asegurar su efectividad y desempeño.

4.2 Nomenclatura

Para efectos de la siguiente propuesta de norma, se considera la siguiente nomenclatura:

Nomenclatura	Descripción
Subíndice ($m=1$)	Indica el modo fundamental de vibración
Subíndice ($m>1$)	Indica los modos superiores de vibración
Subíndice i	Indica el piso “ i ” de la estructura
Subíndice j	Indica el disipador “ j ” de la estructura

Nomenclatura	Descripción
Subíndice (m = R)	Indica el modo residual de vibración
α	Exponente de velocidad
β_i	Amortiguamiento inherente de la estructura
β_{HD}	Amortiguamiento hysterético
β_{mD}	Amortiguamiento efectivo para el modo "m" de vibración
β_{vm}	Amortiguamiento viscoso para el modo de vibración "m"
B_{mD}	Factor de reducción de respuesta por amortiguamiento efectivo para el modo de vibración "m".
B_{V+i}	Factor de reducción de respuesta por amortiguamiento efectivo para el rango elástico.
C_d	Factor de amplificación de desplazamiento
C_{effj}	Coefficiente de amortiguamiento efectivo para el disipador "j"
C_j	Coefficiente de amortiguamiento para el disipador "j"
C_{sm}	Coefficiente sísmico para el modo de vibración "m"
$CF1$	Coefficiente para la fuerza sísmica lateral para el instante de máximo desplazamiento
$CF2$	Coefficiente para la fuerza sísmica lateral para el instante de máxima velocidad
D_{mD}	Desplazamiento de diseño del techo para el modo de vibración "m"
D_{Sm}	Desplazamiento elástico reducido para el modo de vibración "m".
D_t	Desplazamiento elástico de techo reducido por amortiguamiento
D_y	Desplazamiento de fluencia.
Δ_{mD}	Desplazamiento de entrepiso de diseño para el modo de vibración "m"
δ	Parámetro delta
δ_{imD}	Desplazamiento de diseño del piso "i" para el modo de vibración "m"
$\delta_{(i-1)mD}$	Desplazamiento de diseño para el piso "i-1" para el modo de vibración "m"
F_{imAmax}	Fuerza sísmica lateral debido a la aceleración máxima en el piso "i" para el modo "m"
F_{mi}	Fuerza sísmica lateral de diseño aplicada en el piso "i" para el modo de vibración "m"
g	Aceleración de la gravedad 981 cm/s ²
L_m^*	Masa participante del sistema para el modo de vibración "m"
$\left(\frac{L^*}{M^*}\right)_m =$	Factor de participación modal para el modo de vibración "m"
λ_j	Parámetro lambda para el disipador "j"
m_i	Masa de cada piso "i" de la estructura.
M_m^*	Masa generalizada del sistema para el modo de vibración "m"

Nomenclatura	Descripción
μ_D	Demanda de ductilidad efectiva
V_{mD}	Velocidad de diseño relativa de entrepiso para el modo de vibración "m"
q_H	Factor de ajuste de lazo histerético
$Sa(T_m, 5\%)$	Aceleración espectral en función al periodo del modo "m" para un 5% de amortiguamiento.
T_m	Periodo elástico para el modo de vibración "m"
T_{mD}	Periodo efectivo para el modo de vibración "m".
T_R	Periodo para el modo residual
ϕ_{rj}	Desplazamiento residual relativo para el disipador "j"
θ_j	Ángulo de inclinación del disipador "j"
V	Cortante basal de diseño calculada de manera convencional con la Norma E.030 Diseño Sismorresistente.
V_m	Fuerza cortante basal de diseño para el modo de vibración "m"
V_{min}	Valor mínimo de la cortante basal de diseño.
\bar{W}_m	Peso efectivo para el modo de vibración "m"
Ω_o	Factor de sobre resistencia
ϕ_{im}	Desplazamiento modal en el piso "i" de la estructura para el modo de vibración "m"
w_i	Peso del piso "i"

4.3 Requisitos generales de diseño

Tanto el sistema sismorresistente como el de amortiguamiento deben cumplir con los requisitos mencionados en esta sección y los lineamientos presentados en la Norma Técnica Peruana E.030 Diseño Sismorresistente, la cual será denominada en adelante como Norma E.030.

4.3.1 Sistema sismorresistente

Definición: El sistema sismorresistente es el conjunto de elementos estructurales (vigas, columnas, muros de corte, etc) configurados para soportar cargas gravitacionales y cargas sísmicas para cada dirección de análisis. Este sistema debe cumplir con la categoría y sistema estructural indicados en el Capítulo 3 de la Norma E.030.

Tanto la norma americana (ASCE/SEI 7-22), chilena (NCh3411) y mexicana (NTCS-20), consideran que la estructura a la que se le incorpore un sistema de amortiguamiento presenta un límite mínimo de fuerza cortante basal de diseño, este criterio responde a la necesidad de garantizar el correcto funcionamiento de la estructura. Por lo tanto, se propone diseñar la estructura sismorresistente verificando que la cortante de diseño sea por lo menos mayor o igual al máximo de los valores indicados en (4.1) y (4.2) y como máximo 1.00V.

$$V_{min} = 0.85V \quad (4.1)$$

$$V_{min} = \frac{V}{B_{V+I}} \quad (4.2)$$

V es la cortante basal de diseño calculada de manera convencional bajo los lineamientos de la Norma E.030 y el término B_{V+I} es el factor de reducción por amortiguamiento para el régimen elástico de la estructura.

4.3.2 Sistema de amortiguamiento

Definición: El sistema de amortiguamiento está compuesto por los disipadores de fluido viscoso (DFV), sus elementos de soporte como los brazos metálicos, pernos de anclaje, etc.,

En las normas internacionales, se indica que este sistema debe ser diseñado utilizando un Sismo Máximo Considerado, con la finalidad de asegurar un comportamiento adecuado del sistema. En el apartado de comentarios de la Norma americana, se indica que los elementos que componen este sistema de amortiguamiento deben ser diseñados para un SMS y permanecer con un comportamiento elástico. Por lo tanto, se propone que los elementos del sistema de amortiguamiento deben ser diseñado y verificados para un sismo severo con un periodo de retorno de 2500 años y definido como 1.5 veces el sismo de diseño indicado en la Norma E.030.

4.4 Acciones sísmicas

Para el análisis y diseño de los sistemas sismorresistente y de amortiguamiento, se propone utilizar el espectro de diseño utilizado para el diseño de edificios indicado en Capítulo II (Peligro Sísmico) de la Norma E.030. A continuación, se hará una breve descripción del espectro de diseño, así como los parámetros que lo conforman.

El espectro presentado en la Norma E.030 tiene un periodo de retorno de 475 años y un amortiguamiento del 5% y se define como:

$$S_a = \frac{ZUCS}{R} g \quad (4.3)$$

Donde S_a representa la aceleración espectral en función de la constante de gravedad (g). El factor Z se utiliza para parametrizar la aceleración máxima horizontal en un suelo rígido (rocoso), que tiene un 10% de probabilidad de ser superada en un lapso de 50 años. Este valor se expresa como una fracción de g y varía según las cuatro zonas sísmicas del territorio peruano.

En la normativa E.030, el factor de uso (U) representa la importancia de la estructura según su categoría. El factor S ajusta la aceleración pico del suelo de acuerdo con el perfil geotécnico específico. La norma clasifica cinco tipos de suelo (S_0, S_1, S_2, S_3, S_4) basándose en la velocidad promedio de ondas de corte, el valor ponderado del Ensayo Estándar de Penetración y la resistencia al corte en condiciones no drenadas, evaluados hasta 30 metros de profundidad.

Según Muñoz (2020) el factor de amplificación dinámica C se utiliza para describir la amplificación de las aceleraciones en la base de la cimentación de una estructura. Su valor depende del periodo fundamental de la estructura, así como de los parámetros T_p y T_L , que indican el tipo de suelo y definen la zona de velocidad del espectro. Estos parámetros se utilizan para determinar una gama de valores para el factor de amplificación dinámica C .

4.5 Procedimientos de análisis

Se propone que toda estructura que incorpore un sistema de amortiguamiento debe ser analizada mediante la aplicación de métodos no lineales simplificados. Todas las normas internacionales revisadas en el Capítulo III, a excepción del estándar europeo, proponen como métodos simplificados el análisis de respuesta espectral, cuyas respuestas están reducidas por un factor en función al amortiguamiento viscoso agregado; sin embargo, la Norma americana ASCE/SEI 7-22 presenta, además, el método de Fuerzas Laterales Equivalentes, el cual será también considerado en la presente propuesta.

Estos procedimientos implican la evaluación del comportamiento conjunto de la estructura y el sistema de amortiguamiento, utilizando un sistema lineal equivalente que refleja la no linealidad de la estructura a través de parámetros inelásticos, tales como la ductilidad y la sobre resistencia. Los métodos permiten determinar el desplazamiento reducido de la estructura debido al amortiguamiento agregado y también las demandas en cada piso en tres instantes de análisis, los cuales son: máximo desplazamiento, máxima velocidad y máxima aceleración. Los máximos valores de estas fuerzas sísmicas se utilizan en el diseño de los brazos metálicos de los disipadores. Al llevar a cabo ambos procedimientos, es importante considerar las restricciones de aplicación establecidas en la sección 4.5.1. Además, es relevante señalar que el procedimiento de FLE abarca la respuesta de los modos superiores en un único modo residual.

Para tener una mejor comprensión de los procedimientos análisis simplificados, se hará un breve resumen del análisis modal para sistemas amortiguados.

Chopra (2014) señala que la ecuación dinámica para un sistema de varios grados está expresada como

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = -m\{1\}\ddot{u}_g \quad (4.4)$$

Donde m representa la matriz de masas concentradas de una estructura de n niveles, c es la matriz de amortiguamiento estructural, k es la matriz de rigidez lateral, u , en función del tiempo, es el vector de desplazamientos horizontales de cada piso respecto al suelo, y $\{1\}$ es un vector unitario de orden n . Dado que la ecuación (4.4) está acoplada, lo que implica que se necesita una solución simultánea, es recomendable transformar las ecuaciones a coordenadas modales

El vector de desplazamiento $u(t)$ del sistema de múltiples GDL puede indicarse en función al aporte modal del sistema, de esta manera la respuesta dinámica de la estructura puede expresarse como:

$$u(t) = [\Phi]\{q\} = \sum_{m=1}^n \{\Phi\}_m q_m(t) = \sum_{m=1}^n \{u\}_m \quad (4.5)$$

Donde $[\Phi]$ es la matriz modal y $\{q\}$ es un vector de coordenadas modales en función del tiempo que representa la amplitud de los modos. Si se reemplaza la ecuación (4.5) en la ecuación (4.4), se obtiene

$$\sum_{m=1}^N m\Phi_m \ddot{q}_m(t) + \sum_{m=1}^N c\Phi_m \dot{q}_m(t) + \sum_{m=1}^N k\Phi_m q_m(t) = -m\{1\}\ddot{u}_g \quad (4.6)$$

Al multiplicar cada término por la matriz transpuesta de la forma modal ϕ_m^T , se obtiene

$$\sum_{m=1}^N \phi_m^T m \phi_m \ddot{q}_m(t) + \sum_{m=1}^N \phi_m^T c \phi_m \dot{q}_m(t) + \sum_{m=1}^N \phi_m^T k \phi_m q_m(t) = -\phi_m^T m \{1\} \ddot{u}_g \quad (4.7)$$

Donde los términos $M = \sum_{m=1}^N \phi_m^T m \phi_m$ es la matriz diagonal de las masas modales generalizadas, $C = \sum_{m=1}^N \phi_m^T c \phi_m$ es una matriz no diagonal y $K = \sum_{m=1}^N \phi_m^T k \phi_m$ es la matriz diagonal de rigidices modales generalizadas.

La ecuación (4.7), existe para cada $m=1$ a N , y el conjunto de N ecuaciones puede escribirse de la forma matricial como:

$$M\ddot{q} + C\dot{q} + Kq = -\phi_m^T m \{1\} \ddot{u}_g \quad (4.8)$$

Si se considera la hipótesis clásica de amortiguamiento y se supone que los modos naturales del sistema amortiguado son idénticos a los elementos no amortiguados, se podrán desacoplar estas N ecuaciones, las cuales se encuentran acopladas a través de los términos de amortiguamiento. La ecuación diferencial correspondiente a la coordenada modal q_m , se puede escribir de la siguiente manera

$$\ddot{q}_m + 2\beta_m \omega_m \dot{q}_m + \omega_m^2 q_m = -\frac{L_m^*}{M_m^*} \ddot{u}_g \quad (4.9)$$

β_m es el amortiguamiento estimado y $\frac{L_m^*}{M_m^*}$ es el factor de participación modal.

Según Chopra (2014) el factor de participación modal se define como la medida de contribución de cada modo de vibración al movimiento total de la estructura bajo cargas dinámicas.

$$\frac{L_m^*}{M_m^*} = \frac{\{\phi_m^T\}[m]\{1\}}{\{\phi_m^T\}[m]\{\phi_m\}} = \frac{\sum_{i=1}^n w_i \phi_{i,m}}{\sum_{i=1}^n w_i \phi_{i,m}^2} \quad (4.10)$$

Donde L_m^* se denomina peso efectivo modal y M_m^* se denomina masa generalizada. La letra n indica el número de pisos de la estructura, w_i es el peso del i -ésimo piso y $\phi_{i,m}$ es el vector de desplazamientos modales del i -ésimo piso para el m -ésimo modo de vibración.

Las respuestas máximas están en función a la aceleración espectral del suelo y a la frecuencia natural ω_m con un amortiguamiento del 5% del amortiguamiento crítico y vinculadas a un espectro de respuesta, en donde el desplazamiento espectral S_{dm} y la aceleración espectral S_{am} para el modo m , se relacionan mediante la siguiente ecuación.

$$S_{dm} = \frac{S_{am}}{\omega_m^2} \quad (4.11)$$

La respuesta máxima en cada coordenada modal para el desplazamiento viene dada por la expresión

$$u_{max} = \{\phi_m\} \frac{L_m^*}{M_m^*} S_{dm} \quad (4.12)$$

Las fuerzas laterales para cada modo m que corresponden a cada nivel "i" de la estructura, está asociada a la aceleración espectral del sistema y viene dado por.

$$F_{im,max} = \{\phi_{im}\} [m_i] \frac{L_m^*}{M_m^*} S_{am} \quad (4.13)$$

El peso sísmico efectivo para cada modo está definido como

$$\bar{W}_m = \left(\sum_{i=1}^n m_i \phi_{i,m} \right) \frac{L_m^*}{M_m^*} g = \frac{(\sum_{i=1}^n w_i \phi_{i,m})^2}{\sum_{i=1}^n w_i \phi_{i,m}^2} \quad (4.14)$$

El cortante basal para el modo m asociado al desplazamiento espectral se define como

$$V_m = \left(\sum_{i=1}^n m_i \phi_{i,m} \right) \frac{L_m^*}{M_m^*} S_{am} = \bar{W}_m \frac{S_{am}}{g} \quad (4.15)$$

Al emplear las condiciones de ortogonalidad de los modos naturales, se demuestra que

$$\sum_{i=1}^n m_i \phi_{i,m} \frac{L_m^*}{M_m^*} = 1 \quad (4.16)$$

De la ecuación (4.16), se puede deducir que la sumatoria de los pesos efectivos modales es igual al peso total de la estructura.

$$\sum_{m=1}^n \bar{W}_m = \sum_{m=1}^n \frac{L_m^*}{M_m^*} \left(\sum_{i=1}^n w_i \phi_{i,m} \right) = \sum_{i=1}^n w_i = W \quad (4.17)$$

Además, si los modos están normalizados, es decir si el desplazamiento en el techo está normalizado a la unidad, se obtiene

$$\sum_{m=1}^n \frac{L_m^*}{M_m^*} = 1 \quad (4.18)$$

Por su parte, el procedimiento de FLE, consiste en utilizar únicamente dos modos: el fundamental y el residual, el cual según Clough y Penzien (1993), representa de forma aproximada el aporte de los modos superiores. Donde, el peso efectivo, factor de participación modal y forma modal residual se indican a continuación

$$\bar{W}_R = W - \bar{W}_1 \quad (4.19)$$

$$\frac{L_R}{M_R} = 1 - \frac{L_1^*}{M_1^*} \quad (4.20)$$

$$\phi_{iR} = \frac{1 - \frac{L_1^*}{M_1^*} \phi_1}{1 - \frac{L_1^*}{M_1^*}} \quad (4.21)$$

4.5.1 Requisitos para la aplicación de los procedimientos simplificados.

Las normas analizadas en el Capítulo III, coinciden que para aplicar el método simplificado de análisis de Respuesta Espectral se deben cumplir las siguientes condiciones:

- a. El sistema de disipación debe contar con al menos dos disipadores por piso, dispuestos en cada dirección de análisis, para resistir la torsión.
- b. El amortiguamiento efectivo no debe superar el 35% del amortiguamiento crítico para el modo fundamental del comportamiento elástico de la estructura.
- c. La estructura sismorresistente no debe tener irregularidades en planta y altura consideradas en el Capítulo III – Artículo 19 de la Norma E.030.
- d. El análisis se realiza de manera independiente en cada dirección omitiendo el efecto torsional.

Por su parte, la norma americana es la única que presenta el procedimiento de Fuerzas Laterales Equivalentes y se puede aplicar cuando se cumplan estos requisitos:

- a. El sistema de disipación debe contar con al menos dos disipadores por piso configurados en cada dirección de análisis para resistir la torsión.
- b. El amortiguamiento efectivo no debe superar el 35% del amortiguamiento crítico para el modo fundamental de comportamiento elástico de la estructura.
- c. Se debe considerar un diafragma rígido para cada piso del edificio.
- d. La estructura sismorresistente no debe tener irregularidades en planta y altura consideradas en el Capítulo III – Artículo 19 de la Norma E.030.
- e. La altura máxima de la estructura no debe ser mayor a 30 metros.
- f. El análisis se realiza de manera independiente en cada dirección omitiendo el efecto torsional.

Según Ramirez et al. (2000) la condición (a) para ambos métodos propuestos, se debe a que en el análisis teórico de los métodos simplificados fue realizada en un modelo de dos dimensiones y los efectos de torsión no fueron considerados. La exigencia (b) en ambos métodos se debe a que en la teoría detrás de los métodos simplificados, se utilizó un análisis con sistemas de 1GDL en los que se asumió que el amortiguamiento efectivo máximo era del 30%.

Sin embargo, en los ejemplos prácticos para validar los métodos, Ramírez et al. (2000) consideró una estructura con un amortiguamiento efectivo máximo del 35% y finalmente, la condición (e), está en función a la evidencia experimental ya que los métodos se han validado en estructuras que tienen una altura menor a los 30 metros.

Por lo tanto, se propone utilizar ambos métodos simplificados en la normativa peruana.

Los métodos simplificados propuestos se basan en métodos no lineales simplificados propuestos por primera vez en FEMA 273 y posteriormente desarrollados y mejorados por Tsopelas et al. (1997) y Ramirez et al. (2000), plantearon que una estructura con incursiones inelásticas puede ser representada por una estructura lineal equivalente con un periodo efectivo que representa la degradación de la rigidez.

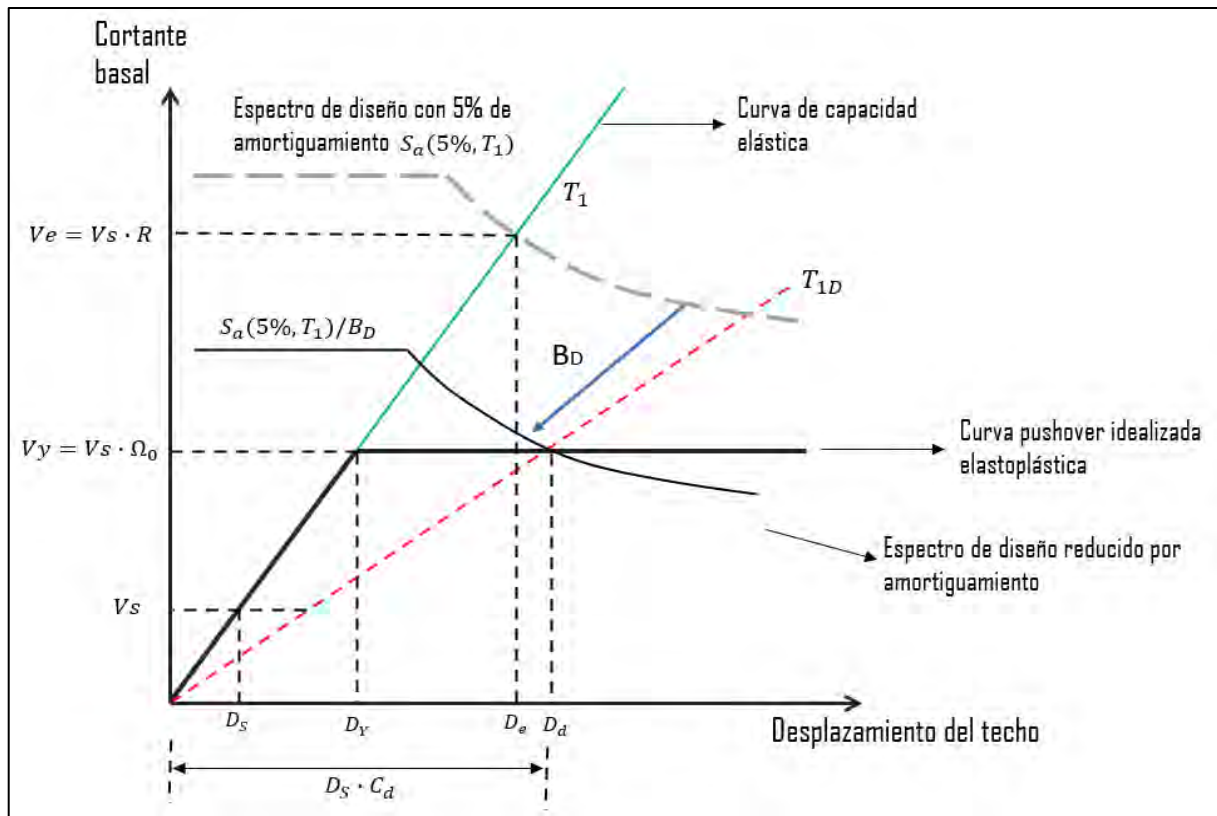


Figura 17. Desplazamiento de techo vs Fuerza cortante. Adaptado de (Whittaker, 2003)

En la Figura 17 se representa el comportamiento de la estructura en términos del desplazamiento del techo y su cortante basal mediante una curva de capacidad idealizada elastoplástica. La respuesta elástica e inelástica de la estructura se obtiene de la intersección de la curva de capacidad y el espectro de diseño. La línea punteada roja es una representación lineal equivalente del comportamiento no lineal de la estructura, en donde la degradación de la rigidez de la estructura, debido a las incursiones inelásticas, se representa mediante el periodo efectivo T_{1D} que es igual al producto del periodo fundamental por la raíz

cuadrada de la demanda de ductilidad ($T_{1D} = T_1\sqrt{\mu_D}$). A continuación, se definen cada uno de los términos mostrados en la Figura 17

Término	Descripción
Vs	Fuerza cortante basal de diseño
Vy	Fuerza cortante de fluencia
Ve	Fuerza cortante elástica
Ds	Desplazamiento elástico reducido
Dy	Desplazamiento de fluencia
De	Desplazamiento elástico
Dd	Desplazamiento inelástico de diseño
Bd	Factor de reducción del espectro por amortiguamiento
T1	Periodo elástico de vibración de la estructura
T1D	Periodo efectivo de vibración de la estructura
Ωo	Factor de sobre resistencia
Rμ	Factor de resistencia por ductilidad
R= Ωo x Rμ	Coefficiente de reducción de las fuerzas sísmicas

El factor de reducción de resistencia R_μ está relacionado disipación de energía histerética por parte del edificio y se define como la relación entre el cortante elástico V_e y el plástico V_y .

$$R_\mu = \frac{V_e}{V_y} = \frac{\Delta_e}{\Delta_y} \quad (4.22)$$

Se conoce como factor de sobre resistencia Ω_o a la relación entre el cortante plástico V_y y el cortante de diseño V_s .

$$\Omega_o = \frac{V_y}{V_s} = \frac{\Delta_y}{\Delta_s} \quad (4.23)$$

La razón entre la fuerza cortante elástica V_e y la cortante V_s , se denomina como coeficiente de reducción R y se emplea para reducir la cortante elástica a la fuerza cortante de diseño.

$$R = \frac{V_e}{V_s} = \frac{D_e}{D_s} = R_\mu \cdot \Omega_o \quad (4.24)$$

A partir del desplazamiento relacionado a la fuerza cortante de diseño D_s , se utiliza el factor de amplificación del desplazamiento C_d para estimar el desplazamiento inelástico D_d .

$$C_d = \frac{D_i}{D_s} = \mu \Omega_o \quad (4.25)$$

La Norma E.030 establece un método para estimar los desplazamientos inelásticos en estructuras ante eventos sísmicos, mediante la multiplicación del desplazamiento elástico por el factor C_d , cuyo valor es de $0.75R$ para estructuras regulares y $0.85R$ para estructuras irregulares. Los valores de R y C_d recomendados por las normas ASCE/SEI 7-22 y FEMA 273 y 274 han sido determinados a partir de estudios empíricos. En este sentido, las ecuaciones (4.23), (4.24) y (4.25) reflejan que el coeficiente R y el factor C_d se relacionan con el factor de reducción de resistencia R_μ , la sobre resistencia Ω_o y la ductilidad de desplazamiento μ .

Para el planteamiento de la normativa peruana, es importante tener valores razonables de sobre resistencia para los diferentes sistemas estructurales, sin embargo, actualmente las normas peruanas no indican valores de sobre resistencia estructural Ω_o explícitos que puedan tomarse como valores de referencia, por lo tanto, se optó por considerar los valores indicados en la norma americana ASCE/SEI 7 – 22, los cuales se muestran en la Tabla 10

Tabla 10. Valores del coeficiente básico de reducción y Coeficiente básico de sobre resistencia.

	Sistema Estructural	R	Ω_o
Acero	Pórticos especiales resistentes a momentos	8	3
	Pórticos intermedios resistentes a momentos	5	3
	Pórticos ordinarios resistentes a momentos	4	3
	Pórticos especiales concéntricamente arriostrados	7	2
	Pórticos ordinarios concéntricamente arriostrados	4	2
	Pórticos excentricamente arriostrados	8	2
Concreto Armado	Pórticos	8	3
	Dual	7	2.5
	Muros estructurales	6	2.5
	Muros de ductilidad limitada	4	2.5
Albañilería	Armada o Confinada	3	2.5
Madera		7	

Ω_o : Factores de sobrerresistencia tomado de la norma ASCE 7-22

R : Coeficiente básico de reducción de la NTP E.030 Diseño Sismorresistente

La sobre resistencia está en función a la hiper elasticidad del sistema, las variaciones en las características mecánicas de los materiales, el sobre dimensionamiento de elementos estructurales, las características asignadas al modelo estructural asignado, etc.

Al dividir las ecuaciones (4.25) entre (4.24) se obtiene

$$\frac{C_d}{R} = \frac{\Delta_i}{\Delta_e} = \frac{\mu}{R_\mu} \quad (4.26)$$

De acuerdo con la regla de desplazamientos iguales desarrollada por Veletsos y Newmark (1960) y lo establecido en la norma peruana E.030, las estructuras regulares tienen un desplazamiento inelástico que equivale al 75% del desplazamiento elástico para la zona de velocidades $T > T_p$ del espectro de diseño. Es importante destacar que la ecuación (4.26) no se ve afectada por la sobre resistencia. Por lo tanto, según la norma peruana E.030, en un análisis lineal, el valor mínimo para la relación μ/R_μ es de 0.75.

4.5.2 Procedimiento de análisis de respuesta espectral

Para llevar a cabo el procedimiento de Análisis de Respuesta Espectral, es necesario contar con un modelo matemático que represente la distribución espacial de masa, rigidez y amortiguamiento del sistema sismorresistente y del sistema de disipación. Dicho modelo debe cumplir con las especificaciones detalladas en el Artículo 25 de la Norma E.030.

4.5.2.1 Sistema Sismorresistente.

La estructura sismorresistente debe ser diseñada cumpliendo los requisitos establecidos en la Norma Técnica E.030 y satisfacer los criterios de regularidad y categoría correspondientes. Además, se deben seguir las disposiciones de detalle especificadas en la Norma Técnica de Edificación E.060 Concreto Armado y/o la Norma Técnica de Edificación E.090 Estructuras Metálicas.

El cortante basal de diseño de la estructura debe verificar que sea mayor al cortante mínimo indicado en la sección 4.3.1. La cortante de diseño V se calcula por medio de la regla de combinación modal SRSS.

Cortante basal modal.

El cortante basal modal V_m , para el modo "m" de vibración viene dado por

$$V_m = C_{sm} \bar{W}_m \quad (4.27)$$

$$\bar{W}_m = \frac{(\sum_{i=1}^n w_i \varphi_{im})^2}{\sum_{i=1}^n w_i \varphi_{im}^2} \quad (4.28)$$

Factor de participación modal.

Este factor, para cualquier modo de vibración se calcula mediante la expresión

$$\frac{L_m^*}{M_m^*} = \frac{\sum M_i \varphi_{im}}{\sum M_i \varphi_{im}^2} \quad (4.29)$$

Coefficiente sísmico para el modo fundamental.

El coeficiente sísmico para el modo fundamental se calcula utilizando la ecuación (4.30).

$$C_{S1} = \frac{Sa(T_{1D}, 5\%)}{\Omega_o B_{1D}} \quad (4.30)$$

Como se observa en la ecuación (4.30) el coeficiente sísmico C_{S1} reduce su resistencia a nivel de diseño dividiéndolo por el producto del factor de sobre resistencia Ω_o y el factor de reducción por amortiguamiento efectivo B_{1D} , esta reducción, a diferencia de la realizada en un análisis convencional elástico presentando en la Norma E.030 como $Sa(T1,5\%) / R$, se debe a que se está analizando una estructura lineal equivalente con propiedades modales efectivas.

Coefficiente sísmico para modos superiores

El coeficiente sísmico para los modos superiores se calcula de igual manera al coeficiente sísmico del modo fundamental.

$$C_{Sm} = \frac{Sa(T_m, 5\%)}{\Omega_o B_{mD}} \quad (4.31)$$

T_m representa el periodo de vibración correspondiente a los modos superiores de vibración de la estructura ($m > 1$). El coeficiente de reducción B_{mD} considera la reducción de respuesta por amortiguamiento en el rango elástico, es decir, solo considera el amortiguamiento inherente, propio de la estructura, y el viscoso debido al sistema de amortiguamiento.

Periodo efectivo fundamental del sistema sismorresistente.

A continuación, se presenta el procedimiento para determinar el valor del periodo efectivo de la estructura lineal equivalente considerada para aplicar los procedimientos simplificados.

Según Iwan y Gates (1979) el periodo efectivo fundamental de una estructura considera los efectos del comportamiento no lineal, el amortiguamiento adicional introducido por dispositivos de control (como disipadores o amortiguadores) y otras características de la estructura.

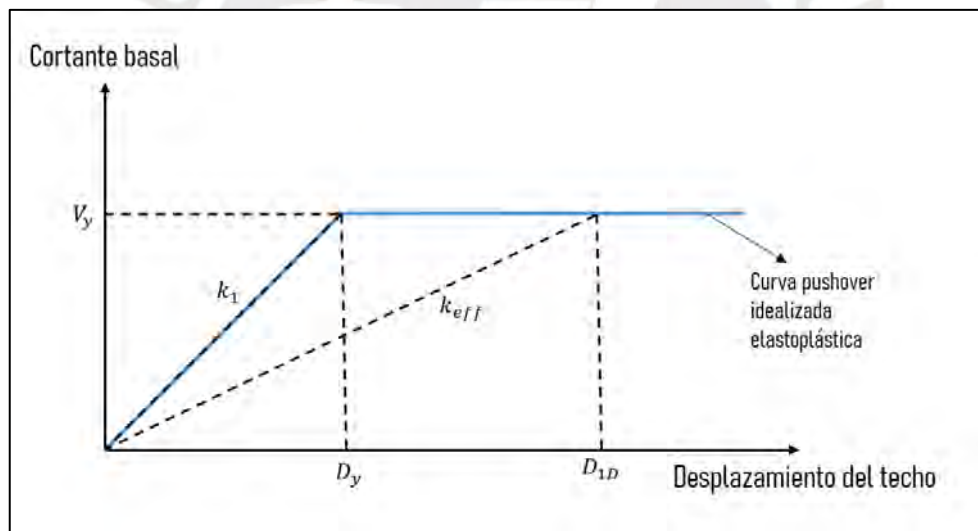


Figura 18. Curva pushover idealizada elastoplástica del sistema sismorresistente.

De la Figura 18 se tiene que k_1 es la rigidez elástica del sistema y k_{eff} es la rigidez efectiva del sistema lineal equivalente, donde

$$K_1 = \frac{V_y}{D_y} \tag{4.32}$$

Donde, V_y es la cortante de fluencia, D_y es el desplazamiento de fluencia y D_{1D} es el desplazamiento de diseño inelástico.

Ambas rigideces se pueden relacionar mediante las ecuaciones siguientes

$$K_{eff} D_{1D} = K_1 D_y \quad (4.33)$$

$$\left(\frac{T_{1D}}{T_1}\right)^2 = \frac{K_1}{K_{eff}} = \mu_D \quad (4.34)$$

Donde μ_D es la demanda de ductilidad del sistema, T_1 y T_{1D} son el periodo fundamental y periodo fundamental efectivo del sistema respectivamente.

De la ecuación (4.34), se obtiene la ecuación para determinar el periodo fundamental efectivo de del sistema sismorresistente para un Sismo de Diseño.

$$T_{1D} = T_1 \sqrt{\mu_D} \quad (4.35)$$

Fuerzas laterales de diseño.

La ecuación (4.36) muestra la expresión para calcular las fuerzas de diseño aplicadas en cada planta del edificio considerando para ello el 1er modo de vibración ($m=1$) y los modos superiores ($m>1$).

$$F_{mi} = \varphi_{im} \left(\frac{L^*}{M^*}\right)_m w_i \frac{V_m}{W_m} \quad (4.36)$$

La respuesta total debe ser determinada mediante el método de combinación SRSS.

4.5.2.2 Sistema de amortiguamiento.

Para el análisis y diseño del sistema de amortiguamiento se requiere hallar los valores de las demandas para los instantes de desplazamientos máximos, velocidades y aceleraciones que actúan en la estructura con los disipadores, de este modo se puede determinar las fuerzas que actúan en los disipadores y verificar la resistencia de los elementos que los sujetan teniendo en cuenta su inclinación respecto de la horizontal.

En esta sección se muestran las expresiones que sirven para estimar el desplazamiento de la estructura con los disipadores incorporados y las velocidades relativas que permiten calcular las demandas axiales en los disipadores

Desplazamiento elástico reducido correspondiente a la cortante basal de diseño.

El desplazamiento elástico reducido correspondiente a la cortante basal de diseño se calcula, por medio de la ecuación (4.37)

$$D_{Sm} = \left(\frac{L_m^*}{M_m^*} \right) \frac{g}{4\pi^2} T_m^2 \frac{S_a(T_{mD}, 5\%)}{B_{mD} \Omega_o} \quad (4.37)$$

Para el subíndice m=1 se refiere al modo de vibración fundamental y m>1 para los modos superiores.

Desplazamiento elástico.

El desplazamiento elástico se calcula con la ecuación (4.38). Este desplazamiento únicamente está reducido por el coeficiente de reducción por amortiguamiento para el rango elástico. El valor de este desplazamiento debe ser aproximadamente igual al desplazamiento inelástico de diseño D_{mD}

$$D_{1E} = g \cdot \left(\frac{L_1^*}{M_1^*} \right) \frac{T_1^2}{4\pi^2} \cdot \frac{S_a(T_1, 5\%)}{B_{1E}} \quad (4.38)$$

Desplazamiento de fluencia.

El desplazamiento de fluencia de la estructura es aquel que indica el inicio del régimen inelástico de la estructura, y se define como:

$$D_y = D_{S1} \cdot \Omega_o \quad (4.39)$$

Desplazamiento inelástico de diseño.

El desplazamiento inelástico está en función a la demanda de ductilidad μ_D de la estructura y el factor de sobre resistencia Ω_o . Con este desplazamiento máximo se determinan las fuerzas sísmicas correspondientes para el diseño del sistema de amortiguamiento. El desplazamiento inelástico de diseño se calcula mediante la siguiente ecuación.

$$D_{mD} = D_{Sm} \cdot C_d \quad (4.40)$$

Donde

$$C_d = \mu_D \cdot \Omega_o \quad (4.41)$$

Para calcular el factor de amplificación de desplazamiento C_d para los modos superiores, la ductilidad μ_D debe ser igual a la unidad, ya que se consideran que tienen comportamiento elástico.

Desplazamiento de piso.

Para calcular los desplazamientos de la estructura en el nivel "i" para el modo "m" de vibración, debido al sismo de diseño, se emplea la ecuación (4.42)

Estos desplazamientos son esenciales para el cálculo de las fuerzas de diseño en los DFV y los componentes del sistema de amortiguamiento.

$$\delta_{imD} = D_{mD} \varphi_{im} \quad (4.42)$$

El desplazamiento de cada piso se calcula mediante el método de combinación SRSS

Desplazamiento de entrepiso.

Se deben calcular los desplazamientos de entrepiso en la dirección analizada para el modo fundamental de vibración ($m=1$) y para los modos superiores de vibración ($m>1$) de la estructura. Estos desplazamientos se calcularán como la diferencia de desplazamiento relativo entre un piso superior y el inmediatamente inferior en la dirección analizada.

$$\Delta_{mD} = \delta_{imD} - \delta_{(i-1)mD} \quad (4.43)$$

Los desplazamientos de entrepiso totales deben ser determinadas por el método de combinación modal SRSS

Velocidad relativa de entre piso.

Las velocidades relativas de diseño de cada piso ∇_{mD} para el 1er modo $m=1$ y modos superiores $m>1$, deben ser calculadas de acuerdo a la ecuación (4.44)

$$\nabla_{mD} = 2\pi \frac{\Delta_{mD}}{T_m} \quad (4.44)$$

Las velocidades relativas de entrepiso resultantes para el diseño serán obtenidas mediante una combinación modal SRSS de las componentes de cada modo.

Es importante considerar que las velocidades relativas de entrepiso mencionadas están siendo obtenidas mediante un cálculo de velocidades espectrales, lo cual podría generar cierto margen de error al determinar las fuerzas axiales actuantes en los dispositivos de disipación de energía.

4.5.3 Procedimiento de Fuerzas Laterales Equivalentes (FLE)

El procedimiento de FLE emplea los mismos conceptos que el procedimiento de Respuesta Espectral para hallar las respuestas para el modo fundamental ($m=1$); sin embargo, para los modos superiores ($m>1$) condensa estas respuestas en un solo modo residual ($m=R$), el cual será desarrollado en la presente sección.

4.5.3.1 Sistema sismorresistente

El sistema sismorresistente debe cumplir las mismas condiciones y requisitos que lo expuesto para el procedimiento de Respuesta Espectral en la sección 4.5.2.1.

Cortante basal sísmica.

La cortante basal sísmica (V) del sistema sismorresistente se debe calcular considerando la cortante basal para el modo fundamental y para el modo residual, y debe cumplir con ser mayor a la fuerza cortante basal mínima. La cortante basal se define como

$$V = \sqrt{V_1^2 + V_R^2} \geq V_{min} \quad (4.45)$$

Cortante basal para el modo residual.

La cortante basal para el modo residual se calcula utilizando la ecuación

$$V_R = C_{SR} \bar{W}_R \quad (4.46)$$

Propiedades Modales residuales.

Las propiedades modales residuales de la estructura se calculan como

$$\varphi_{iR} = \frac{1 - \left(\frac{L_1^*}{M_1^*}\right)\varphi_{i1}}{1 - \left(\frac{L}{M}\right)_1} \quad (4.47)$$

$$\left(\frac{L_R^*}{M_R^*}\right) = 1 - \left(\frac{L_1^*}{M_1^*}\right) \quad (4.48)$$

$$\bar{W}_R = W - \bar{W}_1 \quad (4.49)$$

$$T_R = 0.4T_1 \quad (4.50)$$

Coefficiente sísmico para el modo residual.

El coeficiente sísmico para el modo residual viene dado por

$$C_{SR} = \frac{S_a(T_R, 5\%)}{\Omega_o B_R} \quad (4.51)$$

B_R = Coeficiente de reducción sísmico residual determinado en función al amortiguamiento efectivo para el modo residual.

Fuerza lateral de diseño.

La fuerza horizontal de diseño en la dirección analizada para cada piso del sistema sismorresistente, para el modo residual, se calcula mediante la siguiente ecuación

$$F_{iR} = \varphi_{iR}(L/M)_R w_i \frac{V_R}{W_R} \quad (4.52)$$

4.5.3.2 Sistema de amortiguamiento

Para determinar la demanda en los DFV y los elementos de sujeción, es importante conocer los desplazamientos y velocidades a los que está sometida la estructura debido a un sismo de diseño.

Desplazamiento elástico reducido para el modo residual

El desplazamiento elástico reducido para el modo residual, es aquel que corresponde a la cortante basal de diseño y se calcula, por medio de la (4.53)

$$D_{SR} = \left(\frac{g}{4\pi^2}\right) \left(\frac{L}{M}\right)_R T_R^2 \frac{S_d(T_R, 5\%)}{B_R \Omega_o} \quad (4.53)$$

Desplazamiento de diseño inelástico para el modo residual de vibración.

El desplazamiento de techo para el sismo de diseño para el modo residual, se calcula empleando la ecuación (4.54)

$$D_{RD} = D_{SR} \cdot C_d \quad (4.54)$$

$$C_d = \mu_D \cdot \Omega_o \quad (4.55)$$

La demanda de ductilidad, para este caso es igual a la unidad.

Desplazamiento de piso debido al sismo de diseño para el modo residual.

El desplazamiento de cada planta se calcula tanto para los modos fundamental y residual de vibración de la estructura, posteriormente el desplazamiento total de cada piso se evalúa mediante la regla de combinación SRSS. Los desplazamientos se calculan empleando la siguiente ecuación.

$$\delta_{iRD} = D_{RD} \varphi_{iR} \quad (4.56)$$

Desplazamiento de entrepiso – (modo residual)

Se deben calcular los desplazamientos de entrepiso en la dirección analizada para el modo residual ($m=R$) de la estructura. Estos desplazamientos se calcularán como la diferencia de desplazamiento relativo entre un piso superior y el inmediatamente inferior en la dirección analizada.

$$\Delta_{RD} = \delta_{iRD} - \delta_{(i-1)RD} \quad (4.57)$$

Luego el desplazamiento total se calcula realizando una combinación modal SRRS con el desplazamiento del primer modo y el residual, tal y como lo muestra la ecuación (4.58)

$$\Delta_D = \sqrt{\Delta_{1D}^2 + \Delta_{RD}^2} \quad (4.58)$$

Velocidad de piso para el sismo de diseño – (modo residual)

La velocidad de diseño de entrepiso para el modo residual y velocidad total se calcula con las siguientes ecuaciones:

$$\nabla_{RD} = 2\pi \frac{\Delta_{RD}}{T_R} \quad (4.59)$$

$$\nabla_D = \sqrt{\nabla_{1D}^2 + \nabla_{RD}^2} \quad (4.60)$$

4.6 Respuesta modificada por amortiguamiento

Los factores de reducción por amortiguamiento calculados en la sección 2.6.1 para sismos de la costa peruana y del norte de Chile fueron calculados para periodos mayores a T_p , además se mostró que son mayores que los propuestos en la norma americana y los propuestos por Newmark y Hall (1982), por tal motivo, se propone la fórmula planteada por dicho autor para calcular el factor de reducción por amortiguamiento ya que permite calcular el factor B_D para cualquier porcentaje de amortiguamiento agregado y además resulta

conveniente su utilización para desarrollar los métodos de análisis utilizando hojas de cálculo computacionales.

$$B_D = \frac{1.65}{2.31 - 0.41 \ln(100\beta_{mD})} \quad (4.61)$$

4.6.1 Amortiguamiento efectivo.

El amortiguamiento efectivo, como lo indica la Sección 2.3, está compuesto por el amortiguamiento inherente de la estructura β_i propio de la estructura, el viscoso β_v debido al sistema de amortiguamiento y el histerético β_H debido a las incursiones inelásticas de la estructura. Cabe indicar que la norma mexicana considera solamente el amortiguamiento inherente y el viscoso; sin embargo, la norma americana, considera los tres tipos de amortiguamiento antes mencionados, dado que los procedimientos simplificados propuestos toman en consideración las incursiones inelásticas de la estructura, en esta propuesta se incluyen los tres tipos de amortiguamiento.

La ecuación (4.62) calcula el amortiguamiento efectivo total del sistema.

$$\beta_{mD} = \beta_i + \beta_{vm}(\mu_D)^{1-\alpha/2} + \beta_{HD} \quad (4.62)$$

Para los modos superiores de vibración ($m > 1$), se debe considerar una demanda de ductilidad igual a la unidad.

Amortiguamiento inherente

El amortiguamiento depende en gran medida del material utilizado, la disposición estructural y el comportamiento dinámico tanto de los elementos estructurales como no estructurales antes de que se alcance la zona de fluencia. Se considera $\beta_i = 0.05$

Amortiguamiento Histerético.

El amortiguamiento histerético se calcula empleando la siguiente ecuación.

$$\beta_{HD} = q_H(0.64 - \beta_i)\left(1 - \frac{1}{\mu_D}\right) \quad (4.63)$$

Factor de ajuste de lazo histerético.

El factor de ajuste de lazo histerético se planteó en la Sección 2.3, basado en un estudio de Ramirez et al. (2000).

$$q_H = 0.67 \frac{T_p}{T_1}, \quad 0.5 \leq q_H \leq 1.0 \quad (4.64)$$

Amortiguamiento viscoso dado por los disipadores de energía.

Para $m=1$

$$\beta_{v1} = \frac{\sum_j (2\pi)^{\alpha_j} T_1^{2-\alpha_j} \lambda_j C_j (\cos \theta_j)^{1+\alpha} D_t^{\alpha_j-1} \phi_{rj}^{1+\alpha_j}}{8\pi^3 \sum_i \left(\frac{w_i}{g}\right) \phi_{i1}^2} \quad (4.65)$$

Para $m>1$ (Modos superiores)

$$\beta_{vm} = \left(\frac{T_m}{4\pi}\right) \frac{\sum_j C_{effj} (\cos \theta_j)^2 \phi_{rj}^2}{\sum_i \left(\frac{w_i}{g}\right) \phi_{im}^2} \quad (4.66)$$

$$C_{eff} = \alpha_j C_j \dot{u}_1^{\alpha_j-1} \quad (4.67)$$

$$\phi_{rj} = \phi_{ij} - \phi_{(i-1)j} \quad (4.68)$$

El cálculo del porcentaje de amortiguamiento viscoso para los modos superiores y el residual se calcula mediante las ecuaciones (4.66), (4.67) y (4.68) propuestas por Seleemah y Constantinou (1997) en las cuales observaron que las respuestas de los modos altos para pequeñas amplitudes y frecuencias altas de movimiento se basan en torno al primer modo de vibración, por lo tanto se propuso una constante de amortiguamiento efectivo, que como se observa en la ecuación (4.67), está en función a la velocidad del primer modo y se toma como la pendiente de la curva fuerza-velocidad de un dispositivo, tal y como se muestra en la figura Figura 19.

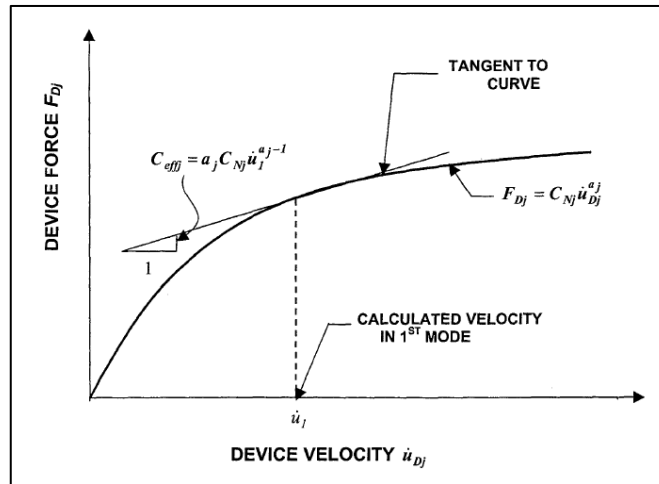


Figura 19. Constante de amortiguamiento para DFV no lineales para modos superiores. Tomado de (Ramirez et al., 2000)

Tabla 11. Valores del parámetro λ

Exponente α	Parámetro λ
0.00	4.000
0.25	3.723
0.50	3.496
0.75	3.305
1.00	3.142 (=π)
1.25	3.000
1.50	2.876
1.75	2.765
2.00	2.667

La Tabla 11 muestra los valores del parámetro lambda.

4.7 Factores de combinación para cargas sísmicas de diseño.

Dado que las fuerzas sísmicas máximas que afectan al sistema de amortiguamiento se presentan en momentos diferentes, es complicado calcular las fuerzas internas máximas de cada elemento del sistema mediante procedimientos estáticos. Por esta razón, la normativa estadounidense sugiere que el ingeniero responsable evalúe las fuerzas en cada componente del sistema de amortiguamiento en tres etapas de deformación, considerando como fuerza de diseño el valor máximo obtenido de estos tres instantes.

1. Etapa de máximo desplazamiento: Representado por el punto A de la Figura 20
2. Etapa de máxima velocidad y sin desplazamiento: Representado por el punto B de la Figura 20
3. Etapa de máxima aceleración de piso: Representado por el punto C en la Figura 20

La norma mexicana, por su parte, solo propone que se tomen las fuerzas máximas de entre los estados de máximo desplazamiento y máxima velocidad; sin embargo, para el caso de esta propuesta, se indica que la evaluación de las máximas demandas se haga para los tres estados antes mencionados.

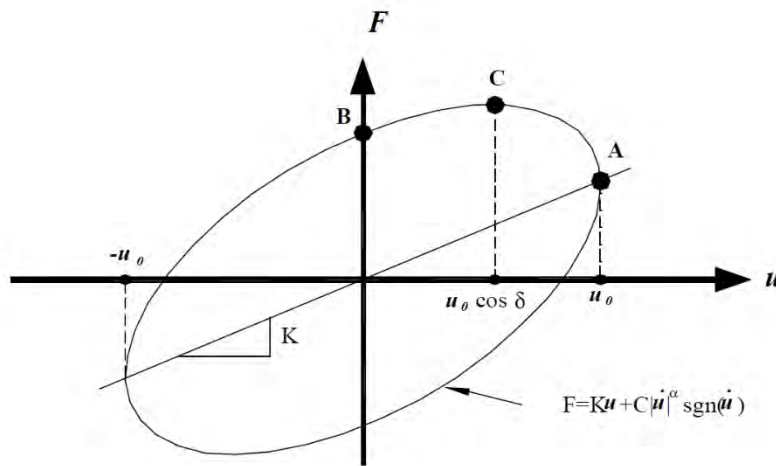


Figura 20. Relación fuerza - desplazamiento de una estructura con amortiguadores viscosos. (Hwang, 2002)

Para determinar las fuerzas para la etapa de máxima aceleración, se propone, al igual que la norma americana, una combinación de las fuerzas máximas para los instantes de máximo desplazamiento y máxima velocidad según la siguiente ecuación.

$$F_{imAmax} = CF1 \cdot F_{im(max.despl.)} \cdot \Omega_o + CF2 \cdot F_{im(max.vel)} \quad (4.69)$$

$$\text{Si, } \cos(\delta) \cdot \mu_D < 1; CF_1 = \cos(\delta) \cdot \mu_D \quad (4.70)$$

$$\cos(\delta) \cdot \mu_D \geq 1; CF_1 = 1 \quad (4.71)$$

$$CF_2 = \text{sen}(\delta)^\alpha \quad (4.72)$$

Para DFV lineales

$$\delta = \tan^{-1}(2\beta_{mD}) \quad (4.73)$$

Para DFV no lineales

$$\delta = \left(\frac{2\pi\alpha\beta_{mD}}{\lambda} \right)^{\frac{1}{2-\alpha}} \quad (4.74)$$

El amortiguamiento efectivo se calcula como

$$\beta_{mD} = \beta_i + \beta_{mv}(\mu_D)^{1-\alpha/2} \quad (4.75)$$

4.8 Demanda de ductilidad efectiva máxima.

La investigación de Veletsos y Newmark (1960), propone unas reglas de diseño para sistemas de 1GDL en donde se emplea la demanda de ductilidad para diferentes zonas del espectro de pseudoaceleraciones. Para el rango de periodos cortos aplica el criterio de igualdad de energía de deformación.

$$\frac{V_y}{V_e} = \frac{1}{R_\mu} = \frac{1}{\sqrt{2\mu - 1}} \quad (4.76)$$

Y para el rango de periodos largos, aplica el criterio de desplazamiento iguales

$$\frac{V_y}{V_e} = \frac{1}{R_\mu} = \frac{1}{\mu} \quad (4.77)$$

En base a las ecuaciones (4.76) y (4.77) se proponen las siguientes expresiones para determinar la máxima ductilidad que se puede considerar cuando se aplican los métodos simplificados. Las siguientes expresiones se propusieron en la propuesta de norma.

Para $T_p \geq T_{1D}$

$$\mu_{m\acute{a}x} = \frac{1}{2} \left[\left(\frac{R}{\Omega_o U} \right)^2 + 1 \right] \quad (4.78)$$

Para $T_p \leq T_{1D}$

$$\mu_{m\acute{a}x} = \frac{R}{\Omega_o U} \quad (4.79)$$

Las ecuaciones (4.78) y (4.79) establecen la máxima ductilidad que se debe tener en cuenta, tanto para la zona de aceleraciones y velocidades del espectro de diseño respectivamente. Para determinar la máxima ductilidad se tiene en cuenta el factor de uso U que se define en la Norma E.030 y que depende de la importancia de la edificación. Por lo tanto, las edificaciones que tienen una mayor importancia o que son esenciales tendrán una ductilidad menor, lo que permite reducir el daño causado por los sismos.

4.9 Ensayos y pruebas.

Basado en lo mostrado en los ensayos y pruebas analizados y descritos en la sección 3.6 del Capítulo III de las normas internacionales, para la norma peruana se propone realizar ensayos considerando los mismos lineamientos.

Se propone someter a cada dispositivo de amortiguamiento a al menos 2000 ciclos continuos de ensayo bajo cargas de viento. La carga de viento debe aplicarse con amplitudes y frecuencias igual al inverso del periodo fundamental de la estructura. Sin embargo, se pueden omitir estas pruebas si los dispositivos no están expuestos a fuerzas o desplazamiento significativos de viento.

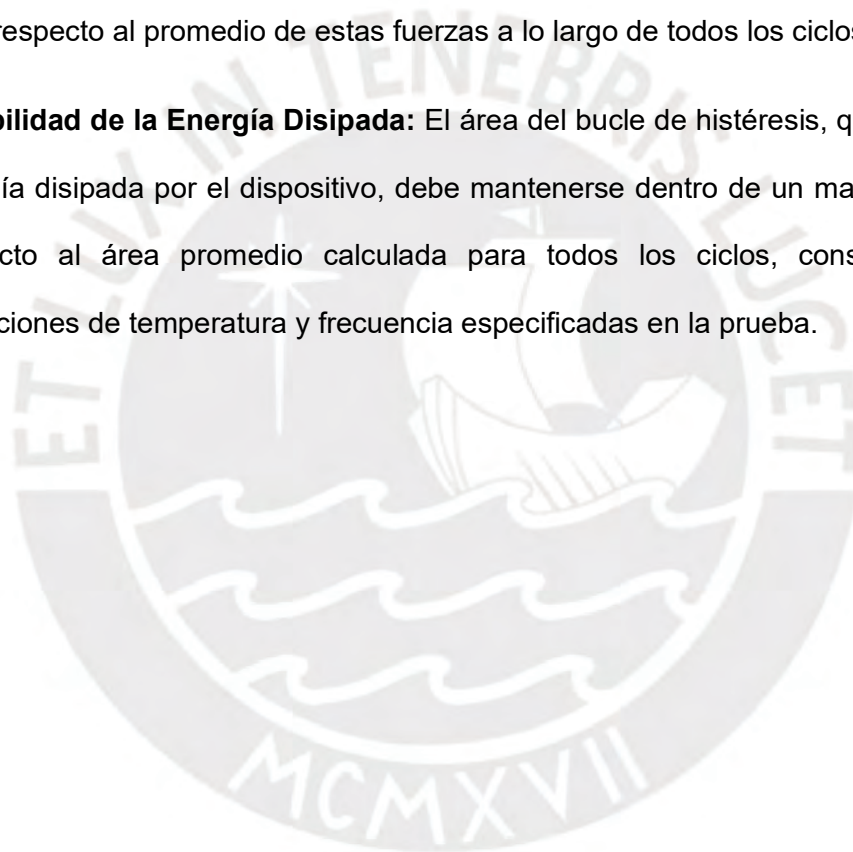
Además, cada dispositivo debe ser sometido a una secuencia de ciclos sinusoidales a una frecuencia de $1/1.5T_1$, donde T_1 es el periodo fundamental de la estructura.

- a) 10 ciclos completos de desplazamiento en el dispositivo correspondiente a 0.33 veces el desplazamiento bajo condiciones de SMC.
- b) 5 ciclos completos de desplazamiento en el dispositivo correspondiente a 0.67 veces el desplazamiento bajo condiciones de SMC.
- c) 3 ciclos completos de desplazamiento en el dispositivo correspondiente a 1.0 veces el desplazamiento del dispositivo bajo las condiciones de SMC.

4.10 Criterios de aceptación del disipador.

Todas las normas internacionales analizadas, coinciden en 3 criterios de aceptación del disipador, los cuales pueden ser propuestos en la norma peruana.

1. **Integridad Física:** No se permite la aparición de daños visibles como fugas, deformaciones, roturas, o fallas en los sellos.
2. **Consistencia de Fuerza en Desplazamiento Nulo:** La diferencia entre las fuerzas máximas y mínimas en desplazamiento cero, para cualquier ciclo, no debe exceder el 15% respecto al promedio de estas fuerzas a lo largo de todos los ciclos de prueba.
3. **Estabilidad de la Energía Disipada:** El área del bucle de histéresis, que significa la energía disipada por el dispositivo, debe mantenerse dentro de un margen del 15% respecto al área promedio calculada para todos los ciclos, considerando las condiciones de temperatura y frecuencia especificadas en la prueba.



CAPÍTULO V: Aplicación de la norma propuesta a un caso de estudio

El presente capítulo muestra la aplicación de la propuesta normativa a un edificio de 6 pisos de concreto armado regular ubicado en la ciudad de Lima. El análisis del edificio se llevó a cabo en una sola dirección omitiendo los efectos por torsión y utilizando un Sismo de Diseño con un periodo de retorno de 475 años ($PGA = 0.45g$) y utilizando disipadores de fluido viscoso (DFV) lineales con un amortiguamiento agregado del 15% y DFV No Lineales con un amortiguamiento agregado del 15% y 20%.

5.1 Características del edificio.

El edificio está localizado en la ciudad de Lima, el cual se asienta sobre un suelo de tipo S1. El edificio de 6 cuenta con un área de 5400 m². Este edificio tiene como uso principal el de oficinas. Para el sistema estructural se eligió un sistema aporticado, compuesto por 6 pórticos en cada dirección, con una separación de columnas de 6 metros. La altura del primer entrepiso es de 4 metros, mientras que la altura de los demás es de 3.4 metros, lo que da una altura total de 21 metros. La Figura 21 muestra el modelo del edificio.

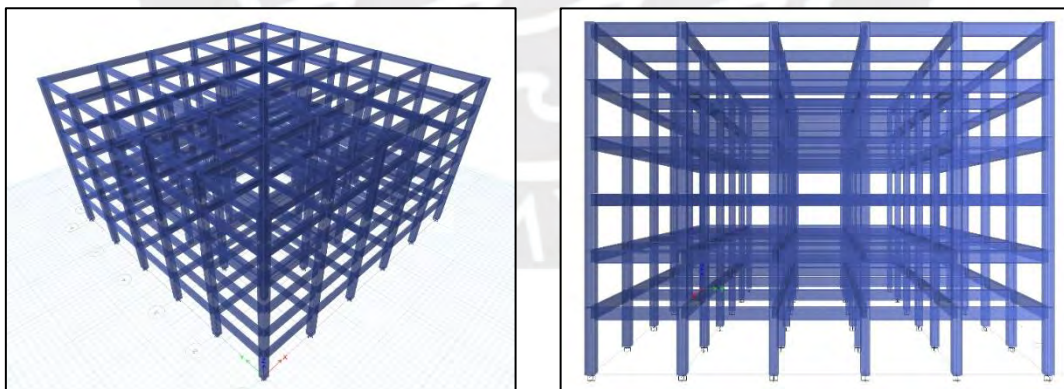


Figura 21. Edificio de 6 niveles de concreto armado.

Las cargas atribuidas al modelo del edificio están establecidas en la Norma E.020 Cargas y son las siguientes:

Tabla 12. Cargas de gravedad.

Tipo	Elemento	Carga (kg/m ²)
Carga muerta	Losa	480
	Piso terminado	100
	Muros cortinas	50
Carga viva	Pisos 1 - 5	250
	Azotea	100
	Tabiquería móvil	50

Para realizar el análisis modal, y sísmico, se utilizaron los parámetros que definen el espectro de aceleraciones espectrales indicados por la Norma Técnica Peruana E.030 Diseño Sismorresistente.

- Factor de zona (Z) = 0.45
- Factor de suelos (S) = 1.00
- Periodo de inicio de la zona de velocidades (Tp) = 0.40 seg
- Periodo de inicio de la zona de desplazamientos (TL) = 2.50 seg.
- Factor de uso (U) = 1.00
- Coeficiente básico de reducción (Ro) = 8.00
- Factor de irregularidad por altura (Ia) = 1.00
- Factor de irregularidad en planta (Ip) = 1.00
- Coeficiente de reducción (R = Ro*Ia*Ip) = 8.00
- Ubicación de la edificación: Zona 4
- Categoría del edificio: C – edificio común

De acuerdo con lo establecido en la Norma E.030 Diseño Sismorresistente, se puede considerar que la fuerza sísmica actúa de manera independiente en las direcciones ortogonales de análisis para estructuras que son regulares. El peso sísmico del edificio se calculó utilizando el 100% de la carga muerta y el 25% de la viva. El análisis sísmico espectral de los edificios sin disipadores se llevó a cabo mediante el uso del software ETABS v.20. El edificio de 6 pisos tiene secciones de columnas de 60cm x 60cm y vigas de 30cm x 55cm.

5.2 Análisis estático y dinámico de la estructura sin disipadores.

Primeramente, se procedió a estimar el periodo para el 1er modo de vibración de la estructura empleando para ello la ecuación indicada en la sección 4.5.4 indicada en la norma E.030.

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{(\sum_{i=1}^n P_i \cdot d_i^2)}{(g \cdot \sum_{i=1}^n f_i \cdot d_i)}}$$

En donde el subíndice "i" hace referencia a cada piso de la estructura. P_i es el peso de cada piso, d_i es el desplazamiento de cada piso, f_i es la fuerza aplicada en cada piso y g es la gravedad. Para estimar el periodo fundamental de la estructura, se supondrá que la estructura tiene vigas indeformables y la deformada del edificio es de tipo corte, por lo tanto, los desplazamientos laterales se pueden estimar por medio de las rigideces de entrepiso.

Piso	Masa (tonf*s2/m)	Fi (ton)	Di (m)	M*Di^2	Fi*Di
6	75.15	4.921	0.002115	0.000336155	0.01040792
5	88.57	5.362	0.001955	0.000338518	0.01048271
4	88.57	4.618	0.001684	0.000251173	0.00777671
3	88.57	3.578	0.001305	0.000150838	0.00466929
2	88.57	2.322	0.000847	6.35412E-05	0.00196673
1	95.86	1.022	0.000369	1.21905E-05	0.00037712
				0.001152416	0.03568048

$$T = 1.13 \text{ seg}$$

Al aplicar la fórmula para hallar el periodo, se estimó un periodo de 1.13 segundos

Posteriormente, se calculó el cortante estático considerando el periodo $T=1.13$ seg. y el peso sísmico de la estructura ($CM+0.25CV$)

$$V_{est} = \frac{ZUCS}{R} * P = \frac{0.45 * 1 * 0.88 * 1}{8} * 5153 \text{ ton} = 255 \text{ ton}$$

Luego, se realizó un análisis modal utilizando el software Etabs y se obtuvieron los periodos de vibración traslacionales de la estructura, ya que los métodos propuestos fueron aplicados en cada dirección de análisis por separado. La Tabla 13 muestra los periodos de vibración modal de la estructura.

Tabla 13. Periodos de vibración modal traslacionales de la estructura

Caso	Periodo (segundos)	% Masa Participante
Modo 1	1.129	83.1
Modo 2	0.349	10.4
Modo 3	0.186	3.91
Modo 4	0.117	1.74
Modo 5	0.083	0.67
Modo 6	0.066	0.16

La norma E.030 indica que la cortante de diseño debe ser al menos el 80% del cortante basal estático para estructuras regulares, en este caso, el 80% del cortante basal estático es de 204 toneladas, sin embargo, el cortante basal dinámico es 227 toneladas, por lo tanto, se considera este valor como la fuerza cortante basal de diseño.

5.3 Desplazamiento del techo y deriva de entrepiso del edificio sin disipadores.

La muestra los desplazamientos inelásticos de diseño del edificio y las derivas de entrepiso. Se observa que la deriva de entrepiso del segundo nivel sobrepasa al máximo valor permitido por la Norma E.030 y la cual se reducirá mediante la incorporación de un sistema de amortiguación.

Tabla 14. Desplazamientos y derivas del edificio sin disipadores.

Edificio sin disipadores			
Piso	Desplazamiento-Elástico/R (cm)	Desplazamiento Inelástico (cm)	Derivas x 0.75R
6	2.07	12.42	0.004
5	1.90	11.40	0.005
4	1.64	9.84	0.007
3	1.28	7.68	0.008
2	0.84	5.04	0.008
1	0.37	2.22	0.006

5.4 Análisis sísmico del edificio con DFV

El análisis del edificio con DFV, considerando a los disipadores con una configuración lineal y no lineal, se realizó aplicando los métodos simplificados de Análisis de Respuesta Espectral y análisis por Fuerza Lateral Equivalente.

Para aplicar los procedimientos, se debe cumplir primeramente los requisitos generales de diseño del sistema sismorresistente y el sistema de amortiguamiento indicados en la sección 4.3

Dado que la Norma E.030 no señala valores para los factores de sobre resistencia Ω_o , se van a considerar los valores presentados en la norma norteamericana ASCE 7-22 y el factor de amplificación de desplazamiento C_d será igual al producto de la sobre resistencia y la ductilidad del sistema.

Las respuestas finales de los procedimientos simplificados se compararon con resultados de los procedimientos tiempo-historia no lineales.

Los requerimientos propuestos indican que una estructura que cuente con un sistema de amortiguamiento incorporado podría, como mínimo, ser diseñada con una fuerza cortante basal igual al mayor valor de $\frac{V}{B_{V+I}}$ o $0.85V$ y como máximo una fuerza igual a $1.00V$, donde V es la fuerza cortante de diseño calculada para el edificio según lo indica la Norma E.030 y B_{V+I} es el factor de reducción por amortiguamiento de la estructura en condiciones elásticas.

Para determinar la cortante basal mínima de diseño, primero se hallan las propiedades modales de la estructura y luego el factor de reducción por amortiguamiento B_{V+I} .

El procedimiento de cálculo propuesto es el siguiente.

1. Etapa Elástica, calcular:

- 1.1. Propiedades modales de la estructura.
- 1.2. Proponer un porcentaje de amortiguamiento viscoso (β_v) y hallar la constante de amortiguamiento de los disipadores.
- 1.3. Factor de reducción por amortiguamiento elástico (B_E)
- 1.4. Desplazamiento elástico reducido D_E / B_E
- 1.5. Cortante basal mínimo $V_{\min} = (V / B_E \text{ o } 0.85V)$

2. Sistema sismorresistente, calcular:

- 2.1. Asumir una demanda de ductilidad, μ_D
- 2.2. Periodo efectivo, $T_1 \sqrt{\mu_D}$
- 2.3. Amortiguamiento efectivo $\beta_D = \beta_i + \beta_v \sqrt{\mu_D} + \beta_h$
- 2.4. Factor de reducción por amortiguamiento efectivo B_D
- 2.5. Desplazamiento de diseño D_s
- 2.6. Cortante basal de diseño $V_s \geq V_{\min}$
- 2.7. Verificación de la demanda de ductilidad asumida.

3. Sistema de amortiguamiento, calcular:

- 3.1. Instante de máximo desplazamiento.
 - 3.1.1. Desplazamientos inelásticos para todos los pisos $D_d = D_s \cdot C_d$
 - 3.1.2. Fuerzas sísmicas por piso F_{SD}
- 3.2. Instante de máxima velocidad.
 - 3.2.1. Velocidades espectrales.
 - 3.2.2. Fuerzas axiales en los disipadores.
 - 3.2.3. Fuerzas sísmicas por piso F_{SV}
- 3.3. Instante de máxima aceleración
 - 3.3.1. Fuerzas sísmicas por piso $F_{SA} = CF1 \cdot \Omega + CF2 \cdot F_{SV}$

Nota: Se debe hallar las respuestas para cada modo de vibración (fundamental, superiores y residual), la respuesta final se obtiene mediante una combinación modal.

La Tabla 15 muestra las masas por nivel y las formas modales para los 6 modos traslacionales del edificio, los cuales fueron halladas empleando el software *Etabs V20*.

Tabla 15. Masas por nivel y formas modales

PISO	Masa (Tonf/g)	MODO 1	MODO 2	MODO 3	MODO 4	MODO 5	MODO 6
6	75.15	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
5	88.57	0.924	0.421	-0.357	-1.232	-2.054	-2.600
4	88.57	0.796	-0.311	-1.054	-0.408	1.674	4.000
3	88.57	0.616	-0.852	-0.308	1.366	0.185	-4.444
2	88.57	0.403	-0.923	0.865	0.049	-1.880	3.867
1	95.86	0.175	-0.522	0.930	-1.423	1.978	-2.400

La Tabla 16 muestra los periodos de cada modo, el peso efectivo y el factor de participación modal de la estructura, los cuales se definen con las siguientes ecuaciones

El peso efectivo se calcula como

$$\bar{W} = \frac{(\sum M_i \varphi_i)^2}{\sum M_i \varphi_i^2} \cdot g \quad (5.1)$$

Y el factor de participación modal se define como

$$FP = \frac{\sum M_i \varphi_i}{\sum M_i \varphi_i^2} \quad (5.2)$$

Donde M_i es la masa correspondiente a cada nivel y φ_i es la forma modal, el subíndice i representa el número de piso.

Tabla 16. Propiedades modales del edificio.

PROPIEDAD	MODO 1	MODO 2	MODO 3	MODO 4	MODO 5	MODO 6
Periodo (seg.)	1.129	0.349	0.186	0.117	0.083	0.066
Peso efectivo	4258	553	225	111	46	12
Factor de participación modal	1.30	1.31	1.15	0.83	0.56	0.28

El desplazamiento máximo del techo fue de 12.42 cm y las derivas de entrepiso máxima fue 0.0083 en el segundo piso, el cual es mayor a la máxima deriva admisible en la normativa peruana (0.007).

Las secciones consideradas en el pre dimensionamiento cumplen lo estipulado en la norma E.030 de manera holgada, sin embargo, las dimensiones de sus secciones están en función a la deriva admisible máxima.

5.4.1 Análisis del edificio con DFV lineales.

En la siguiente sección se presentará paso a paso la aplicación de los métodos simplificados propuestos en el presente trabajo (Respuesta Espectral y Fuerzas Laterales equivalentes). Se consideró que el sistema de amortiguamiento (compuesto por 4 disipadores por piso) brinde un amortiguamiento equivalente al 15% del crítico, y sumado al amortiguamiento inherente del 5% de la estructura se obtuvo un amortiguamiento efectivo total del 20%.

PASO 1: Cálculo del factor de reducción por amortiguamiento en condiciones elásticas.

Utilizando la ec.(4.61) propuesta por Newmark y Hall (1982), se calculó el factor de reducción por amortiguamiento en condiciones elásticas para el modo fundamental B_{1E}

$$B_{1E} = \frac{1.65}{2.31 - 0.41 \ln(100\beta)} = \frac{1.65}{2.31 - 0.41 \ln(100 * 0.20)} = 1.53$$

PASO 2: Determinación de la fuerza cortante mínima de diseño

La fuerza cortante basal mínima de diseño se consideró como el máximo valor de (227/1.53 = 148 ton) o (0.85*227=193 ton), por lo tanto, se considera un V_{min} igual a 193 tonf.

PASO 3: Cálculo de la constante de amortiguamiento de los disipadores DFV

Se calculó la constante de amortiguamiento C_j que aporta el sistema de disipadores que brinda el 15% de amortiguamiento viscoso. Esta constante se obtuvo despejándola de la ecuación (4.65)

$$\beta_{v1} = \frac{\sum_j (2\pi)^{\alpha_j} T_1^{2-\alpha_j} \lambda_j C_j (\cos \theta_j)^{1+\alpha_j} D_t^{\alpha_j-1} \phi_{rj}^{1+\alpha_j}}{8\pi^3 \sum_i \left(\frac{w_i}{g}\right) \phi_{i1}^2} = 0.15$$

Ya que se está utilizando disipadores lineales, el valor de α_j es igual a 1 y $\lambda_j = \pi$ de donde se obtiene la siguiente expresión:

$$\beta_{v1} = \frac{T_1 \sum_j C_j (\cos \theta_j)^2 \phi_{rj}^2}{4\pi \sum_i \left(\frac{w_i}{g}\right) \phi_{i1}^2}$$

T_1 es el periodo fundamental de la estructura, $\cos \theta_j$ es el coseno del ángulo de inclinación de cada disipador respecto de la horizontal, ϕ_{rj} es la diferencia del desplazamiento modal de los extremos del disipador, w_i/g es la masa de cada piso y ϕ_{i1} es la forma modal del primer modo de la estructura. A continuación, se muestra el valor de cada expresión

T_1	Periodo fundamental de la estructura (segundos)	1.129
$\sum_j C_j (\cos \theta_j)^2 \phi_{rj}^2$	Sumatoria del coseno del ángulo de inclinación de los disipadores	430.57
$\sum_i \left(\frac{w_i}{g}\right) \phi_{i1}^2$	Sumatoria del producto de las masas de cada piso y la forma modal fundamental.	257.89
β_{v1}	Amortiguamiento viscoso agregado por el sistema de amortiguamiento incorporado	0.15
C_j	Coefficiente de amortiguamiento de cada disipador de fluido viscoso (tonf*s/m)	743.9

El subíndice "j" hace referencia a cada uno de los DFV instalados en el edificio, y el subíndice "i" a cada piso de la estructura.

PASO 4: Cálculo del desplazamiento elástico reducido

Se halló el desplazamiento elástico (D_{1E}) del primer modo de vibración de la estructura reducido por el coeficiente B_{1E} . usando la ecuación (4.38)

$$D_{1E} = g \cdot \left(\frac{L_1^*}{M_1^*} \right) \frac{T_1^2}{4\pi^2} \cdot \frac{S_a(T_1, 5\%)}{B_{1E}} = 10.74 \text{ cm}$$

Donde

g :	Aceleración de la gravedad (cm/s ²)	981
$\frac{L_1^*}{M_1^*}$:	Factor de participación para el modo fundamental	1.30
T_1^2 :	Periodo elástico	1.28
$S_a(T_1, 5\%)$:	Aceleración espectral para un 5% de amortiguamiento	0.40
B_{1E} :	Factor de reducción de respuesta elástico por amortiguamiento	1.53

Cálculos para el sistema sismorresistente

PASO 5: Cálculo del factor de reducción de respuesta por amortiguamiento efectivo.

Se calculó el valor del factor de reducción de respuesta por amortiguamiento efectivo B_{1D} que considera el porcentaje de amortiguamiento crítico efectivo. Este amortiguamiento para el primer modo de vibración se calcula con la ecuación (4.62)

$$\beta_{1D} = \beta_i + \beta_v(\mu_D)^{1-\alpha/2} + \beta_{HD}$$

β_i :	Amortiguamiento inherente de la estructura	5%
β_v :	Amortiguamiento viscoso por los disipadores	15%
β_{HD} :	Amortiguamiento histerético por las incursiones inelásticas	14%
α :	Exponente de velocidad, por ser lineal recibe el valor 1.	1.00
μ_D :	Ductilidad asumida, y posteriormente verificada	1.97

El amortiguamiento histerético se calculó utilizando la ecuación (4.63)

$$\beta_{HD} = q_H(0.64 - \beta_i) \left(1 - \frac{1}{1.97}\right) = 0.5 \cdot (0.64 - 0.05) \left(1 - \frac{1}{1.97}\right) = 0.15$$

El factor de ajuste del lazo histerético q_H viene dado por

$$q_H = 0.67 \frac{T_p}{T_1} = 0.67 \frac{0.4}{1.129} = 0.24$$

El factor q_H toma valores entre 0.5 y 1.00, por lo tanto, se considera $q_H=0.5$.

Finalmente, el amortiguamiento efectivo se calculó de la siguiente manera:

$$\beta_{1D} = \beta_i + \beta_v(\mu_D)^{1-\alpha/2} + \beta_{HD} = 0.05 + 0.15\sqrt{1.97} + 0.16 = 0.41$$

Con el amortiguamiento efectivo anteriormente calculado, se obtuvo el factor de reducción por amortiguamiento B_{1D} utilizando (4.61)

$$B_{1D} = \frac{1.65}{2.31 - 0.41 \ln(100\beta)} = \frac{1.65}{2.31 - 0.41 \ln(100 * 0.41)} = 2.08$$

PASO 6: Cálculo del desplazamiento inelástico de diseño.

Para hallar el desplazamiento inelástico de diseño, primero, se calculó el desplazamiento de diseño elástico reducido D_{S1} para el modo fundamental de vibración de la estructura utilizando la ecuación (4.37)

$$D_{S1} = \left(\frac{L_1^*}{M_1^*}\right) \frac{g}{4\pi^2} T_1^2 \frac{S_a(T_{1D}, 5\%)}{B_{1D}\Omega_o} = 1.87 \text{ cm}$$

De donde:

$\frac{L_1^*}{M_1^*}$	Factor de participación modal	1.30
T_1	Periodo elástico de la estructura (segundos)	1.129
T_{1D}	Periodo efectivo de la estructura igual a $T_1\sqrt{\mu_D}$ (segundos)	1.58
B_{1D}	Factor de reducción por amortiguamiento	2.08
Ω_o	Sobre resistencia del sistema estructural	3.00
$S_a(T_{1D}, 5\%)$	Aceleración espectral correspondiente al periodo efectivo	0.28g

El desplazamiento inelástico de diseño del techo para el modo fundamental se calcula utilizando la ecuación (4.40).

$$D_{1D} = D_{S1} * C_d = 1.87 \cdot \Omega_o \cdot \mu_D = 1.87 \cdot 3 \cdot 1.97 = 11.03 \text{ cm}$$

PASO 7: Cálculo del coeficiente de cortante basal sísmico

Se calculó el coeficiente de cortante basal sísmico para el modo fundamental, empleando la ecuación (4.30)

$$C_{S1} = \frac{Sa(T_{1D}, 5\%)}{\Omega_o B_{1D}} = \frac{0.28g}{3 \cdot 2.08} = 0.045g$$

La fuerza cortante basal de diseño para el modo fundamental, se obtiene como

$$V_1 = C_{S1} \bar{W}_1 = 0.045 \cdot 4258 = 193.4 \text{ tonf}$$

PASO 8: Verificación de la demanda de ductilidad asumida μ_D

Para verificar la demanda de ductilidad asumida, primero se calcula la fuerza cortante de fluencia mínima de la siguiente manera $V_{ymin} = \Omega_o \cdot V_{min} = 3 \cdot 0.85 \cdot 227 \text{ tonf} = 579 \text{ tonf}$

Luego se calculó el aporte que tiene la fuerza cortante del modo fundamental a la fuerza cortante de fluencia mínima. El aporte se calculó como $V_1 \cdot \Omega_o = 193.4 \cdot 3 = 580.2 \text{ tonf}$, se observa que el aporte de la cortante basal fundamental V_1 al cortante de fluencia mínima V_{ymin} es aproximadamente igual, por lo tanto, la ductilidad asumida $\mu_D = 1.90$ es un valor aceptable para fines del análisis.

Seguidamente, se calcula el valor máximo que puede adoptar la demanda de ductilidad mediante la ec. (4.79).

$$\mu_{m\acute{a}x} = \frac{R}{\Omega_o U} = \frac{8}{3 * 1} = 2.66$$

Paso 9: Cálculo de las propiedades modales residuales

Estas propiedades modales se calcularon para poder aplicar el procedimiento de Fuerzas Laterales Equivalentes.

$$\varphi_{iR} = \frac{1 - \left(\frac{L_1^*}{M_1^*}\right)\varphi_{i1}}{1 - \frac{L_1^*}{M_1^*}} = \begin{bmatrix} 1.000 \\ 0.669 \\ 0.111 \\ -0.675 \\ -1.605 \\ -2.597 \end{bmatrix}$$

$$\left(\frac{L_R^*}{M_R^*}\right) = 1 - \left(\frac{L_1^*}{M_1^*}\right) = -0.30$$

$$\bar{W}_R = W - \bar{W}_1 = 895$$

$$T_R = 0.4T_1 = 0.452$$

De donde

φ_{iR}	Forma modal residual
$\left(\frac{L_R^*}{M_R^*}\right)$	Factor de participación modal residual
\bar{W}_R	Peso efectivo residual
T_R	Periodo residual

La Tabla 17 muestra un resumen de los valores hallados de ductilidad, periodo efectivo, amortiguamiento efectivo, factor de reducción, desplazamientos elástico e inelástico y el cortante basal de diseño para los modos fundamental, superiores y residual. Los cálculos para hallar los valores de los modos superiores y residual son similares a los realizados con el modo fundamental; sin embargo, se considera que tienen un comportamiento elástico, es decir con una demanda de ductilidad igual a la unidad $\mu_D=1$.

Tabla 17. Cuadro resumen de los resultados para el modo fundamental, superiores y residual.

Aspecto	Modo 1	Modo 2	Modo 3	Modo 4	Modo 5	Modo 6	Modo R	SRSS -RE	SRSS-FLE
Ductilidad	1.97	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	-	-
Periodo elástico (segundos)	1.129	0.35	0.19	0.12	0.08	0.07	0.45	-	-
Periodo efectivo (segundos)	1.58	0.35	0.19	0.12	0.08	0.07	0.45	-	-
Amortiguamiento efectivo (β_v)	0.41	0.45	0.58	0.61	0.60	0.58	0.77	-	-
Factor de reducción BD	2.08	2.19	2.56	2.63	2.60	2.55	3.28	-	-
Desplazamiento elástico reducido	1.87	-0.24	0.03	-0.01	0.00	0.00	-0.15	1.88	1.92
Desplazamiento inelástico	11.03	-0.72	0.10	-0.02	0.00	0.00	-0.46	11.05	11.04
Cortante basal de diseño	193.41	94.73	32.91	15.80	6.66	1.70	90.7	218.54	213.62

Se observa que las cortantes basales de diseño en ambos procedimientos Respuesta Espectral (RE) ($V=218.5$ tonf) y Fuerzas Laterales Equivalentes (FLE) ($V=213.6$ tonf) cumplen con ser mayores al cortante basal mínimo exigido $V_{min} = 0.85V = 193$ tonf.

Sistema de amortiguamiento.

PASO 10: Cálculo de la respuesta para el instante de máximo desplazamiento

Para este instante se calcula el desplazamiento de cada piso de la estructura para el modo fundamental, modos superiores y modo residual, empleando la ecuación (4.42).

$$\delta_{imD} = D_{mD} * \varphi_m$$

En donde el subíndice “ $m=1$ ” indica el modo fundamental de vibración, $m>1$ para los modos superiores y $m=R$ para el modo residual. D_{mD} es el desplazamiento inelástico del techo para el modo “ m ” y φ_m es la forma modal para el modo “ m ”.

Tabla 18. Desplazamientos de piso (cm) para los modos fundamental, superiores y residual.

Piso	Modo 1	Modo 2	Modo 3	Modo 4	Modo 5	Modo 6	Modo R	SRSS-RE	SRSS-FLE
6	11.03	-0.72	0.10	-0.02	0.00	0.00	-0.46	11.05	11.04
5	10.19	-0.30	-0.03	0.02	-0.01	0.00	-0.31	10.20	10.20
4	8.78	0.22	-0.10	0.01	0.01	0.00	-0.05	8.79	8.78
3	6.80	0.61	-0.03	-0.03	0.00	0.00	0.31	6.82	6.80
2	4.44	0.66	0.08	0.00	-0.01	0.00	0.74	4.49	4.50
1	1.93	0.37	0.09	0.03	0.01	0.00	1.19	1.97	2.27

La Tabla 18 muestra los desplazamientos de cada piso para cada forma modal, las columnas SRRS indica la combinación modal raíz cuadrada de la suma de cuadrados (SRRS) para ambos métodos.

Luego se calculó el desplazamiento de entre piso utilizando la ecuación (4.43)

$$\nabla_{mD} = \delta_{imD} - \delta_{(i-1)mD}$$

En donde δ_{imD} es el desplazamiento del piso "i" para el modo m y $\delta_{(i-1)mD}$ es el desplazamiento del piso inmediato inferior "i-1". La Tabla 19 muestra los desplazamientos de entrepiso para los modos fundamental, superiores y residual.

Tabla 19. Desplazamientos de entre piso (cm) para los modos fundamental, superiores y residual.

Piso	Modo 1	Modo 2	Modo 3	Modo 4	Modo 5	Modo 6	Modo R	SRRS-RE	SRRS-FLE
6	0.84	-0.42	0.13	-0.05	0.01	0.00	-0.15	0.86	0.84
5	1.41	-0.52	0.07	0.02	-0.02	0.00	-0.26	1.41	1.42
4	1.99	-0.39	-0.07	0.04	0.01	-0.01	-0.36	1.96	1.98
3	2.35	-0.05	-0.11	-0.03	0.01	0.01	-0.43	2.33	2.30
2	2.51	0.29	-0.01	-0.03	-0.02	0.00	-0.45	2.52	2.23
1	1.93	0.37	0.09	0.03	0.01	0.00	1.19	1.97	2.27

Las fuerzas sísmicas laterales que actúan en cada piso para desplazamiento elástico reducido se calculan mediante la ecuación (4.36)

$$F_{mi} = \varphi_{im} \frac{L_m^*}{M_m^*} w_i \frac{V_m}{\bar{W}_m}$$

Donde, el subíndice "m=1" representa el modo fundamental de vibración, "m>1" las formas modales superiores y m=R la forma residual. φ_{im} es la forma modal, $\frac{L_m^*}{M_m^*}$ es el factor de participación modal, w_i es el peso de cada piso, V_m es la fuerza cortante basal y \bar{W}_m es el peso efectivo.

La Tabla 20 muestra las fuerzas sísmicas para cada modo de vibración correspondiente al desplazamiento elástico reducido de diseño.

Tabla 20. Fuerzas sísmicas (tonf) por piso para los modos fundamental, superiores y residual correspondientes al desplazamiento elástico reducido

Piso	Modo 1	Modo 2	Modo 3	Modo 4	Modo 5	Modo 6	Modo R	SRRS-RE	SRRS-FLE
6	43.44	-58.20	27.90	-14.62	6.18	-1.56	-22.23	79.42	48.80
5	47.32	-28.88	-11.73	21.24	-14.97	4.77	-17.53	62.52	50.46
4	40.76	21.33	-34.66	7.04	12.20	-7.33	-2.91	59.75	40.87
3	31.54	58.42	-10.13	-23.55	1.35	8.15	17.68	71.65	36.16
2	20.62	63.34	28.44	-0.85	-13.71	-7.09	42.05	74.06	46.84
1	9.72	38.72	33.09	26.53	15.60	4.76	73.65	60.49	74.29

La Tabla 21 muestra las fuerzas sísmicas en cada piso de la estructura para el instante de máximo desplazamiento. Estas fuerzas se obtuvieron al multiplicar las fuerzas correspondientes al desplazamiento elástico reducido indicadas en la Tabla 20 por el valor de la sobre resistencia $\Omega_o = 3$ con el fin de amplificarlas a la resistencia máxima de la estructura.

Tabla 21. Fuerzas por piso (tonf) para el instante de máximo desplazamiento.

Piso	Modo 1	Modo 2	Modo 3	Modo 4	Modo 5	Modo 6	Modo R	SRRS-RE	SRRS-FLE
6	130.32	-174.60	83.71	-43.87	18.55	-4.67	-66.68	238.26	146.39
5	141.95	-86.65	-35.20	63.72	-44.92	14.30	-52.59	187.56	151.38
4	122.29	64.00	-103.99	21.12	36.60	-21.99	-8.72	179.26	122.60
3	94.63	175.26	-30.40	-70.64	4.04	24.44	53.03	214.94	108.48
2	61.87	190.03	85.33	-2.55	-41.12	-21.26	126.15	222.19	140.51
1	29.15	116.16	99.28	79.60	46.81	14.28	220.95	181.47	222.86

PASO 11: Cálculo de la respuesta para el instante de máxima velocidad

A continuación, se calcularon las fuerzas en cada piso aplicada para el instante de máxima velocidad. La velocidad relativa para cada nivel, se calculó empleando la ecuación (4.44)

$$V_{mD} = 2\pi \frac{\Delta_{mD}}{T_{mD}}$$

Donde Δ_{mD} es el desplazamiento de entre piso mostrados en la Tabla 19 y T_{mD} es el periodo efectivo para el modo "m".

Tabla 22. Velocidades relativas (cm/s) de entrepiso para los modos fundamental, superiores y residual.

Piso	Modo 1	Modo 2	Modo 3	Modo 4	Modo 5	Modo 6	Modo R	SRRS-RE	SRRS-FLE
6	3.32	-7.47	4.47	-2.43	1.00	-0.23	-2.11	9.68	3.93
5	5.60	-9.45	2.30	0.90	-1.22	0.43	-3.56	11.33	6.63
4	7.88	-6.98	-2.46	1.93	0.49	-0.55	-5.01	11.00	9.34
3	9.33	-0.93	-3.87	-1.43	0.67	0.54	-5.93	10.28	11.05
2	9.95	5.19	-0.21	-1.60	-1.26	-0.41	-6.33	11.41	11.79
1	7.67	6.73	3.07	1.55	0.65	0.16	16.57	10.79	18.26

La Tabla 22 muestra las velocidades relativas de entre piso para cada modo de vibración y con estas se calculó las fuerzas axiales en cada disipador empleando la siguiente ecuación

$$F_{id} = C_j \nabla_{im} \cos \theta$$

En donde F_{id} es la fuerza axial, C_j es la constante de amortiguamiento anteriormente calculada para un amortiguamiento viscoso del 15% del crítico, ∇_{im} es la velocidad relativa de los extremos del disipador para el piso "i" y para el modo "m" y θ es el ángulo de inclinación del disipador respecto de la horizontal.

Tabla 23. Fuerzas axiales (tonf) en cada disipador.

Piso	Modo 1	Modo 2	Modo 3	Modo 4	Modo 5	Modo 6	Modo R	SRRS-RE	SRRS-FLE
6	22.07	-49.71	29.77	-16.15	6.63	-1.56	-14.04	64.43	26.15
5	37.24	-62.86	15.30	5.96	-8.09	2.86	-23.69	75.37	44.13
4	52.40	-46.42	-16.37	12.83	3.23	-3.66	-33.34	73.20	62.11
3	62.06	-6.16	-25.73	-9.52	4.48	3.61	-39.48	68.38	73.55
2	66.20	34.51	-1.42	-10.64	-8.37	-2.72	-42.11	75.93	78.46
1	49.64	43.56	19.84	10.01	4.18	1.01	107.22	69.81	118.15

La Tabla 23 muestra las fuerzas axiales en cada disipador (tonf) considerando los modos de vibración fundamental, superiores y residual.

La fuerza horizontal por piso debido a la velocidad máxima se determina mediante la siguiente ecuación.

$$F_{iH} = C_j \nabla_{im} \cos \theta^2$$

Con la ecuación anterior se obtiene la componente horizontal de la fuerza axial de cada disipador y se multiplica por 4 ya que por cada piso de la estructura se instalaron 4 disipadores.

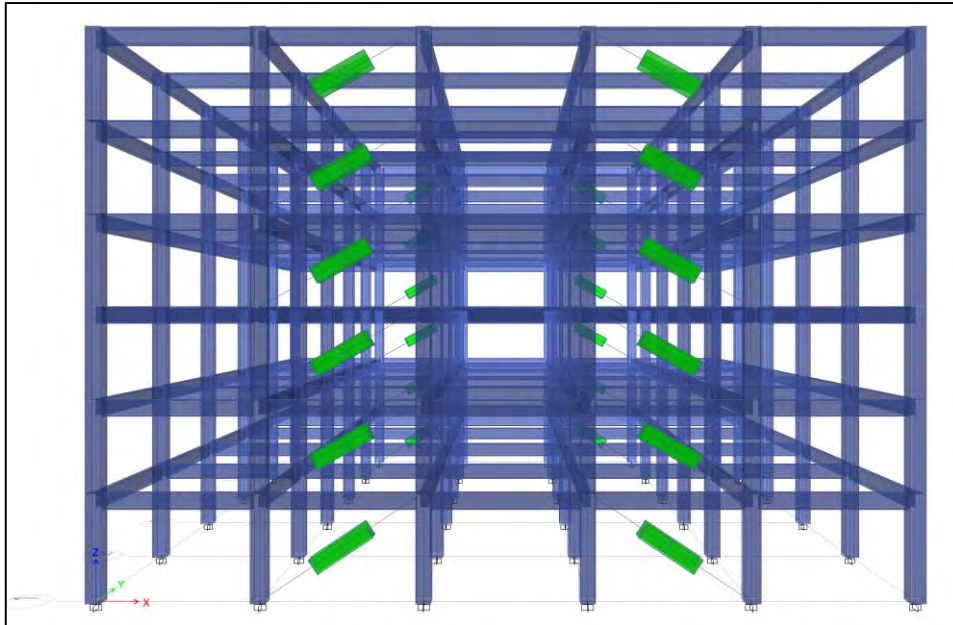


Figura 22. Distribución de los disipadores en la estructura

La Figura 22 muestra la distribución de los disipadores en la estructura.

Tabla 24. Fuerzas horizontales por piso (tonf) para el estado de máxima velocidad, 4 disipadores por piso.

Piso	Modo 1	Modo 2	Modo 3	Modo 4	Modo 5	Modo 6	Modo R	SRRS-RE	SRRS-FLE
6	78.94	-177.84	106.49	-57.76	23.71	-5.59	-50.22	230.50	93.56
5	133.21	-224.87	54.73	21.32	-28.94	10.24	-84.74	269.64	157.88
4	187.48	-166.08	-58.55	45.92	11.56	-13.11	-119.27	261.87	222.20
3	222.02	-22.05	-92.06	-34.07	16.03	12.90	-141.24	244.62	263.14
2	236.82	123.46	-5.09	-38.08	-29.95	-9.73	-150.65	271.65	280.68
1	172.73	151.59	69.05	34.83	14.53	3.52	373.12	242.94	411.16

La Tabla 24 muestra las fuerzas horizontales en cada piso para el instante de máxima velocidad correspondiente a los modos de vibración fundamental, superiores y residual.

PASO 12: Cálculo de la respuesta para el instante de máxima aceleración.

Las fuerzas laterales sísmicas por piso para la etapa de máxima aceleración se determinan multiplicando el factor CF1 por las fuerzas sísmicas por piso del instante de máximo desplazamiento sumado al producto del factor CF2 con las fuerzas sísmicas por piso del instante de la máxima velocidad. El valor del amortiguamiento efectivo necesario para obtener las respuestas en este instante se halla con la ecuación.

$$\beta_{eff} = \beta_i + \beta_{vm}(\mu_D)^{1-\alpha/2}$$

El coeficiente CF1 hallado con (4.70) y (4.71)

$$\cos(\delta) \cdot \mu_D \geq 1; CF_1 = 1$$

El coeficiente CF2, hallado con (4.72)

$$CF_2 = \text{sen}(\delta)^\alpha$$

El parámetro δ hallado con (4.73)

$$\delta = \tan^{-1}(2\beta_{eff})$$

Tabla 25. Cálculo de coeficientes CF1 y CF2

Aspecto	Modo 1	Modo 2	Modo 3	Modo 4	Modo 5	Modo 6	Modo R
Ductilidad	1.97	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
β_{eff}	0.26	0.45	0.58	0.61	0.60	0.58	0.82
Parámetro δ	0.48	0.73	0.86	0.88	0.87	0.86	1.02
CF1	1.00	0.75	0.65	0.64	0.64	0.65	0.52
CF2	0.46	0.67	0.76	0.77	0.77	0.76	0.85

La Tabla 25 muestra los valores de la ductilidad, el amortiguamiento efectivo, el parámetro δ y los coeficientes CF1 y CF2 calculados para todos los modos. Estos coeficientes sirven para estimar las fuerzas laterales sísmicas en la estructura para el instante de máxima aceleración. Las fuerzas sísmicas para el instante de máxima aceleración se calcularon con la ecuación (4.69)

$$F_{imAmax} = CF1 \cdot F_{im(max.despl.)} + CF2 \cdot F_{im(max.vel)}$$

Tabla 26. Fuerzas sísmicas laterales (tonf) para el instante de máxima aceleración

Piso	Modo 1	Modo 2	Modo 3	Modo 4	Modo 5	Modo 6	Modo R	SRRS-RE	SRRS-FLE
6	166.80	-248.67	135.33	-72.47	30.09	-7.28	-77.60	337.91	183.97
5	203.50	-214.30	18.62	57.02	-51.03	17.10	-99.73	306.32	226.63
4	208.93	-62.72	-112.15	48.85	32.36	-24.30	-106.35	253.35	234.44
3	197.23	116.17	-89.66	-71.26	14.88	25.74	-92.93	257.67	218.02
2	171.31	224.01	51.70	-30.98	-49.36	-21.26	-62.88	293.34	182.48
1	108.97	187.57	117.05	77.55	41.20	12.01	433.59	261.95	447.07

La Tabla 26 muestra las fuerzas sísmicas laterales calculadas para cada piso de la estructura para el instante de máxima aceleración.

Tabla 27. Fuerzas sísmicas laterales para los instantes de máximos desplazamiento, velocidad y aceleración

Piso	Máximo desplaz.		Máxima Velocidad		Máxima Acel.	
	RE (tonf)	FLE (tonf)	RE (tonf)	FLE (tonf)	RE (tonf)	FLE (tonf)
6	238.26	146.39	230.50	93.56	337.91	183.97
5	187.56	151.38	269.64	157.88	306.32	226.63
4	179.26	122.60	261.87	222.20	253.35	234.44
3	214.94	108.48	244.62	263.14	257.67	218.02
2	222.19	140.51	271.65	280.68	293.34	182.48
1	181.47	222.86	242.94	411.16	261.95	447.07

La Tabla 27 muestra el comparativo de las fuerzas sísmicas por piso para los procedimientos de Respuesta Espectral (RE) y Fuerzas Laterales Equivalentes (FLE) para los tres instantes indicados. Para fines de diseño y verificación de la resistencia de los elementos que sujetan a los disipadores, se utilizan los máximos valores de los tres instantes.

5.4.2 Análisis del edificio con DFV no lineales

En esta sección, se emplearán los métodos simplificados utilizando DFV no lineales, que proporcionan un 15% de amortiguamiento viscoso y tienen un exponente de velocidad α igual a 0.5. El coeficiente de amortiguamiento C_j se despejó de la ecuación (4.65) y también se observa que la ecuación depende de la amplitud de desplazamiento, el cual se tomó igual al desplazamiento elástico reducido $D_t = \frac{D_E}{B_E}$.

$$\beta_{v1} = \frac{\sum_j (2\pi)^{\alpha j} T_1^{2-\alpha j} \lambda_j C_j (\cos \theta_j)^{1+\alpha j} D_t^{\alpha j-1} \phi_{rj}^{1+\alpha j}}{8\pi^3 \sum_i \left(\frac{w_i}{g}\right) \phi_{i1}^2} = 0.15$$

De donde

α	Exponente de velocidad	0.5
T_1	Periodo fundamental de la estructura (segundos)	1.129
λ_j	Parámetro λ	3.496
D_t	Desplazamiento elástico reducido (m)	0.1074
Numerador de la ecuación	Valor total del numerador de la ecuación para 4 disipadores por piso	9585.11
$\sum_i \left(\frac{w_i}{g}\right) \phi_{i1}^2$	Sumatoria del producto de las masas de cada piso y la forma modal fundamental.	257.89
β_{v1}	Amortiguamiento viscoso agregado por el sistema de amortiguamiento incorporado	0.15
C_j	Coefficiente de amortiguamiento de cada disipador de fluido viscoso (ton/(m/s) ^{0.5}).	210

El amortiguamiento viscoso para los modos superiores ($m > 1$) se determinó de manera similar al caso de disipador lineal ($\alpha = 1$), sin embargo, se utilizó el coeficiente de amortiguamiento efectivo hallado con la ecuación (4.67)

$$C_{eff} = \alpha_j C_j \dot{u}_1^{\alpha_j - 1}$$

De donde, el subíndice “j” hace referencia a cada disipador instalado en la estructura, C_{eff} es el coeficiente de amortiguamiento efectivo para los modos superiores, el exponente α definido como 0.5, el coeficiente de amortiguamiento C_j y la velocidad relativa $\dot{u}_1^{\alpha j-1}$ fueron hallados para el modo fundamental de vibración.

Seguidamente, se muestran los resultados que se obtuvieron realizando el mismo procedimiento mostrado para el caso anterior (estructura con disipadores lineales).

Tabla 28. Desplazamiento inelástico y cortante basal para la estructura con disipadores no lineales $\alpha=0.5$.

Aspecto	Modo 1	Modo 2	Modo 3	Modo 4	Modo 5	Modo 6	Modo R	SRSS-RE	SRSS-FLE
Ductilidad	1.87	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	-	-
Periodo elástico (seg)	1.13	0.35	0.19	0.12	0.08	0.07	0.45	-	-
Periodo efectivo (seg)	1.54	0.35	0.19	0.12	0.08	0.07	0.45	-	-
Amortiguamiento efectivo	0.43	0.29	0.37	0.38	0.36	0.33	0.44	-	-
Factor de reducción BD	2.14	1.76	2.00	2.02	1.97	1.87	2.18	-	-
Desplazamiento elástico reducido (cm)	1.86	-0.30	0.04	-0.01	0.00	0.00	-0.23	1.89	1.88
Desplazamiento inelástico (cm)	10.46	-0.89	0.13	-0.03	0.01	0.00	-0.69	10.50	10.48
Cortante basal de diseño (Vs) - Tonf	193.24	117.69	42.20	20.57	8.82	2.32	136.08	231.26	236.35

La Tabla 28 muestra los resultados tanto del amortiguamiento efectivo, el desplazamiento elástico reducido, el desplazamiento inelástico y la cortante basal de diseño para los modos fundamental, superiores y residual. Se observa también que la cortante basal de diseño calculada para ambos métodos (RE y FLE) es mayor a la cortante basal $V = 227$ tonf en 1.8% y 4.1% respectivamente, por lo tanto, para el diseño se consideró el valor de $V = 227$ tonf.

Tabla 29. Desplazamientos inelásticos (cm) de la estructura con disipadores DFV no lineales

Piso	Modo 1	Modo 2	Modo 3	Modo 4	Modo 5	Modo 6	Modo R	SRRS-RE	SRRS-FLE
6	10.46	-0.89	0.13	-0.03	0.01	0.00	-0.69	10.50	10.48
5	9.67	-0.37	-0.04	0.03	-0.01	0.00	-0.46	9.68	9.68
4	8.33	0.28	-0.13	0.01	0.01	0.00	-0.08	8.33	8.33
3	6.45	0.76	-0.04	-0.04	0.00	0.00	0.46	6.49	6.46
2	4.21	0.82	0.11	0.00	-0.01	0.00	1.10	4.29	4.36
1	1.83	0.46	0.12	0.04	0.01	0.00	1.79	1.90	2.56

La Tabla 29 muestra los desplazamientos inelásticos de diseño para cada modo de vibración de la estructura con DFV no lineales ($\alpha=0.5$), así como la combinación modal para cada procedimiento considerado.

Tabla 30. Fuerzas sísmicas laterales por piso para los instantes máximos de desplazamiento, velocidad y aceleración para DFV no lineales ($\alpha=0.5$)

Piso	Máximo desplaz.		Máxima Velocidad		Máxima Acel.	
	RE (tonf)	FLE (tonf)	RE (tonf)	FLE (tonf)	RE (tonf)	FLE (tonf)
6	281.73	164.20	249.04	140.72	387.44	238.66
5	210.30	162.30	242.22	182.79	318.37	269.78
4	205.06	122.89	228.51	216.86	284.24	257.09
3	257.80	123.57	222.71	235.99	312.63	229.90
2	272.79	199.10	233.59	243.73	328.87	209.58
1	229.19	332.75	216.56	343.96	282.98	462.31

La Tabla 30 muestra el comparativo de las fuerzas sísmicas por piso para ambos procedimientos para los tres instantes indicados. Para diseñar los elementos del sistema de amortiguamiento (brazos metálicos y elementos de sujeción) se utilizan los valores máximos de cada instante de análisis.

Nota: En el Anexo 2 se muestra los cuadros resumen de los cálculos del edificio con DFV lineales con un 15% de amortiguamiento agregado, DFV No lineales con 15% y 20% de amortiguamiento agregado.

5.5 Análisis comparativo de las respuestas del edificio con DFV lineales y no lineales.

En la presente sección se van a comparar y comentar las respuestas del edificio equipado con DFV lineales y no lineales con un amortiguamiento agregado del 15% y 20%. Se abordan los desplazamientos inelásticos, distorsión de entrepiso, fuerzas axiales de los disipadores y cortantes de entrepiso.

5.5.1 Desplazamientos inelásticos.

La Tabla 31 muestra el comparativo de desplazamientos inelásticos del edificio de 6 niveles. Se observa que tanto el DFV lineal y no lineal con un amortiguamiento viscoso agregado de 15% reducen el desplazamiento en un rango del 13% al 18%, sin embargo, el disipador no lineal, reduce el desplazamiento hasta en un 30%. Se observa también que existe una inconsistencia respecto al método de fuerzas laterales equivalentes para el primer piso, ya que no se ve una reducción de desplazamiento, esto se debe a que el modo residual sobre estima las respuestas de los modos superiores.

Tabla 31. Comparativo de desplazamientos inelásticos del edificio de 6 niveles con DFV Lineales y No Lineales ($\alpha=0.5$) y con amortiguamientos agregados de 15% y 20%

Comparativo de desplazamientos inelásticos (cm) en edificio de 6 niveles

Piso	Di (cm) Edif. Sin disipadores	DFV lineal ($\alpha=1$), $\beta=15\%$				DFV No lineal ($\alpha=0.5$), $\beta=15\%$				DFV No lineal ($\alpha=0.5$), $\beta=20\%$			
		RE (cm)	Di/RE	FLE (cm)	Di/FLE	RE (cm)	Di/RE	FLE (cm)	Di/FLE	RE (cm)	Di/RE	FLE (cm)	Di/FLE
6	12.4	11.1	112%	11.0	112%	10.5	118%	10.5	118%	9.5	130%	9.5	130%
5	11.4	10.2	112%	10.2	112%	9.7	118%	9.7	118%	8.8	130%	8.8	130%
4	9.8	8.8	112%	8.8	112%	8.3	118%	8.3	118%	7.6	130%	7.5	130%
3	7.7	6.8	112%	6.8	113%	6.5	118%	6.5	119%	5.9	130%	5.9	131%
2	5.1	4.5	113%	4.5	112%	4.3	117%	4.4	115%	3.9	129%	4.0	127%
1	2.2	2.0	114%	2.3	99%	1.9	117%	2.8	81%	1.7	129%	2.5	90%

*DFV - Disipador de Fluido Viscoso

*Di - Desplazamientos inelásticos

*RE - Respuesta Espectral

*FLE - Fuerzas Laterales Equivalentes

5.5.2 Distorsiones inelásticas.

En la Tabla 32 se muestran las distorsiones de entrepiso del edificio calculadas con los métodos propuestos. Se observa que los DFV Lineales y No Lineales que aportan un amortiguamiento viscoso del 15% tienen una reducción de derivas bastante similar mientras que los DFV No Lineales reducen las distorsiones hasta en un 56%.

Tabla 32. Distorsión de entrepiso en edificio de 6 niveles.

Piso	Di (Edif. Sin disipadores)	DFV lineales ($\alpha=1$, $\beta=15\%$)				DFV No lineales ($\alpha=0.5$, $\beta=15\%$)				DFV No lineales ($\alpha=0.5$, $\beta=20\%$)			
		RE (cm)	Di/RE	FLE (cm)	Di/FLE	RE (cm)	Di/RE	FLE (cm)	Di/FLE	RE (cm)	Di/RE	FLE (cm)	Di/FLE
6	3.5	2.8	125%	2.5	139%	2.9	117%	2.5	141%	2.7	129%	2.2	156%
5	5.3	4.4	119%	4.2	125%	4.5	118%	4.2	127%	4.1	129%	3.8	141%
4	6.8	6.0	114%	5.9	114%	5.8	117%	5.8	116%	5.2	129%	5.3	128%
3	7.9	6.9	114%	7.0	112%	6.6	120%	6.9	114%	6.0	132%	6.3	126%
2	8.3	7.4	112%	7.5	111%	7.1	117%	7.4	113%	6.4	129%	6.7	125%
1	6.1	5.8	105%	6.7	91%	4.8	128%	6.9	88%	5.1	120%	7.3	83%

*DFV - Disipador de Fluido Viscoso

*Di - Distorsión de entrepiso

*RE - Respuesta Espectral

*FLE - Fuerzas Laterales Equivalentes

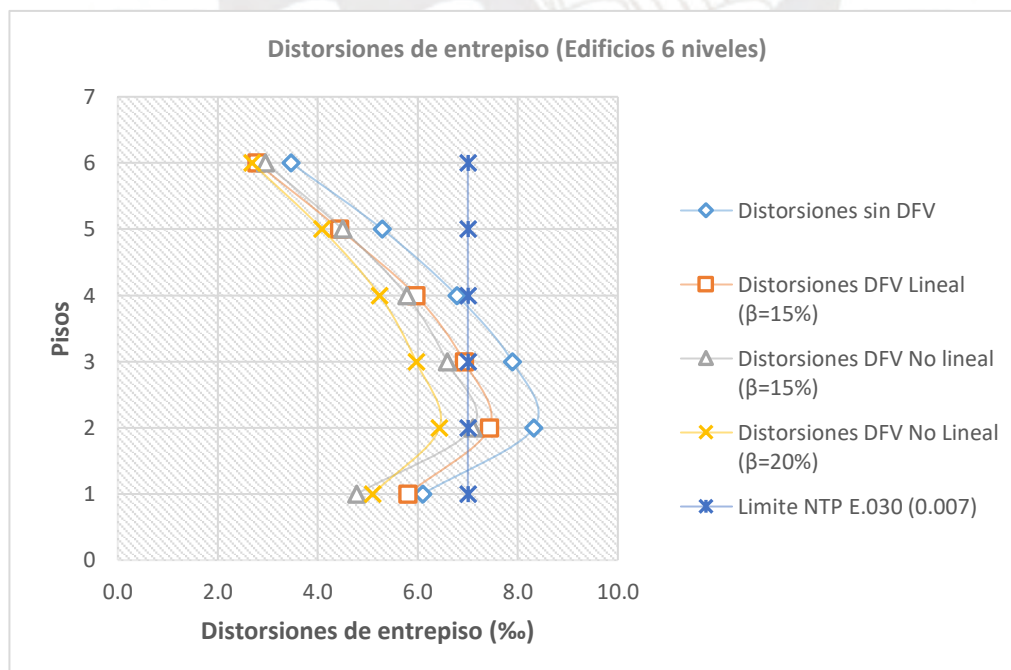


Figura 23. Distorsiones de entrepiso para el edificio de 6 niveles equipado con DFV Lineales con $\beta=15\%$, y DFVNL con $\beta=15\%$ y $\beta=20\%$

La Figura 23 muestra las distorsiones de entrepiso del edificio de 6 niveles, en donde se observa que el control de distorsiones tanto de los DFV Lineales y no Lineales para un amortiguamiento viscoso agregado del 15% no es suficiente para el piso 2; sin embargo, los DFV No Lineales que aportan un 20% de amortiguamiento si reducen las distorsiones por debajo del límite (0.007).

5.5.3 Fuerzas axiales en los DFV.

La Tabla 33 y Figura 24 se presenta un comparativo de las fuerzas axiales en los DFV, tanto lineales como no lineales. Se observa que los disipadores no lineales, que aportan un 15% de amortiguamiento, generan fuerzas axiales hasta un 15% menores en comparación con sus contrapartes lineales. No obstante, ambos tipos de disipadores controlan las distorsiones de entrepiso en la misma proporción. Por otro lado, las fuerzas axiales en los disipadores no lineales que proporcionan un 20% de amortiguamiento son mayores que sus pares que aportan 15% debido a su mayor constante de amortiguamiento.

Tabla 33. Fuerzas axiales (tonf) en los DFV lineales y no lineales ($\alpha=0.5$) para amortiguamiento agregado de $\beta=15\%$ y $\beta=20\%$.

Fuerzas axiales (tonf) en los DFV						
Piso	DFV lineales, $\beta=15\%$		DFV No lineales ($\alpha=0.5$), $\beta=15\%$		DFV No lineales ($\alpha=0.5$), $\beta=20\%$	
	RE (tn)	FLE (tn)	RE (tn)	FLE (tn)	RE (tn)	FLE (tn)
6	64.4	26.2	69.6	39.3	85.6	50.3
5	75.4	44.1	67.7	51.1	85.0	65.4
4	73.2	62.1	63.9	60.6	81.8	77.6
3	68.4	73.6	62.3	66.0	80.7	84.4
2	75.9	78.5	65.3	68.1	84.5	87.2
1	69.8	118.1	62.2	98.8	79.6	119.0

*RE - Respuesta Espectral

*FLE - Fuerzas Laterales Equivalentes

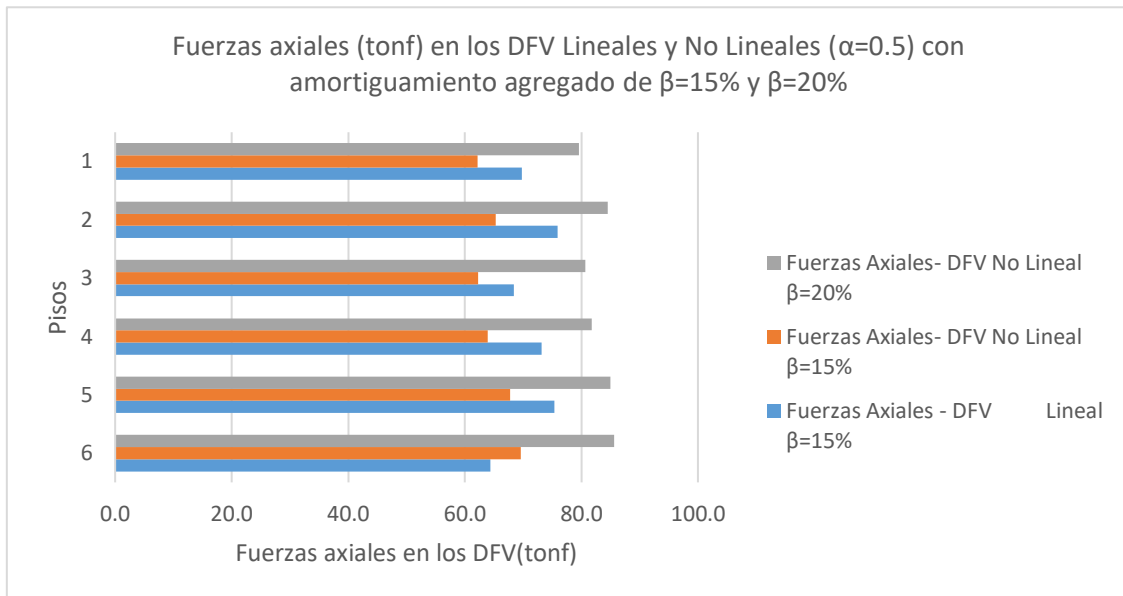


Figura 24. Comparativo de las fuerzas axiales en DFV Lineales y No Lineales ($\alpha=0.5$) con amortiguamiento agregado de $\beta=15\%$ y $\beta=20\%$

5.5.4 Fuerzas cortantes basales.

La Tabla 34 muestra las fuerzas cortantes correspondientes al desplazamiento de diseño de la estructura (Ds) en donde se observa que para el caso de los amortiguadores no lineales, se incrementan en un 5% respecto de la cortante basal del edificio sin amortiguadores, esto se debe a que la cortante basal calculada utilizando los DFV No lineales esta reducida en función a una demanda de ductilidad menor a la considerada en un análisis convencional (R), es por este motivo que para estos casos se debe diseñar con el menor valor de la cortante basal.

Tabla 34. Fuerzas cortantes de entrepiso correspondientes al desplazamiento elástico de diseño Ds

Piso	Vs (Edif. Sin)	Fuerzas cortantes de entrepiso (tonf)											
		DFV lineales ($\alpha=1$, $\beta=15\%$)				DFV No lineales ($\alpha=0.5$), $\beta=15\%$				DFV No lineales ($\alpha=0.5$), $\beta=20\%$			
		RE (tn)	Vs/RE	FLE (tn)	Vs/FLE	RE (tn)	Vs/RE	FLE (tn)	Vs/FLE	RE (tn)	Vs/RE	FLE (tn)	Vs/FLE
6	73.1	79.4	92%	48.8	150%	93.9	78%	54.7	134%	84.9	86%	51.6	142%
5	123.4	127.3	97%	99.1	125%	143.5	86%	108.5	114%	133.3	93%	103.5	119%
4	155.7	148.9	105%	138.3	113%	157.7	99%	146.2	107%	151.7	103%	141.7	110%
3	182.0	166.1	110%	165.0	110%	168.0	108%	167.2	109%	166.1	110%	165.4	110%
2	207.7	192.6	108%	184.5	113%	197.2	105%	185.3	112%	193.6	107%	184.1	113%
1	227.1	218.5	104%	213.6	106%	231.3	98%	236.4	96%	222.6	102%	224.3	101%

*DFV - Disipador de Fluido Viscoso

*Di - Distorsión de entrepiso

*RE - Respuesta Espectral

*FLE - Fuerzas Laterales Equivalentes

5.6 Respuestas Tiempo Historia No Lineal.

En la presente sección se van a comparar las respuestas del edificio obtenidas con los métodos simplificados versus las respuestas de tres análisis tiempo-historia no lineal considerando a los disipadores con una configuración no lineal ($\alpha=0.5$) con un aporte del 15% y 20% de amortiguamiento viscoso. Los registros sísmicos peruanos utilizados son las componentes Norte-Sur de Lima 1966 (LIM66NS), Este-Oeste de Lima 1970 (LIM70EW), y Norte-Sur Lima 1974 (LIM74NS). Estos registros fueron corregidos, filtrados y escalados para que sean espectro compatibles con parámetros $Z=0.45g$ y $R=1$.

5.6.1 Desplazamientos inelásticos

La Tabla 35 muestra el comparativo de desplazamientos inelásticos obtenidos de los métodos simplificados vs las respuestas halladas del análisis THNL. Se observa que hay una diferencia de hasta un 50% en el primer nivel, esto se debe a que el desplazamiento modal residual para el primer nivel es mayor hasta en un 65% respecto a los pisos superiores. Este modo, combinado con el fundamental sobre estiman la respuesta final. En el resto de los desplazamientos de piso se observa que los métodos simplificados dan resultados en un rango de -7% y 22% respecto a los obtenidos del análisis THNL.

Tabla 35. Desplazamientos inelásticos (RE, FLE) vs THNL – DFVNL ($\alpha=0.5$)

Pisos	Respuesta Espectral (cm)		Fuerzas Lat. Equivalentes (cm)		THNL LIM66NS (cm)		THNL LIM70EW (cm)		THNL LIM74NS (cm)		Dif. Porcentual RE/THNL		Dif. Porcentual FLE/THNL	
	$\beta_v=15\%$	$\beta_v=20\%$	$\beta_v=15\%$	$\beta_v=20\%$	$\beta_v=15\%$	$\beta_v=20\%$	$\beta_v=15\%$	$\beta_v=20\%$	$\beta_v=15\%$	$\beta_v=20\%$	$\beta_v=15\%$	$\beta_v=20\%$	$\beta_v=15\%$	$\beta_v=20\%$
6	10.50	9.51	10.48	9.49	6.71	6.60	7.92	7.20	8.59	9.09	122%	105%	122%	104%
5	9.68	8.76	9.68	8.77	6.22	6.25	7.57	6.90	8.18	8.64	118%	101%	118%	101%
4	8.34	7.55	8.33	7.54	5.45	5.56	6.86	6.28	7.28	7.70	115%	98%	114%	98%
3	6.49	5.88	6.46	5.85	4.43	4.43	5.59	5.16	5.75	6.11	113%	96%	112%	96%
2	4.30	3.89	4.36	3.93	3.09	3.04	3.72	3.50	3.78	4.05	114%	96%	115%	97%
1	1.90	1.71	2.56	2.24	1.46	1.45	1.63	1.57	1.71	1.84	111%	93%	150%	122%

5.6.2 Distorsiones de entrepiso

La Tabla 36 muestra el comparativo de las distorsiones de entrepiso halladas con los métodos simplificados y con el análisis THNL. Se puede observar que hay una diferencia de 21% a 42% para los resultados de ambos procedimientos; sin embargo, hay una diferencia de 75% (para el primer piso), esto se debe a que el desplazamiento modal residual del primer piso es mayor en más del 60% respecto al de los niveles superiores y combinado con la respuesta del primer modo hace que la distorsión aumente.

Tabla 36. Distorsiones de entrepiso (RE, FLE) VS THNL

Pisos	Respuesta Espectral (%)		Fuerzas Lat. Equivalentes (‰)		THNL LIM66NS (‰)		THNL LIM70EW (‰)		THNL LIM74NS (‰)		Dif. Porcentual RE/THNL		Dif. Porcentual FLE/THNL	
	$\beta_v=15\%$	$\beta_v=20\%$	$\beta_v=15\%$	$\beta_v=20\%$	$\beta_v=15\%$	$\beta_v=20\%$	$\beta_v=15\%$	$\beta_v=20\%$	$\beta_v=15\%$	$\beta_v=20\%$	$\beta_v=15\%$	$\beta_v=20\%$	$\beta_v=15\%$	$\beta_v=20\%$
6	2.42	2.19	2.37	2.14	1.71	1.58	1.62	1.29	1.59	1.26	142%	139%	138%	136%
5	3.94	3.57	3.97	3.59	2.74	2.79	2.22	2.14	1.94	2.12	144%	128%	145%	129%
4	5.43	4.92	5.49	4.98	3.94	3.89	3.13	2.84	3.16	2.82	138%	127%	140%	128%
3	6.46	5.85	6.19	5.65	4.59	4.67	4.55	4.14	4.41	3.80	141%	125%	135%	121%
2	7.06	6.39	5.28	4.96	4.85	4.89	5.20	4.87	4.90	4.29	136%	131%	102%	101%
1	4.74	4.29	6.40	5.61	3.66	3.62	3.51	3.40	3.42	3.03	129%	119%	175%	155%

5.6.3 Fuerzas axiales en disipadores

La Tabla 37 presenta una comparación de las fuerzas axiales en los disipadores obtenidas mediante métodos simplificados y el análisis no lineal en el tiempo (THNL). Se observa que la variación de las fuerzas axiales, en general, oscila entre -18% y 38%. Sin embargo, en el caso del método de Respuesta Espectral, la diferencia llega hasta un 91%. Esto se debe a que la velocidad relativa se calcula de manera espectral, utilizando la fórmula $S_v=2\pi/T*Dr$, donde Dr es el desplazamiento relativo entre los extremos del disipador y T es el periodo de vibración.

En el segundo modo, el desplazamiento modal en el techo del edificio es igual a 1 y el periodo es de 0.35 segundos, lo que resulta en una velocidad relativa significativa para este modo. Esto influye considerablemente en el resultado final. Además, se observa que en los niveles

inferiores (pisos 2 y 5) las demandas en los disipadores disminuyen, debido a la reducción de la influencia de las formas modales en esas zonas.

Tabla 37. Fuerzas axiales en los DFV (RE, FLE) Vs THNL

Pisos	Respuesta Espectral (tonf)		Fuerzas Lat. Equivalentes (tonf)		THNL LIM66NS (tonf)		THNL LIM70EW (tonf)		THNL LIM74NS (tonf)		Dif. Porcentual RE/THNL		Dif. Porcentual FLE/THNL	
	$\beta_v=15\%$	$\beta_v=20\%$	$\beta_v=15\%$	$\beta_v=20\%$	$\beta_v=15\%$	$\beta_v=20\%$	$\beta_v=15\%$	$\beta_v=20\%$	$\beta_v=15\%$	$\beta_v=20\%$	$\beta_v=15\%$	$\beta_v=20\%$	$\beta_v=15\%$	$\beta_v=20\%$
6	69.64	85.60	39.33	50.34	35.12	44.87	29.71	29.71	40.26	35.84	173%	191%	98%	112%
5	67.74	84.99	51.09	65.39	48.82	61.40	50.51	50.51	54.29	60.58	125%	138%	94%	107%
4	63.93	81.79	60.62	77.58	61.21	79.33	59.96	59.96	68.09	81.40	94%	100%	89%	95%
3	62.29	80.68	65.96	84.42	66.87	87.74	58.99	58.99	76.07	92.66	82%	87%	87%	91%
2	65.32	84.55	68.13	87.19	61.55	82.68	62.86	62.86	78.12	103.36	84%	82%	87%	84%
1	62.23	79.60	98.84	119.01	52.42	72.71	54.78	54.78	71.01	95.41	88%	83%	139%	125%

*DFV = Disipadores de fluido viscoso

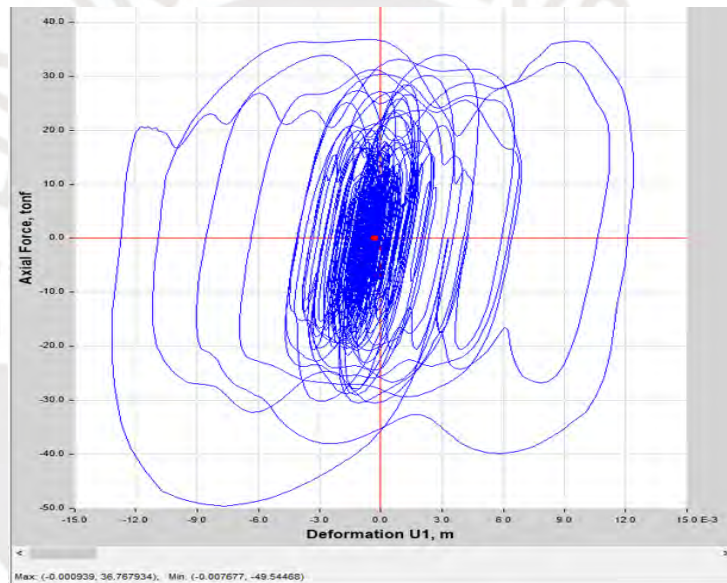


Figura 25. Curva histerética de DFV No Lineal - Registro LIM74NS

En la Figura 25 se observa la curva histerética de un DFV No Lineal que se obtuvo del análisis hecho con el registro LIM74NS.

5.6.4 Fuerzas cortantes de piso.

La Tabla 38 muestra un comparativo de las fuerzas cortantes de piso máximas, obtenidas con los métodos simplificados, el valor mostrado es el máximo para los tres instantes calculados (máximo desplazamiento, máxima velocidad y máxima aceleración), como se puede observar la diferencia respecto a los valores hallados con el método tiempo-historia está en un rango de -14% hasta un 44%.

Tabla 38. Fuerzas cortantes de piso (RE, FLE) Vs THNL

Pisos	Respuesta Espectral (tonf)		Fuerzas Lat. Equivalentes (tonf)		THNL LIM66NS (‰)		THNL LIM70EW (‰)		THNL LIM74NS (‰)		Dif. Porcentual RE/THNL		Dif. Porcentual FLE/THNL	
	$\beta_v=15\%$	$\beta_v=20\%$	$\beta_v=15\%$	$\beta_v=20\%$	$\beta_v=15\%$	$\beta_v=20\%$	$\beta_v=15\%$	$\beta_v=20\%$	$\beta_v=15\%$	$\beta_v=20\%$	$\beta_v=15\%$	$\beta_v=20\%$	$\beta_v=15\%$	$\beta_v=20\%$
6	388	412	239	261	277	326	223	255	210	240	140%	126%	86%	80%
5	658	735	508	567	465	524	410	455	413	466	141%	140%	109%	108%
4	827	966	763	875	565	605	514	583	574	625	144%	154%	133%	140%
3	968	1160	983	1162	578	652	566	599	681	737	142%	157%	144%	158%
2	1136	1365	1161	1412	658	713	660	703	757	818	150%	167%	153%	173%
1	1301	1553	1293	1544	830	831	741	789	897	998	145%	156%	144%	155%

5.7 Análisis y diseño asistido por computador.

Para poder analizar el edificio con DFV, utilizando el software ETABS, se usó un artificio para poder obtener la respuesta para el primer modo en función del periodo efectivo (para el caso de DFV no lineales con $\alpha=0.5$ y $\beta_v=15\%$), el cual se calculó como:

$$T_{1D} = T_1 \sqrt{\mu} = 1.13 \sqrt{1.87} = 1.54 \text{ seg}$$

El objetivo es obtener como respuesta la aceleración espectral en función del periodo efectivo $S_a(T_{1D}, 5\%)$. Para ello, dado que el software siempre da como respuesta $S_a(T_1, 5\%)$, lo que se hizo fue modificar el espectro de aceleraciones, solo para la aceleración del periodo fundamental, tal y como indica la Figura 26, por lo tanto, el espectro ingresado al software tendrá un valle para para T_1 . Para el caso de los modos superiores se deja de manera similar ya que se consideran con un comportamiento elástico.

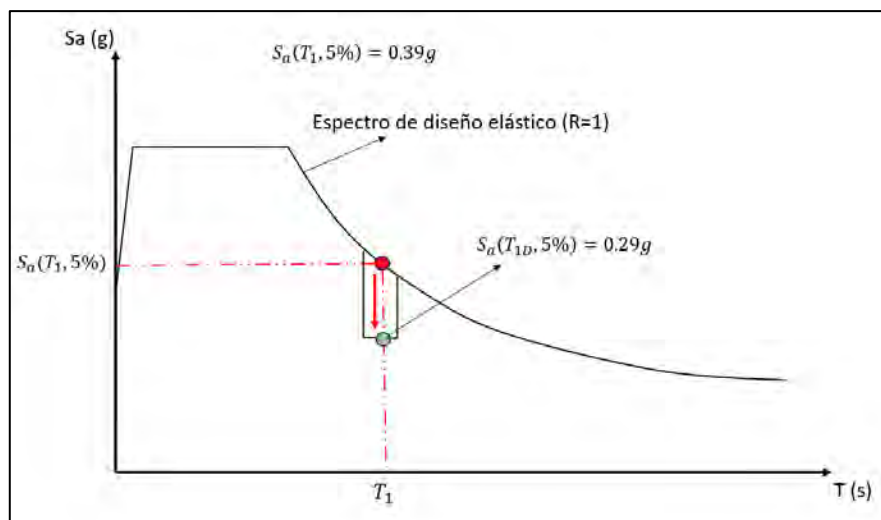


Figura 26. Reducción de la aceleración espectral

Seguidamente, se halló el coeficiente de cortante basal de la siguiente manera:

$$C_s = \frac{S_a(T_{1D}, 5\%)}{B_D \Omega_o}$$

Dado que estamos trabajando con una estructura lineal equivalente, este coeficiente es reducido por el producto de la sobre resistencia Ω_o y el factor de reducción de respuesta por amortiguamiento B_D , por lo tanto, se ingresó el espectro de diseño dividido por Ω_o , y el factor B_D se obtuvo de manera automática ingresando el amortiguamiento efectivo para cada modo tal como lo indica Figura 27.

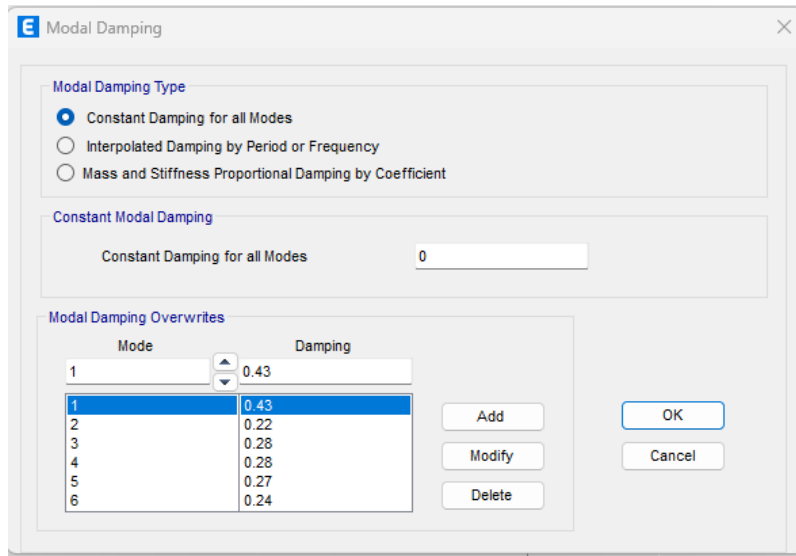


Figura 27. Ingreso de valores de amortiguamiento efectivo para cada modo.

La Figura 27 muestra el amortiguamiento efectivo para cada modo de vibración, se debe tener en cuenta que el amortiguamiento de 5% ya está considerado en ese amortiguamiento, es por ello que Constant Damping for all Modes tiene un valor de cero.

Luego, se obtuvo la fuerza cortante de diseño y el desplazamiento correspondiente

E Base Reactions					
File	Edit	Format-Filter-Sort	Select	Options	
Units: As Noted Hidden Columns: No Sort: None					
Filter: ([Output Case] = 'SX/(SRxBd)')					
	Output Case	Case Type	Step Type	Step Number	FX tonf
▶	SX/(SRxBd)	Combination	Max		244.5855
	SX/(SRxBd)	Combination	Min		-244.5855

E Story Response				
	Story	Elevation m	Location	X-Dir m
▶	Story6	21	Top	0.020072
	Story5	17.6	Top	0.018356
	Story4	14.2	Top	0.015806
	Story3	10.8	Top	0.012527
	Story2	7.4	Top	0.008487
	Story1	4	Top	0.003872
	Base	0	Top	0

Utilizando las hojas de cálculo se obtuvo un desplazamiento D_s de 1.9 cm que es prácticamente el mismo desplazamiento hallado con el software.

El diseño del sistema sismorresistente se realiza con la fuerza cortante basal hallada como se indicó anteriormente; sin embargo, para el diseño de los elementos del sistema amortiguamiento como los brazos metálicos se deben tener en cuenta las fuerzas máximas para de los tres instantes calculados (desplazamiento, velocidad y aceleración).

CAPÍTULO VI: Conclusiones y recomendaciones.

En este capítulo se presentan las principales conclusiones y recomendaciones acerca del estudio realizado para proponer una normativa peruana que contiene los requisitos mínimos de diseño y métodos simplificados de análisis de estructuras con DFV.

6.1 Conclusiones

Respecto de la comparación con normativas internacionales y propuesta peruana.

1. A diferencia de las normativas internacionales revisadas, la propuesta de norma peruana considera una expresión matemática que permite calcular el amortiguamiento viscoso dado por el sistema de DFV con configuración lineal y no lineal.
2. Los factores de reducción de respuesta por amortiguamiento calculados utilizando registros de aceleraciones peruanos de la zona 4, son mayores en un rango de 10% y 20% respecto a los presentados en la norma americana ASCE 7-22, sin embargo, para ser conservadores, y con fines de facilitar la aplicación de los métodos simplificados usando un software computacional y hojas de cálculo, se utilizó la expresión planteada por Newmark y Hall (1982), con lo cual se obtuvieron respuestas comparables con un análisis dinámico no lineal.
3. La propuesta de norma, al igual que las normas internacionales revisadas, considera en plantear un cortante basal de diseño mínimo, el cual, para el caso peruano, se ha propuesto en $0.85 V$ con el fin de garantizar un correcto comportamiento de la estructura con DFV.
4. A diferencia de las normas latinoamericanas, la propuesta peruana busca especificar y detallar los pasos a seguir para la aplicación de los métodos simplificados propuestos.
5. La propuesta peruana, al igual que la norma americana, consideran las incursiones inelásticas del edificio en la aplicación de los métodos simplificados propuestos.

Respecto de los métodos simplificados de análisis propuestos.

6. Se encontró que los métodos simplificados propuestos resultan ser prácticos para estimar la constante de amortiguamiento de los DFV, en función del amortiguamiento que se desea incorporar al edificio para obtener el control de la distorsión de entrepiso máxima permitida.
7. Se encontró que el coeficiente de amplificación de desplazamiento C_d estima razonablemente, bajo condiciones elásticas reducidas, el valor del máximo desplazamiento inelástico para el primer modo de vibración de la estructura.
8. Al aplicar los métodos de análisis de Respuesta Espectral (RE) y Fuerzas Laterales Equivalentes (FLE) se obtuvieron predicciones de desplazamiento en un rango del -4% al 15% por encima de un análisis dinámico no lineal. Por otro lado, para el método RE, las distorsiones de entrepiso fueron sobre estimadas hasta en un máximo aproximado de 42% y para el método FLE sobre estimada en aproximadamente un máximo del 75% respecto del análisis THNL, esta diferencia se debe a que el método FLE se basa en el cálculo de solamente dos modos de vibración, lo cual lo hace menos preciso respecto al método RE.
9. Se encontró en el trabajo, que las fuerzas axiales en los DFV correspondientes a los pisos intermedios (piso 2 al piso 5), están subestimadas en un rango del 4% al 16%. Por otro lado, en el último piso, existe una diferencia notable de hasta 91% para el método de respuesta espectral, esta diferencia se debe principalmente a que la velocidad del sistema es estimada como una pseudo velocidad espectral, la cual al ser dividida por un valor de periodo corto hace que el aporte del segundo modo incremente la respuesta final
10. Los DFV no lineales resultan más efectivos que los lineales ya que proveen el mismo amortiguamiento con menor fuerza axial y menor constante de amortiguamiento.
11. Aplicar los métodos de análisis propuestos en el presente trabajo resultan laboriosos de evaluar utilizando solamente los softwares de análisis y diseño de estructuras más

conocidos en el medio, ya que el procedimiento requiere evaluar la incidencia del amortiguamiento agregado para cada modo de vibración de manera independiente, es por este motivo que se recomienda el uso de hojas de cálculo automatizadas y software de cálculo matemático con el fin de hallar las fuerzas de diseño requeridas.

12. Con fines de diseño, se recomienda realizar un análisis dinámico no lineal para verificar las fuerzas axiales que actúan en los dispositivos de disipación de energía empleados.
13. Finalmente, se concluye que luego de estudiar e investigar acerca de métodos de cálculo simplificados que contemplen el análisis y diseño de edificios con DFV y revisar y analizar distintos códigos internacionales, se pudo proponer una normativa peruana que satisfaga el objetivo del presente trabajo.

6.2 Recomendaciones

1. Dado que la actual norma de concreto armado (E.060) no contempla factores de sobre resistencia para los diferentes sistemas estructurales utilizados en el Perú, se recomienda realizar una investigación para determinarlos e incorporarlos para una versión futura de la misma.
2. Para completar este trabajo, se recomienda investigar la aplicación de métodos simplificados de análisis y diseño de edificios que incluyan sistemas de amortiguamiento dependientes del desplazamiento (disipadores metálicos de fluencia y disipadores de fricción). Además, se recomienda realizar estudios para obtener expresiones matemáticas que permitan calcular, de manera directa, los factores de reducción de respuesta por amortiguamiento agregado, utilizando para ello una mayor cantidad de registros de aceleraciones para cada zona sísmica contempladas en la Norma Técnica E.030 Diseño Sismorresistente.

Referencias

- American Society of Civil Engineers. (2016). *Minimum Design Loads and Associated Criteria for Building and Other Structures (ASCE/SEI 7-16)*. American Society of Civil Engineers.
- American Society of Civil Engineers. (2022). *Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures (ASCE/SEI 7-22)*. American Society of Civil Engineers.
- Arshad Qadri, A., & Kacker, S. (2022). *Seismic Response Study of Multi-Storied Reinforced Concrete Building with Fluid Viscous Dampers*. Greater, Noida India: International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET).
- Castillo, T., & Ruiz, S. (2014). Reduction Factors for Seismic Design Spectra for Structures with Viscous Energy Dampers. *Journal of Earthquake Engineering*, 323-349.
<https://doi.org/10.1080/13632469.2013.860932>
- Chávez Aguirre, J. (2017). *Diseño Sismorresistente de Edificios con Disipadores de Fluido Viscoso*. Grupo Universitario.
- Chopra, A. (2014). *Dinámica de Estructura, Cuarta Edición*. Pearson Education Inc. Upper Saddle River, New Jersey 07458. ISBN 9780132858038.
- Chopra, A., & Goel, R. (1999). Evaluation of NSP to Estimate Seismic Deformation: SDF Systems. *Journal of Structural Engineering*, American Society of Civil Engineers.
- Clough, R. W., & Penzien, J. (1993). *Dynamics of structures (2nd ed.)*. McGraw-Hill.
- Computers and Structures, CSI Analysis Reference Manual*. (2017). Berkeley, California.
- Constantinou, M., & Symans, M. (1992). *Experimental and Analytical Investigation of Seismic Response of Structures with Supplemental Fluid Viscous Dampers*. State University of New York at Buffalo: NATIONAL CENTER FOR EARTHQUAKE ENGINEERING RESEARCH.
- Cundumi Garcia, J., & Cundumi Sánchez, O. (2021). Comparison between dynamic nonlinear analysis with ASCE 7-16 and ASCE 7-16 in concrete frames with viscous dampers incorporated. (pp. 5342-5356). Athens, Greece: 8th ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering.
- European Committee for Standardization. (2004). *Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance - Part 1 : General rules, seismic actions and rules for buildings (EN 1998-1:2004)*. European Committee for Standardization, CEN.
- European Committee for Standardization. (2018). *EN 15129:2018 Anti-seismic devices*. European Committee for Standardization, CEN.
- Federal Emergency Management Agency - 273. (1997). *Guidelines for the seismic rehabilitation of buildings (FEMA 273)*. Washington, D.C.: U.S. Government Printing Office.
- Federal Emergency Management Agency - 274. (1997). *NEHRP commentary on the guidelines for the seismic rehabilitation of buildings (FEMA 274)*. Washington, D.C.: U.S. Government Printing Office.

- FEMA (Federal Emergency Management Agency). (2001). *2000 NEHRP recommended provisions for seismic regulations for new buildings and other structures (FEMA 368/369)*. Washington, D.C.: National Institute of Building Sciences.
- FEMA 440. (2005). *Improvement of nonlinear static seismic analysis procedures (FEMA 440)*. Federal Emergency Management Agency.
- Freeman, S. (1994). *The Capacity Spectrum Method for Determining the Demand Displacement*. ACI 1994 Spring Convention.
- Gilani, A., & Miyamoto, H. (2018). *Design of Structures with Dampers per ASCE 7-16 and Performance for Large Earthquakes*. Los Angeles: Miyamoto International, Inc.
- Hwang, J.-S. (2002). *Seismic Design of Structures with Viscous Dampers*. National Center for Research on Earthquake Engineering.
- Instituto Nacional de Normalización - INN. (2017). *Norma Chilena NCh 3411 - Diseño sísmico de edificios con sistemas pasivos de disipación de energía - Requisitos y métodos de ensayo*. Instituto Nacional de Normalización - INN.
- Instituto Nacional de Normalización INN-Chile. (1997). *NCh 433.Of 96 Diseño sísmico de edificios*. Instituto Nacional de Normalización INN-Chile.
- Iwan, W., & Gates, N. (1979). The Effective Period and Damping of a Class of Hysteretic Structures. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*.
- Kircher, C., Rezaeian, S., & Luco, N. (2019). Proposed Multi-Period Response Spectra and Ground Motion Requirements of the 2020 NEHRP Recommended Provisions and ASCE 7-22. *SEAOC CONVENTION PROCEEDINGS*, 272-281.
- Kitayama, S., & Constantinou, M. (2018). *Seismic Performance of Buildings with Viscous Damping Systems Designed by the Procedures of ASCE/SEI 7-16*. American Society of Civil Engineers.
- Lin, W.-H., & Chopra, A. (2002). Earthquake response of elastic SDF systems with non-linear fluid viscous dampers. *EARTHQUAKE ENGINEERING AND STRUCTURAL DYNAMICS*, 1623–1642.
- Mendo, A. R. (2015). *Bases para la implementación de la Norma Peruana de Análisis y Diseño de Edificios con Aislación Sísmica*. Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú.
- Muñoz, A. (2020). *Comentarios a la Norma Peruana E.030 Diseño Sismorresistente*. Lima: SENCICO.
- NEHRP. (2000). *NEHRP Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings and Other Structures*. Washington, D.C.: Structures with Damping Systems, Federal Emergency Management Agency.
- Newmark, N., & Hall, W. (1982). *Earthquake Spectra and Design*. Engineering monographs on earthquake criteria.
- Pekcan, G., Mander, J., & Chen, S. (1999). *Design and Retrofit Methodology for Building Structures with Supplemental Energy Dissipating Systems*. New York.: Report No. MCEER-99-0021 Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research, Buffalo.
- Ramirez, O., Constantinou, M., Kircher, C., Whittaker, A., Johnson, M., & Gomez, J. (2000). *Development and Evaluation of Simplified Procedures for Analysis and Design of Buildings*

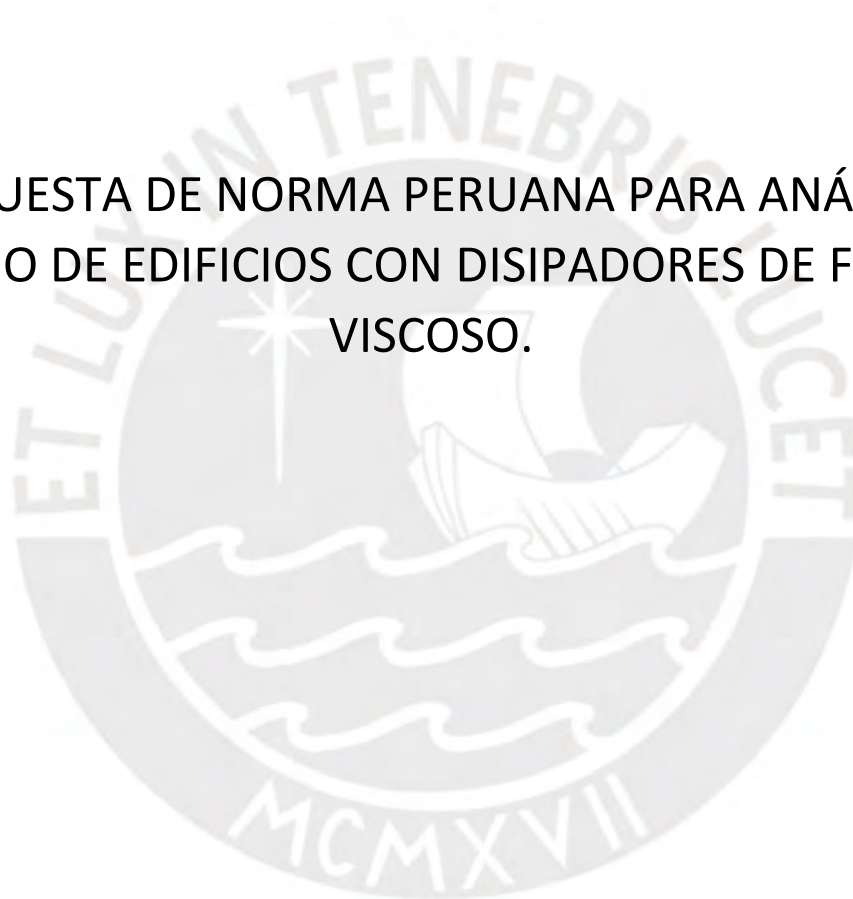
- with Passive Energy Dissipation Systems*. New York: Department of Civil, Structural and Environmental Engineering, Technical Report MCEER-00-0010.
- Reglamento de Construcciones del Distrito Federal. (2020). *Norma Técnica Complementaria para Diseño por Sismo con Comentarios (NTCS-20)*. Gaceta Oficial de la Ciudad de México.
- Ruiz, S. (2018). *Comentarios al Apéndice B (Edificios con disipadores de energía sísmica) de la NTCS-17*. Convenio Específico de Colaboración ISCDF-UNAM. No. Convenio: ISCDF/CEC-04/2018-05.
- Sadek, F., Mohraz, P., & Riley, M. (1999). *Linear Static and Dynamic Procedures for Structures with Velocity Dependent Supplemental Dampers*. Gaithersburg: Building and Fire Research Laboratory, National Institute of Standards and Technology.
- Seleemah, A., & Constantinou, M. (1997). *Investigation of Seismic Response of Buildings with Linear and Nonlinear Fluid Viscous Dampers*. New York: Report NCEER-97-0004, NATIONAL CENTER FOR EARTHQUAKE ENGINEERING RESEARCH, Buffalo, New York.
- SENCICO. (2004). *Norma Técnica de Edificación E.090 Estructuras Metálicas*. Lima: Servicio Nacional de Normalización, Capacitación e Investigación para la Industria de la Construcción.
- SENCICO. (2009). *Norma Técnica de Edificación E.060 Concreto Armado*. Lima: Servicio Nacional de Normalización, Capacitación e Investigación para la Industria de la Construcción.
- SENCICO. (2020). *Norma E.020 Cargas*. Lima: Servicio Nacional de Capacitación para la Industria de la Construcción – SENCICO.
- SENCICO. (2020). *Norma Técnica de Edificación E.030 Diseño Sismorresistente*. Lima: Servicio Nacional de Normalización, Capacitación e Investigación para la Industria de.
- Toro, C., Cantone, C., Heresi, P., & Cruz, C. (2023). Estimación del periodo de retorno del espectro de diseño sísmico de la norma NCh433-DS61 según ubicación geográfica. *XIII Congreso Chileno de Sismología e Ingeniería Sísmica ACHISINA 2023*.
- Tsopelas, P., Constantinou, M., Kircher, C., & Whittaker, A. (1997). *Evaluation of Simplified Methods of Analysis for Yielding Structures*. Technical Report No. NCEER 97-0012. New York: National Center for Earthquake Engineering Research, University at Buffalo, State University of New York, Buffalo, N.Y.
- Veletsos, A., & Newmark, N. (1960). *Effect of Inelastic Behavior on the Response of Simple Systems to Earthquake Motions*. Tokio-Kyoto: Proceedings of the Second World Conference in Earthquake Engineering.
- Whittaker, A. (2003). Equivalent Lateral Force and Modal Analysis Procedures of the 2000 NEHRP Provisions for Buildings with Damping Systems, Earthquake Spectra. *Earthquake Spectra*. 2003.
- Wu, E. (2002). *Three-Dimensional Static and Dynamic Analysis of Structures. A Physical Approach With Emphasis on Earthquake Engineering*. Berkeley, California, USA: Computers and Structures, Inc. .
- Wu, J., & Hanson, R. (1989). Study of inelastic spectra with high damping. *Journal of Structural Engineering, ASCE*, 115, 1412-1431.



ANEXO 1: PROPUESTA DE NORMATIVA PERUANA

ANEXO 2: RESUMEN DE CÁLCULOS

PROPUESTA DE NORMA PERUANA PARA ANÁLISIS Y
DISEÑO DE EDIFICIOS CON DISIPADORES DE FLUIDO
VISCOSO.



Contenido

1. OBJETO.	137
2. FINALIDAD.	137
3. ÁMBITO DE APLICACIÓN.	137
4. DEFINICIONES.	137
4.1 DISIPADOR DE FLUIDO VISCOSO.	137
4.2 SISTEMA DE AMORTIGUAMIENTO.	137
4.3 SISTEMA SISMORRESISTENTE.	138
4.4 SISMO DE DISEÑO. (SD)	138
4.5 SISMO MÁXIMO CONSIDERADO (SMC)	138
5. NOMENCLATURAS.	138
6. REQUISITOS GENERALES DE DISEÑO.	140
6.1 SISTEMA SISMORRESISTENTE.	140
6.2 SISTEMA DE AMORTIGUAMIENTO.	140
6.2.1 INSPECCIONES PERIÓDICAS.	141
6.3 PELIGRO SÍSMICO.	141
6.3.1 ESPECTRO DE DISEÑO	141
6.4 PROCEDIMIENTOS DE ANÁLISIS.	142
6.4.1 PROCEDIMIENTO DE ANÁLISIS DE RESPUESTA ESPECTRAL.	142
6.4.2 PROCEDIMIENTO DE ANÁLISIS DE FUERZAS LATERALES EQUIVALENTES.	142
7. PROCEDIMIENTOS DE ANÁLISIS.	143
7.1 PROCEDIMIENTO DE ANÁLISIS DE RESPUESTA ESPECTRAL.	143
7.1.1 SISTEMA SISMORRESISTENTE.	143
7.1.1.1 Cortante basal	144
7.1.1.2 Cortante basal modal	144
7.1.1.3 Factor de participación modal.	144
7.1.1.4 Coeficiente sísmico para el modo fundamental de vibración.	144
7.1.1.5 Periodo Efectivo del Modo Fundamental Vibración.	145
7.1.1.6 Coeficiente Sísmico para los Modos Superiores.	145
7.1.1.7 Fuerzas Laterales de Entrepiso.	145
7.1.2 SISTEMA DE AMORTIGUAMIENTO.	145
7.1.2.1 Desplazamiento de piso para el sismo de diseño.	146
7.1.2.2 Desplazamiento elástico reducido	146
7.1.2.3 Desplazamiento inelástico de diseño.	146
7.1.2.4 Desplazamiento de entrepiso para el sismo de diseño.	147

7.1.2.5	Velocidad de Piso para el Sismo de Diseño.	147
7.2	PROCEDIMIENTO DE ANÁLISIS DE FUERZAS LATERALES EQUIVALENTES.	147
7.2.1	SISTEMA SISMORRESISTENTE.	147
7.2.1.1	Cortante basal sísmica.	148
7.2.1.2	Periodo efectivo del modo fundamental de vibración.	148
7.2.1.3	Cortante Basal para el Modo Residual.	148
7.2.1.4	Propiedades Modales residuales.	148
7.2.1.5	Coeficiente Sísmico para el Modo Residual.	148
7.2.1.6	Fuerzas Laterales de Diseño.	149
7.2.2	SISTEMA DE AMORTIGUAMIENTO.	149
7.2.2.1	Desplazamiento de piso debido al sismo de diseño.	149
7.2.2.2	Desplazamiento inelástico de diseño.	150
7.2.2.3	Desplazamiento de Entrepiso para el Sismo de Diseño.	150
7.2.2.4	Velocidad de Piso para el Sismo de Diseño.	150
7.3	RESPUESTA MODIFICADA POR AMORTIGUAMIENTO.	151
7.3.1	AMORTIGUAMIENTO EFECTIVO	151
7.3.1.1	Amortiguamiento inherente.	151
7.3.1.2	Amortiguamiento hysterético.	151
7.3.1.3	Amortiguamiento viscoso.	152
7.3.2	DEMANDA DE DUCTILIDAD EFECTIVA.	153
7.3.3	DEMANDA DE DUCTILIDAD EFECTIVA MÁXIMA.	153
7.4	FUERZAS SÍSMICAS DE DISEÑO Y COMBINACIÓN DE RESPUESTA MODAL	154
7.4.1	INSTANTE DE MÁXIMO DESPLAZAMIENTO.	154
7.4.2	INSTANTE DE MÁXIMA VELOCIDAD.	154
7.4.3	ESTADO DE MÁXIMA ACELERACIÓN.	155
8.	<u>ENSAYOS Y PRUEBAS</u>	155
8.1	CRITERIOS DE ACEPTACIÓN DEL DISIPADOR	156
9.	<u>REVISIÓN DEL DISEÑO.</u>	156

1. Objeto.

Este documento describe los criterios y pautas que se deben seguir en la elaboración de proyectos y construcción de edificios que cuenten con un sistema de amortiguamiento mediante disipadores de fluido viscoso, así como también las normativas correspondientes para llevar a cabo las pruebas necesarias que permitan comprobar el funcionamiento adecuado de los dispositivos de fluido viscoso.

2. Finalidad.

Elevar la capacidad de resistencia sísmica de las construcciones, salvaguardar tanto su integridad estructural como su contenido, y procurar su funcionamiento ininterrumpido.

3. Ámbito de aplicación.

Esta norma técnica propuesta debe ser seguida en todo el territorio nacional para aquellas edificaciones que cuenten con un sistema de disipación que consista en disipadores de fluido viscoso. Cabe destacar que la Norma Técnica E.030 Diseño Sismorresistente del Reglamento Nacional de Edificaciones es aplicable a todo aquello que no contradiga las disposiciones establecidas en este documento.

4. Definiciones.

Las siguientes definiciones aplican para estructuras provistas con un sistema de disipación.

4.1 Disipador de fluido viscoso.

Elemento estructural deformable del sistema de amortiguamiento, el cual disipa energía debido a la velocidad relativa de sus extremos. Los disipadores pueden ser configurados para tener un comportamiento lineal o no lineal.

4.2 Sistema de amortiguamiento.

Es el conjunto de elementos estructurales conformado por los dispositivos de disipación de energía junto a sus accesorios de conexión, como pasadores, pernos, arriostres que transfieren la carga al sistema sismorresistente.

4.3 Sistema sismorresistente.

El sistema sismorresistente comprende la estructura que es capaz de resistir tanto fuerzas laterales como gravitacionales y aquellas generadas por el sistema de amortiguamiento.

4.4 Sismo de diseño. (SD)

Movimiento del suelo con un periodo de retorno de 475 años y una probabilidad de excedencia de 10% en 50 años.

4.5 Sismo Máximo Considerado (SMC)

Movimiento del suelo con un periodo de retorno de 2500 años, se define como 1.5 veces el sismo de diseño.

5. Nomenclaturas.

Nomenclatura	Descripción
Subíndice ($m = 1$)	Indica el modo fundamental de vibración
Subíndice ($m > 1$)	Indica los modos superiores de vibración
Subíndice i	Indica el piso "i" de la estructura
Subíndice j	Indica el disipador "j" de la estructura
Subíndice ($m = R$)	Indica el modo residual de vibración
α	Exponente de velocidad
β_i	Amortiguamiento inherente de la estructura
β_{HD}	Amortiguamiento histerético
β_{mD}	Amortiguamiento efectivo para el modo "m" de vibración
β_{vm}	Amortiguamiento viscoso para el modo de vibración "m"
B_{mD}	Factor de reducción de respuesta por amortiguamiento efectivo para el modo de vibración "m".
B_{V+I}	Factor de reducción de respuesta por amortiguamiento efectivo para el rango elástico.
C_d	Factor de amplificación de desplazamiento
C_{effj}	Coefficiente de amortiguamiento efectivo para el disipador "j"
C_j	Coefficiente de amortiguamiento para el disipador "j"
C_{sm}	Coefficiente sísmico para el modo de vibración "m"
$CF1$	Coefficiente para la fuerza sísmica lateral para el instante de máximo desplazamiento

$CF2$	Coeficiente para la fuerza sísmica lateral para el instante de máxima velocidad
D_{mD}	Desplazamiento de diseño del techo para el modo de vibración "m"
D_{Sm}	Desplazamiento elástico reducido para el modo de vibración "m".
D_t	Desplazamiento elástico de techo reducido por amortiguamiento
D_y	Desplazamiento de fluencia.
Δ_{mD}	Desplazamiento de entrepiso de diseño para el modo de vibración "m"
δ	Parámetro delta
δ_{imD}	Desplazamiento de diseño del piso "i" para el modo de vibración "m"
$\delta_{(i-1)mD}$	Desplazamiento de diseño para el piso "i-1" para el modo de vibración "m"
F_{imAmax}	Fuerza sísmica lateral debido a la aceleración máxima en el piso "i" para el modo "m"
F_{mi}	Fuerza sísmica lateral de diseño aplicada en el piso "i" para el modo de vibración "m"
g	Aceleración de la gravedad 981 cm/s ²
L_m^*	Masa participante del sistema para el modo de vibración "m"
$\left(\frac{L^*}{M^*}\right)_m =$	Factor de participación modal para el modo de vibración "m"
λ_j	Parámetro lambda para el disipador "j"
m_i	Masa de cada piso "i" de la estructura.
M_m^*	Masa generalizada del sistema para el modo de vibración "m"
μ_D	Demanda de ductilidad efectiva
∇_{mD}	Velocidad de diseño relativa de entrepiso para el modo de vibración "m"
q_H	Factor de ajuste de lazo histerético
$Sa(T_m, 5\%)$	Aceleración espectral en función al periodo del modo "m" para un 5% de amortiguamiento.
T_m	Periodo elástico para el modo de vibración "m"
T_{mD}	Periodo efectivo para el modo de vibración "m".
T_R	Periodo para el modo residual
Φ_{rj}	Desplazamiento residual relativo para el disipador "j"
θ_j	Ángulo de inclinación del disipador "j"
V	Cortante basal de diseño calculada de manera convencional con la Norma E.030 Diseño Sismorresistente.
V_m	Fuerza cortante basal de diseño para el modo de vibración "m"
V_{min}	Valor mínimo de la cortante basal de diseño.
\bar{W}_m	Peso efectivo para el modo de vibración "m"
Ω_o	Factor de sobre resistencia
φ_{im}	Desplazamiento modal en el piso "i" de la estructura para el modo de vibración "m"
w_i	Peso del piso "i"

6. Requisitos generales de diseño.

El diseño de la estructura debe considerar los requisitos básicos de diseño tanto para el sistema sismorresistente como para el sistema de amortiguamiento indicados en la presente sección. Para cumplir con los requisitos de distorsiones de entrepiso se permite considerar el sistema sismorresistente y el sistema de amortiguamiento de manera conjunta.

6.1 Sistema sismorresistente.

Definición: El sistema sismorresistente es el conjunto de elementos estructurales (vigas, columnas, muros de corte, etc) configurados para soportar cargas gravitacionales y cargas sísmicas en cada dirección de análisis. Este sistema debe cumplir con la categoría y sistema estructural indicados en el Capítulo 3 de la Norma E.030 Diseño Sismorresistente.

El límite mínimo de la cortante basal es el mayor de los valores de las expresiones (6-1) y (6-2) y el límite máximo es $1.00V$

$$V_{min} = 0.85V \quad (6.1)$$

$$V_{min} = \frac{V}{B_{V+I}} \quad (6.2)$$

Donde

V = Cortante basal sísmica de la estructura sin disipadores hallada según los procedimientos indicados en Norma Técnica Peruana E.030 Diseño Sismorresistente.

B_{V+I} = Factor de reducción por amortiguamiento efectivo (amortiguamiento inherente más el amortiguamiento viscoso en condiciones elásticas brindado por el sistema de amortiguamiento) para el modo fundamental.

6.2 Sistema de amortiguamiento.

Definición: El sistema de amortiguamiento está compuesto por los disipadores de fluido viscoso (DFV), sus elementos de soporte como los brazos metálicos, pernos de anclaje, etc.

Los elementos de sujeción de los disipadores (brazos metálicos) deben ser diseñados para que se desempeñen en el rango elástico para una fuerza cortante máxima V_y ante un Sismo Máximo Considerado.

6.2.1 Inspecciones periódicas.

El profesional responsable del diseño debe tener libre acceso a cada disipador por separado para que se pueda hacer una inspección y asegurarse de que cada dispositivo pueda responder de manera independiente durante su periodo de vida.

6.3 Peligro sísmico.

Para el análisis y diseño de los sistemas sismorresistente y de amortiguamiento, se utiliza el espectro de diseño indicado en Capítulo II (Peligro Sísmico) de la Norma E.030.

6.3.1 Espectro de diseño

El espectro para el Sismo de Diseño se obtiene empleando la siguiente ecuación.

$$S_a = \frac{ZUCS}{R} g \quad (6.3)$$

El factor de amplificación dinámico C debe estar determinado mediante las siguientes ecuaciones.

Para $T < 0.2T_p$

$$C = 1 + 7.5 \left(\frac{T}{T_p} \right) \quad (6.4)$$

$0.2T_p \leq T < T_p$

$$C = 2.5 \quad (6.5)$$

$T_p \leq T < T_L$

$$C = 2.5 \left(\frac{T_p}{T} \right) \quad (6.6)$$

$$T \geq T_L$$

$$C = 2.5 \left(\frac{T_p T_L}{T^2} \right) \quad (6.7)$$

6.4 Procedimientos de análisis.

El sistema sismorresistente que contenga un sistema de amortiguamiento debe ser diseñado mediante los procedimientos señalados en la sección 7 de esta Norma Técnica. A continuación, se indican los requisitos que debe cumplir la estructura para aplicar los procedimientos simplificados análisis.

6.4.1 Procedimiento de Análisis de Respuesta Espectral.

El procedimiento de Respuesta Espectral (RE) se puede usar para analizar y diseñar una estructura siempre y cuando se cumplan los siguientes requisitos.

- a. En cada dirección de análisis, se requieren al menos dos disipadores de fluido viscoso por piso para resistir la torsión.
- b. El amortiguamiento efectivo total en la dirección de interés para el modo fundamental de vibración de la estructura en el rango elástico no debe exceder el 35% del amortiguamiento crítico.
- c. La estructura sismorresistente no debe tener irregularidades en planta y altura consideradas en el Capítulo III – Artículo 19 de la Norma E.030.
- d. El análisis se realiza de manera independiente en cada dirección omitiendo el efecto torsional.

6.4.2 Procedimiento de Análisis de Fuerzas Laterales Equivalentes.

El procedimiento de Fuerzas Laterales Equivalentes (FLE) se puede usar para analizar y diseñar una estructura siempre y cuando se cumplan los siguientes requisitos.

- a. Se requiere que el sistema de amortiguación tenga un mínimo de dos disipadores por piso configurados para resistir la torsión en cada dirección de análisis.

- b. El amortiguamiento efectivo total para el modo fundamental de vibración de la estructura en la dirección de interés en etapa elástica debe ser menor o igual al 35% del amortiguamiento crítico.
- c. La estructura sismorresistente no debe tener irregularidades en planta y altura considerados en el Capítulo III – Artículo 19 de la Norma E.030.
- d. Se debe considerar un diafragma rígido para cada piso de la estructura.
- e. La altura máxima permitida para la estructura es de 30 metros.
- f. El análisis se realiza de manera independiente en cada dirección omitiendo el efecto torsional.

7. Procedimientos de análisis.

Las estructuras analizadas por los procedimientos RE y FLE deben cumplir con los requisitos de esta sección.

7.1 Procedimiento de Análisis de Respuesta Espectral.

Para llevar a cabo el procedimiento de Análisis de Respuesta Espectral, es necesario contar con un modelo matemático que represente la distribución espacial de masa, rigidez y amortiguamiento del sistema sismorresistente y del sistema de disipación. Dicho modelo debe cumplir con las especificaciones detalladas en el Artículo 25 de la Norma E.030.

7.1.1 Sistema sismorresistente.

El sistema sismorresistente deberá cumplir con los parámetros sísmicos, según su ubicación geográfica, regularidad y categoría estructural indicados en la Norma Técnica E.030 Diseño Sismorresistente. Debe cumplir, además, las disposiciones de detallado que estén especificadas en la Norma E.060 Concreto Armado, y en la Norma E.090 Estructuras Metálicas.

7.1.1.1 Cortante basal

La cortante basal sísmica V de la estructura en la dirección de análisis debe ser determinada como la combinación de las componentes modales (V_m) y sujeta a los límites de:

$$V \geq V_{\min} \quad (7.1)$$

La cortante basal sísmica debe ser determinada por el método SRSS o por CQC.

7.1.1.2 Cortante basal modal

El cortante basal modal para el modo "m" de vibración, V_m , de la estructura en la dirección de interés debe ser determinada de acuerdo a las ecuaciones (7.2) y (7.3).

$$V_m = C_{sm} \bar{W}_m \quad (7.2)$$

$$\bar{W}_m = \frac{(\sum_{i=1}^n w_i \varphi_{im})^2}{\sum_{i=1}^n w_i \varphi_{im}^2} \quad (7.3)$$

7.1.1.3 Factor de participación modal.

El factor de participación modal para cualquier modo de vibración se calcula mediante la ecuación (7.4)

$$\frac{L_m^*}{M_m^*} = \frac{\sum M_i \varphi_{im}}{\sum M_i \varphi_{im}^2} \quad (7.4)$$

7.1.1.4 Coeficiente sísmico para el modo fundamental de vibración.

El coeficiente sísmico para el modo fundamental se calcula utilizando la ecuación (7.5)

$$C_{S1} = \frac{S_a(T_{1D}, 5\%)}{\Omega_o B_{1D}} \quad (7.5)$$

7.1.1.5 Periodo Efectivo del Modo Fundamental Vibración.

El periodo efectivo del modo fundamental de vibración ($m=1$) para el sismo de diseño está se determina mediante la ec. (7.6).

$$T_{1D} = T_1 \sqrt{\mu_D} \quad (7.6)$$

7.1.1.6 Coeficiente Sísmico para los Modos Superiores.

El coeficiente sísmico para modos superiores ($m>1$) de vibración en la dirección analizada debe ser determinada de acuerdo a la ecuación (7.7).

$$C_{Sm} = \frac{S_a(T_{mD}, 5\%)}{\Omega_o B_{mD}} \quad (7.7)$$

7.1.1.7 Fuerzas Laterales de Entrepiso.

Las fuerzas laterales de entrepiso para el piso "i" para el modo fundamental de vibración ($m=1$) y para los modos superiores de vibración ($m>1$), se calcula empleando la ecuación (7.8).

$$F_{mi} = \varphi_{im} \frac{L_m^*}{M_m^*} w_i \frac{V_m}{W_m} \quad (7.8)$$

La fuerza lateral de diseño debe ser determinada mediante el método de combinación SRSS.

7.1.2 Sistema de amortiguamiento.

Se deben calcular las fuerzas de diseño en los dispositivos de amortiguamiento y en los elementos de sujeción, teniendo en cuenta los desplazamientos del piso, las distorsiones entre pisos y las velocidades relativas entre pisos que se describen en las secciones siguientes. Para calcular las fuerzas en los dispositivos de cada piso, se deben considerar los desplazamientos y velocidades, teniendo en cuenta el ángulo de orientación de cada dispositivo respecto a la horizontal.

7.1.2.1 Desplazamiento de piso para el sismo de diseño.

Los desplazamientos del piso “i” del sistema sismorresistente debido al sismo de diseño para el modo “m” de vibración del sistema debe ser calculado de acuerdo a la ecuación (7.9)

$$\delta_{imD} = D_{mD} \varphi_{im} \quad (7.9)$$

El desplazamiento final de cada piso se debe calcular mediante el método de combinación SRSS o CQC de todos los modos.

Considerar $m=1$ para el modo fundamental de vibración y $m>1$ para los modos superiores.

7.1.2.2 Desplazamiento elástico reducido

Para el modo fundamental ($m=1$) y para los modos altos ($m>1$), el desplazamiento del techo elástico reducido por el factor de reducción de amortiguamiento viene dado por

$$De = g \cdot \left(\frac{L^*}{M^*} \right) \frac{T_m^2}{4\pi^2} \cdot \frac{S_a(Te, 5\%)}{B_E} \quad (7.10)$$

7.1.2.3 Desplazamiento inelástico de diseño.

Para determinar el desplazamiento inelástico de diseño, se debe calcular primero el desplazamiento elástico reducido D_{Sm} con la ecuación (7.11), el cual corresponde a la fuerza cortante de diseño hallada con la ecuación (7.2), luego se amplifica este desplazamiento multiplicándolo por el factor de amplificación C_d .

$$D_{Sm} = \left(\frac{L_m^*}{M_m^*} \right) \frac{g}{4\pi^2} T_m^2 \frac{S_a(T_{mD}, 5\%)}{B_{mD} \Omega_o} \quad (7.11)$$

$$D_{mD} = D_{Sm} \cdot C_d \quad (7.12)$$

$$C_d = \mu_D \cdot \Omega_o \quad (7.13)$$

Nota: Tener en cuenta que el valor de la demanda de ductilidad por desplazamiento μ_D para los modos superiores de vibración de la estructura es igual a la unidad.

7.1.2.4 Desplazamiento de entrepiso para el sismo de diseño.

Los desplazamientos de entrepiso en el modo fundamental y en los modos altos de la estructura en la dirección analizada, se calculan mediante la ecuación (7.14)

$$\Delta_{mD} = \delta_{imD(i+1)} - \delta_{imD(i)} \quad (7.14)$$

Los desplazamientos de entrepiso totales deben ser determinados por el método de combinación SRSS o CQC.

7.1.2.5 Velocidad de Piso para el Sismo de Diseño.

Las velocidades de diseño de cada piso en el modo fundamental ∇_{1D} y para los modos superiores ∇_{mD} de la estructura en la dirección de análisis, deben ser calculadas de acuerdo a las ecuaciones (7.15) y (7.16).

$$\nabla_{1D} = 2\pi \frac{\Delta_{1D}}{T_{1D}} \quad (7.15)$$

$$\nabla_{mD} = 2\pi \frac{\Delta_{mD}}{T_{mD}} \quad (7.16)$$

7.2 Procedimiento de Análisis de Fuerzas Laterales Equivalentes.

El procedimiento de FLE emplea los mismos conceptos que el procedimiento de Respuesta Espectral para hallar las respuestas para el modo fundamental ($m=1$); sin embargo, para los modos superiores ($m>1$) condensa estas respuestas en un solo modo residual ($m=R$), el cual será desarrollado en la presente sección.

7.2.1 Sistema sismorresistente.

El sistema de resistencia sísmica debe satisfacer los parámetros sísmicos correspondientes a su ubicación geográfica, regularidad y categoría estructural según lo establecido en la Norma Técnica E.030 Diseño Sismorresistente. También se requiere cumplir con los requisitos de detalle especificados en la Norma E.060 Concreto Armado y en la Norma E.090 Estructuras Metálicas.

7.2.1.1 Cortante basal sísmica.

La cortante basal sísmica (V) del sistema sismorresistente se debe calcular considerando la cortante basal para el modo fundamental y la cortante basal para el modo residual.

$$V = \sqrt{V_1^2 + V_R^2} \geq V_{min} \quad (7.17)$$

7.2.1.2 Periodo efectivo del modo fundamental de vibración.

El periodo efectivo del modo fundamental ($m=1$) para el sismo de diseño se calcula utilizando la ecuación (7.18).

$$T_{1D} = T_1 \sqrt{\mu_D} \quad (7.18)$$

7.2.1.3 Cortante Basal para el Modo Residual.

La cortante basal para el modo residual se calcula utilizando la ecuación (7.19)

$$V_R = C_{SR} \bar{W}_R \quad (7.19)$$

7.2.1.4 Propiedades Modales residuales.

Las propiedades modales residuales, son las siguientes

$$\varphi_{iR} = \frac{1 - \left(\frac{L_1^*}{M_1^*}\right)\varphi_{i1}}{1 - \left(\frac{L}{M}\right)_1} \quad (7.20)$$

$$\left(\frac{L_R^*}{M_R^*}\right) = 1 - \left(\frac{L_1^*}{M_1^*}\right) \quad (7.21)$$

$$\bar{W}_R = W - \bar{W}_1 \quad (7.22)$$

$$T_R = 0.4T_1 \quad (7.23)$$

7.2.1.5 Coeficiente Sísmico para el Modo Residual.

El coeficiente de respuesta sísmica del modo residual viene dado por la ec. (7.24)

$$C_{SR} = \frac{S_a(T_R, 5\%)}{\Omega_o B_R} \quad (7.24)$$

7.2.1.6 Fuerzas Laterales de Diseño.

Las fuerzas laterales de diseño para el sistema sismorresistente de cada piso del modo fundamental y el residual en la dirección de análisis vienen dados por

$$F_{1i} = \varphi_{i1} \frac{L_1^*}{M_1^*} w_i \frac{V_1}{W_1} \quad (7.25)$$

$$F_{1R} = \varphi_{iR} \frac{L_R^*}{M_R^*} w_i \frac{V_R}{W_R} \quad (7.26)$$

Las fuerzas laterales de diseño del sistema sismorresistente deben ser determinadas mediante una combinación modal SRRS o CQC.

7.2.2 Sistema de amortiguamiento.

Las fuerzas de diseño en los componentes del sistema de amortiguamiento deben ser calculadas considerando los desplazamientos de piso, distorsiones de entrepiso y velocidad relativa de entrepiso descritas en las secciones siguientes. Es necesario tomar en cuenta el ángulo de orientación de cada dispositivo con respecto a la horizontal.

7.2.2.1 Desplazamiento de piso debido al sismo de diseño.

El desplazamiento de cada piso se calcula tanto para los modos fundamental y residual de vibración de la estructura, posteriormente el desplazamiento total de cada piso se evalúa mediante la regla de combinación SRSS o CQC. Los desplazamientos, se calculan empleando las siguientes expresiones.

$$\delta_{i1D} = D_{1D} \varphi_{i1} \quad (7.27)$$

$$\delta_{iRD} = D_{RD} \varphi_{iR} \quad (7.28)$$

7.2.2.2 Desplazamiento inelástico de diseño.

Para determinar el desplazamiento inelástico de diseño para el modo residual D_{RD} , se debe calcular primero el desplazamiento elástico reducido D_{SR} para el modo residual con la ecuación (7.30), el cual corresponde a la fuerza cortante de diseño para el modo residual V_R hallada con la ecuación (7.19), luego se amplifica este desplazamiento multiplicándolo por el factor de amplificación C_d .

$$D_{RD} = D_{SR} \cdot C_d \quad (7.29)$$

$$D_{SR} = \left(\frac{g}{4\pi^2}\right) \left(\frac{L}{M}\right)_R T_R^2 \frac{S_a(T_R, 5\%)}{B_R \Omega_o} \quad (7.30)$$

$$C_d = \mu_D \cdot \Omega_o \quad (7.31)$$

Donde B_R es el factor de reducción de respuesta por amortiguamiento para el modo residual

Nota: La ductilidad para el modo residual de vibración es igual a la unidad.

7.2.2.3 Desplazamiento de Entrepiso para el Sismo de Diseño.

El desplazamiento de entrepiso se debe calcular para el modo fundamental y residual de vibración de la estructura mediante la ec. (7.32)

$$\Delta_D = \sqrt{\Delta_{1D}^2 + \Delta_{RD}^2} \quad (7.32)$$

7.2.2.4 Velocidad de Piso para el Sismo de Diseño.

La velocidad de diseño de entrepiso para el total, para el modo fundamental y el modo residual se calcula mediante las siguientes expresiones.

$$V_D = \sqrt{V_{1D}^2 + V_{RD}^2} \quad (7.33)$$

$$V_{1D} = 2\pi \frac{\Delta_{1D}}{T_{1D}} \quad (7.34)$$

$$V_{RD} = 2\pi \frac{\Delta_{RD}}{T_R} \quad (7.35)$$

7.3 Respuesta modificada por amortiguamiento.

El factor de reducción por amortiguamiento (B_{1E} , B_{1D} , B_{mD} , B_{RD} , B_{1M} , B_{mM} , B_{RM}) se calculan mediante la expresión.

$$B = \frac{1.65}{2.31 - 0.41 \ln(100\beta_{mD})} \quad (7.36)$$

7.3.1 Amortiguamiento efectivo

El amortiguamiento efectivo para un sismo de diseño (β_{mD}) se calculan mediante la ecuación (7.37).

$$\beta_{mD} = \beta_i + \beta_v(\mu_D)^{1-\alpha/2} + \beta_{HD} \quad (7.37)$$

Donde:

α = Exponente de velocidad. Para $\alpha = 1$ se considera un disipador de fluido viscoso con propiedades lineales, para $\alpha < 1$, se considera un disipador de fluido viscoso con propiedades no lineales.

Para los modos superiores de vibración ($m > 1$) se debe considerar una ductilidad efectiva igual a la unidad. $\mu_D = 1$.

7.3.1.1 Amortiguamiento inherente.

La magnitud del amortiguamiento inherente β_i se determina por el tipo de material que conforma la estructura, su configuración y el comportamiento dinámico de sus componentes estructurales y no estructurales, previo al momento en que el sistema sismorresistente entra en su régimen de fluencia. Generalmente, se considera que el amortiguamiento inherente equivale al 5% del amortiguamiento crítico para todos los modos de vibración.

7.3.1.2 Amortiguamiento histerético.

El amortiguamiento histerético se calcula empleando las siguientes ecuaciones

$$\beta_{HD} = q_H(0.64 - \beta_i)\left(1 - \frac{1}{\mu_D}\right) \quad (7.38)$$

Factor de ajuste histerético.

El factor de ajuste histerético se calcula mediante la ecuación (7.39)

$$q_H = 0.67 \frac{T_p}{T_1}, \quad 0.5 \leq q_H \leq 1.0 \quad (7.39)$$

Donde

q_H = Factor de ajuste histerético.

T_p : Periodo define la zona de aceleración constante de la zona de velocidad constante en un espectro de diseño según la norma E.030.

T_1 : Periodo fundamental de vibración de la estructura.

7.3.1.3 Amortiguamiento viscoso.

El amortiguamiento viscoso que aporta un sistema de amortiguamiento conformado por disipadores de fluido viscoso se calcula mediante las siguientes expresiones:

Para $m=1$

$$\beta_{v1} = \frac{\sum_j (2\pi)^{\alpha_j} T_1^{2-\alpha_j} \lambda_j C_j (\cos \theta_j)^{1+\alpha} D_t^{\alpha_j-1} \phi_{rj}^{1+\alpha_j}}{8\pi^3 \sum_i \left(\frac{w_i}{g}\right) \phi_{i1}^2} \quad (7.40)$$

Para $m>1$

$$\beta_{vm} = \left(\frac{T_m}{4\pi}\right) \frac{\sum_j C_{effj} (\cos \theta_j)^2 \phi_{rj}^2}{\sum_i \left(\frac{w_i}{g}\right) \phi_{im}^2} \quad (7.41)$$

$$C_{eff} = \alpha_j C_j \dot{u}_1^{\alpha_j-1} \quad (7.42)$$

$$\phi_{rj} = \phi_{ij} - \phi_{(i-1)j} \quad (7.43)$$

Tabla 1. Valores del parámetro lambda λ

Exponente α	Parámetro λ
0.00	4.000
0.25	3.723
0.50	3.496
0.75	3.305
1.00	3.142 (=π)
1.25	3.000
1.50	2.876
1.75	2.765
2.00	2.667

7.3.2 Demanda de ductilidad efectiva.

La demanda de ductilidad efectiva calculada como la razón entre el desplazamiento inelástico de diseño y el desplazamiento de fluencia se calcula con las ecuaciones (7.44) y (7.45).

$$\mu_D = \frac{D_{1D}}{D_y} \geq 1.0 \quad (7.44)$$

$$D_y = D_{S1} \cdot \Omega_o \quad (7.45)$$

Donde

D_{1D} = Desplazamiento de diseño del techo de la estructura en el modo fundamental considerado en la dirección de análisis tomado en el centro de rigidez.

D_y = Desplazamiento de fluencia del centro de rigidez del techo del sistema sismorresistente.

7.3.3 Demanda de ductilidad efectiva máxima.

Para determinar los parámetros que dependen de la demanda de ductilidad, se debe considerar que esta debe tener un valor máximo de

Para $T_p \geq T_{1D}$

$$\mu_{m\acute{a}x} = \frac{1}{2} \left[\left(\frac{R}{\Omega_o U} \right)^2 + 1 \right] \quad (7.46)$$

Para $T_p \leq T_{1D}$

$$\mu_{m\acute{a}x} = \frac{R}{\Omega_o U} \quad (7.47)$$

7.4 Fuerzas sismicas de dise\~no y combinaci3n de respuesta modal

Los elementos de sujeci3n de los dispositivos de disipaci3n deben ser dise\~nados y verificados para que tengan un comportamiento el\~stico, utilizando para ello, el m\~ximo valor de fuerzas para tres instantes (m\~ximo desplazamiento, m\~xima velocidad y m\~xima aceleraci3n)

7.4.1 Instante de m\~ximo desplazamiento.

La fuerza sismica de dise\~no para el estado de m\~ximo desplazamiento se calcula mediante la combinaci3n modal seg\~n la ecuaci3n (7.48)

$$F_{SD} = \sqrt{\sum_m (F_m SSR)^2} \quad (7.48)$$

Donde

F_{SD} = Fuerza de dise\~no sismico total por piso para el instante de m\~ximo desplazamiento.

$F_m SSR$ = Fuerza sismica por piso para el modo "m" para el instante de m\~ximo desplazamiento

7.4.2 Instante de m\~xima velocidad.

La fuerza de dise\~no sismico para el estado de m\~xima velocidad debe ser calculada seg\~n la ecuaci3n (7.49)

$$F_{SV} = \sqrt{\sum_m (F_m DFV)^2} \quad (7.49)$$

Donde

F_{SV} = Fuerza de dise\~no sismico total por piso para el instante de m\~xima velocidad.

$F_m DFV$ = Fuerza sismica por piso para el modo "m" para el instante de m\~xima velocidad.

7.4.3 Estado de máxima aceleración.

La fuerza sísmica de diseño para el instante de máxima aceleración se calcula mediante el producto del factor CF1 y las fuerzas para el instante de máximo desplazamiento sumado al producto de CF2 y las fuerzas para el instante de máxima velocidad. La fuerza sísmica por piso para el instante de máxima aceleración se calcula mediante la ecuación (7.50).

$$F_{SA} = \sqrt{\sum_m (CF_1 F_m SSR + CF_2 F_m DFV)^2} \quad (7.50)$$

Los coeficientes de combinación se calculan mediante las siguientes expresiones

$$CF_1 = \cos(\delta) \quad (7.51)$$

$$\cos(\delta) \cdot \mu < 1; CF_1 = \cos(\delta) \cdot \mu \quad (7.52)$$

$$\cos(\delta) \cdot \mu \geq 1; CF_1 = 1 \quad (7.53)$$

$$CF_2 = \text{sen}(\delta)^\alpha \quad (7.54)$$

Para disipadores de fluido viscoso lineales $\alpha=1$.

$$\delta = \tan^{-1}(2\beta_{vm}) \quad (7.55)$$

Para disipadores de fluido viscoso no lineales $\alpha < 1$.

$$\delta = \left(\frac{2\pi\alpha\beta_{vm}}{\lambda} \right)^{\frac{1}{2-\alpha}} \quad (7.56)$$

$$\beta_{vm} = \beta_i + \beta_v(\mu)^{1-\alpha/2} \quad (7.57)$$

8. Ensayos y pruebas

Cada dispositivo de amortiguamiento debe ser sometido a al menos 2000 ciclos continuos de ensayo bajo cargas de viento. La carga de viento debe aplicarse con amplitudes y frecuencias igual al inverso del periodo fundamental de la estructura. Sin embargo, se pueden omitir estas pruebas si los dispositivos no están expuestos a fuerzas o desplazamiento significativos de viento.

Además, cada dispositivo debe ser sometido a una secuencia de ciclos sinusoidales a una frecuencia de $1/1.5T_1$, donde T_1 es el periodo fundamental de la estructura.

- a) 10 ciclos completos de desplazamiento en el dispositivo correspondiente a 0.33 veces el desplazamiento bajo condiciones de SMC.
- b) 5 ciclos completos de desplazamiento en el dispositivo correspondiente a 0.67 veces el desplazamiento bajo condiciones de SMC.
- c) 3 ciclos completos de desplazamiento en el dispositivo correspondiente a 1.0 veces el desplazamiento del dispositivo bajo las condiciones de SMC.

8.1 Criterios de aceptación del disipador

Se debe cumplir los siguientes criterios de aceptación para cada disipador.

1. Integridad Física: No se permite la aparición de daños visibles como fugas, deformaciones, roturas, o fallas en los sellos.
2. Consistencia de Fuerza en Desplazamiento Nulo: La diferencia entre las fuerzas máximas y mínimas en desplazamiento cero, para cualquier ciclo, no debe exceder el 15% respecto al promedio de estas fuerzas a lo largo de todos los ciclos de prueba.
3. Estabilidad de la Energía Disipada: El área del bucle de histéresis, que representa la energía disipada por el dispositivo, debe mantenerse dentro de un margen del 15% respecto al área promedio calculada para todos los ciclos, considerando las condiciones de temperatura y frecuencia especificadas en la prueba.

9. Revisión del diseño.

Se debe realizar una revisión exhaustiva del diseño de la estructura sismorresistente, del sistema de amortiguamiento y de sus ensayos correspondientes, la cual debe ser llevada a cabo por un revisor independiente con amplia experiencia en el diseño de sistemas de disipación de energía. La revisión del sistema de amortiguamiento debe abarcar, entre otros aspectos, los siguientes controles:

1. Evaluación minuciosa de los criterios sísmicos establecidos en el proyecto (tales como los espectros de aceleración, los registros de aceleraciones, entre otros).
2. Revisión crítica del diseño preliminar de la estructura sismorresistente y del sistema de amortiguamiento.
3. Análisis detallado del diseño definitivo del sistema sismorresistente (incluyendo tanto la estructura como el sistema de amortiguamiento) y los cálculos y análisis que lo sustentan.
4. Evaluación rigurosa de los requisitos de ensayos, control de calidad, certificación de fabricación, programa de mantenimiento y requisitos de inspección aplicables a cada uno de los disipadores utilizados.

Tabla 2. Valores del coeficiente básico de reducción y Coeficiente básico de sobre resistencia

	Sistema Estructural	R	Ω_0
Acero	Pórticos especiales resistentes a momentos	8	3
	Pórticos intermedios resistentes a momentos	5	3
	Pórticos ordinarios resistentes a momentos	4	3
	Pórticos especiales concéntricamente arriostrados	7	2
	Pórticos ordinarios concéntricamente arriostrados	4	2
	Pórticos excentricamente arriostrados	8	2
Concreto Armado	Pórticos	8	3
	Dual	7	2.5
	Muros estructurales	6	2.5
	Muros de ductilidad limitada	4	2.5
Albañilería	Armada o Confinada	3	2.5
Madera		7	

Ω_0 : Factores de sobrerresistencia tomado de la norma ASCE 7-22

R : Coeficiente básico de reducción de la NTP E.030 Diseño Sismorresistente

ANEXO 2: Tablas Resumen y Diseño de secciones.

El presente anexo presenta las tablas resumen del análisis realizado al edificio estudiado en la presente tesis. Se aborda el análisis de la estructura con disipadores lineal y no lineales ($\alpha=0.5$) con amortiguamiento agregado de 15% y 20%. También se muestra un ejemplo de diseño de un brazo metálico y el diseño de una viga y una columna pertenecientes al sistema sismorresistente, por último se presenta la deducción teórica de los factores de combinación CF1 y CF2.

1. Propiedades modales de la estructura.

PROPIEDADES MODALES DE LA ESTRUCTURA DE 6 PISOS

Pisos	Modos	MODO 1	MODO 2	MODO 3	MODO 4	MODO 5	MODO 6	MODO R
	Periodo (s)	1.129	0.349	0.186	0.117	0.083	0.066	0.452
6	Formas Modales ϕ_m	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
5		0.924	0.421	-0.357	-1.232	-2.054	-2.600	0.669
4		0.796	-0.311	-1.054	-0.408	1.674	4.000	0.111
3		0.616	-0.852	-0.308	1.366	0.185	-4.444	-0.675
2		0.403	-0.923	0.865	0.049	-1.880	3.867	-1.605
1		0.175	-0.522	0.930	-1.423	1.978	-2.400	-2.597
Peso efectivo (PE)		4258.39	553.35	225.09	110.70	46.25	11.56	894.71
Factor de participacion modal (FP)		1.30	-0.46	0.26	-0.14	0.06	-0.01	-0.30

2. Edificio con DFV lineales con 15% de amortiguamiento.

Se presentan los cuadros resumen para el edificio con DFV lineales y amortiguamiento del 15%. Los cálculos están realizados para un sismo de diseño $Z=0.45g$ y un tipo de suelo S1.

2.1 Amortiguamiento viscoso.

Se presentan los cálculos para hallar el amortiguamiento viscoso para los modos fundamental superiores y residual.

Amortiguamiento viscoso para el modo 1T1 (seg) 1.129

Piso	Masa (tonf/g)	C (tonf*s/m)	# Disp x piso	θ	Cos (θ)	ϕ_1	ϕ_r	$C * \text{Cos}(\theta)^2 * \phi_r^2$	masa * ϕ_1^2	β_{v1}
6	75.1	743.9	4	26.57	0.89	1.00	0.08	13.69	75.15	15.0%
5	88.6	743.9	4	26.57	0.89	0.92	0.13	38.98	75.65	
4	88.6	743.9	4	26.57	0.89	0.80	0.18	77.20	56.15	
3	88.6	743.9	4	26.57	0.89	0.62	0.21	108.26	33.62	
2	88.6	743.9	4	26.57	0.89	0.40	0.23	123.18	14.37	
1	95.9	743.9	4	29.54	0.87	0.18	0.18	69.26	2.95	

β_{v1} = Amortiguamiento viscoso para el modo 1 (expresado en porcentaje) 430.57 257.89

C = Constante de amortiguamiento

θ = Ángulo de inclinación de los disipadores respecto de la horizontal

ϕ_1 = Forma modal - modo 1

Amortiguamiento viscoso para el modo 2

T2 (seg) 0.349

Piso	Masa (tonf/g)	C (tonf*s/m)	# Disp	θ	Cos (θ)	ϕ_2	ϕ_r	$C^*Cos(\theta)^2*\phi_r$	masa* ϕ_2^2	β_{v2}
6.00	75.1	743.9	4.0	26.57	0.89	1.00	0.58	797.82	75.15	39.6%
5.00	88.6	743.9	4.0	26.57	0.89	0.42	0.73	1275.61	15.70	
4.00	88.6	743.9	4.0	26.57	0.89	-0.31	0.54	695.81	8.57	
3.00	88.6	743.9	4.0	26.57	0.89	-0.85	0.07	12.26	64.24	
2.00	88.6	743.9	4.0	26.57	0.89	-0.92	-0.40	384.50	75.53	
1.00	95.9	743.9	4.0	29.54	0.87	-0.52	-0.52	612.61	26.07	

β_{v2} = Amortiguamiento viscoso para el modo 2 (expresado en porcentaje)

3778.61 265.26

C = Constante de amortiguamiento

θ = Ángulo de inclinación de los disipadores respecto de la horizontal

ϕ_2 = Forma modal - modo 2

Amortiguamiento viscoso para el modo 3

T3 (seg) 0.186

Piso	Masa (tonf/g)	C (tonf*s/m)	# Disp	θ	Cos (θ)	ϕ_3	ϕ_r	$C^*Cos(\theta)^2*\phi_r$	masa* ϕ_3^2	β_{v3}
6.00	75.1	743.9	4.0	26.6	0.9	1.0	1.4	4381.6	75.1	53.3%
5.00	88.6	743.9	4.0	26.6	0.9	-0.4	0.7	1157.3	11.3	
4.00	88.6	743.9	4.0	26.6	0.9	-1.1	-0.7	1324.5	98.4	
3.00	88.6	743.9	4.0	26.6	0.9	-0.3	-1.2	3274.9	8.4	
2.00	88.6	743.9	4.0	26.6	0.9	0.9	-0.1	10.0	66.2	
1.00	95.9	743.9	4.0	29.5	0.9	0.9	0.9	1946.9	76.6	

β_{v3} = Amortiguamiento viscoso para el modo 3 (expresado en porcentaje)

12095.2 336.0

C = Constante de amortiguamiento

θ = Ángulo de inclinación de los disipadores respecto de la horizontal

ϕ_3 = Forma modal - modo 3

Amortiguamiento viscoso para el modo 4

T4 (seg) 0.117

Piso	Masa (tonf/g)	C (tonf*s/m)	# Disp	θ	Cos (θ)	ϕ_4	ϕ_r	$C^*Cos(\theta)^2*\phi_r$	masa* ϕ_4^2	β_{v4}
6.00	75.1	743.9	4.0	26.6	0.9	1.0	2.2	11862.3	75.1	55.5%
5.00	88.6	743.9	4.0	26.6	0.9	-1.2	-0.8	1615.9	134.5	
4.00	88.6	743.9	4.0	26.6	0.9	-0.4	-1.8	7496.4	14.8	
3.00	88.6	743.9	4.0	26.6	0.9	1.4	1.3	4127.9	165.3	
2.00	88.6	743.9	4.0	26.6	0.9	0.0	1.5	5156.4	0.2	
1.00	95.9	743.9	4.0	29.5	0.9	-1.4	-1.4	4557.8	194.0	

β_{v4} = Amortiguamiento viscoso para el modo 4 (expresado en porcentaje)

34816.7 584.0

C = Constante de amortiguamiento

θ = Ángulo de inclinación de los disipadores respecto de la horizontal

ϕ_4 = Forma modal - modo 4

Amortiguamiento viscoso para el modo 5

T5 (seg) 0.083

Piso	Masa (tonf/g)	C (tonf*s/m)	# Disp	θ	Cos (θ)	ϕ_5	ϕ_r	C*Cos (θ) ² * ϕ_r ²	masa* ϕ_5 ²	β_{v5}
6.00	75.1	743.9	4.0	26.6	0.9	1.0	3.6	30848.4	75.1	54.7%
5.00	88.6	743.9	4.0	26.6	0.9	-2.6	-6.6	103684.8	598.7	
4.00	88.6	743.9	4.0	26.6	0.9	4.0	8.4	169734.1	1417.1	
3.00	88.6	743.9	4.0	26.6	0.9	-4.4	-8.3	164416.4	1749.5	
2.00	88.6	743.9	4.0	26.6	0.9	3.9	6.3	93476.0	1324.2	
1.00	95.9	743.9	4.0	29.5	0.9	-2.4	-2.4	12973.2	552.2	

β_{v5} = Amortiguamiento viscoso para el modo 5 (expresado en porcentaje)

575132.9 5716.9

C = Constante de amortiguamiento

θ = Ángulo de inclinación de los disipadores respecto de la horizontal

ϕ_5 = Forma modal - modo 5

Amortiguamiento viscoso para el modo 6

T6 (seg) 0.066

Piso	Masa (tonf/g)	C (tonf*s/m)	# Disp	θ	Cos (θ)	ϕ_6	ϕ_r	C*Cos (θ) ² * ϕ_r ²	masa* ϕ_6 ²	β_{v6}
6.00	75.1	743.9	4.0	26.6	0.9	1.0	3.6	30848.4	75.1	52.8%
5.00	88.6	743.9	4.0	26.6	0.9	-2.6	-6.6	103684.8	598.7	
4.00	88.6	743.9	4.0	26.6	0.9	4.0	8.4	169734.1	1417.1	
3.00	88.6	743.9	4.0	26.6	0.9	-4.4	-8.3	164416.4	1749.5	
2.00	88.6	743.9	4.0	26.6	0.9	3.9	6.3	93476.0	1324.2	
1.00	95.9	743.9	4.0	29.5	0.9	-2.4	-2.4	12973.2	552.2	

β_{v6} = Amortiguamiento viscoso para el modo 6 (expresado en porcentaje)

575132.9 5716.9

C = Constante de amortiguamiento

θ = Ángulo de inclinación de los disipadores respecto de la horizontal

ϕ_6 = Forma modal - modo 6

Amortiguamiento viscoso para el modo R

TR (seg) 0.4516

Piso	Masa (tonf/g)	C (tonf*s/m)	# Disp	θ	Cos (θ)	ϕ_R	ϕ_r	C*Cos (θ) ² * ϕ_r ²	masa* ϕ_R ²	β_{vR}
6.00	75.1	743.9	4.0	26.6	0.9	1.0	0.3	260.5	75.1	76.9%
5.00	88.6	743.9	4.0	26.6	0.9	0.7	0.6	741.7	39.7	
4.00	88.6	743.9	4.0	26.6	0.9	0.1	0.8	1469.3	1.1	
3.00	88.6	743.9	4.0	26.6	0.9	-0.7	0.9	2060.4	40.3	
2.00	88.6	743.9	4.0	26.6	0.9	-1.6	1.0	2344.3	228.2	
1.00	95.9	743.9	4.0	29.5	0.9	-2.6	-2.6	15196.2	646.8	

β_{vR} = Amortiguamiento viscoso para el modo residual (expresado en porcentaje)

22072.3 1031.2

C = Constante de amortiguamiento

θ = Ángulo de inclinación de los disipadores respecto de la horizontal

ϕ_R = Forma modal - modo R

2.2 Cálculo de respuesta de los procedimientos simplificados.

1. RESPUESTA ELÁSTICA DE LA ESTRUCTURA

Parámetro	Unidades	Piso	Modo 1	Modo 2	Modo 3	Modo 4	Modo 5	Modo 6	Modo R	SRRS-RE	SRRS-FLE
Periodo elástico (Te)	Segundos	-	1.13	0.35	0.19	0.12	0.08	0.07	0.45	-	-
Amortiguamiento Viscoso (β_v)		-	5.57	18.00	33.78	53.70	75.70	95.20	13.91	-	-
Amortiguamiento efectivo (β_{v+i})		-	0.20	0.45	0.58	0.61	0.60	0.58	0.82	-	-
Coef. de reduccion (BE)		-	1.53	2.19	2.56	2.63	2.60	2.55	3.28	-	-
Aceleración Espectral Sa(Te,5%)	g	6	0.40	1.13	1.13	1.13	1.13	1.13	1.00	-	-
Desplazamiento elástico - techo	cm	6	10.74	0.72	0.10	0.02	0.00	0.00	0.46	10.76	10.75

2. CORTANTE BASAL Y DESPLAZAMIENTO DEL TECHO

Parámetro	Unidades	Piso	Modo 1	Modo 2	Modo 3	Modo 4	Modo 5	Modo 6	Modo R	SRRS-RE	SRRS-FLE
μ ductilidad	-	-	1.97	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	-	-
μ max	-	-	2.67	-	-	-	-	-	-	-	-
Periodo efectivo Teff	Segundos	-	1.58	0.35	0.19	0.12	0.08	0.07	0.45	-	-
Amortiguamiento viscoso ($\beta_v * \mu^{0.5}$)	-	-	0.21	0.40	0.53	0.56	0.55	0.53	0.77	-	-
Factor de ajuste (qh)	-	-	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	-	-
Amortiguamiento histerético (β_h)	-	-	0.15	-	-	-	-	-	-	-	-
Amortiguamiento efectivo (β_{eff})	-	-	0.41	0.45	0.58	0.61	0.60	0.58	0.82	-	-
Coefficiente de reducción (Bd)	-	-	2.08	2.19	2.56	2.63	2.60	2.55	3.28	-	-
Aceleración Espectral (Sa) Teff (5%)	g	6	0.28	1.13	1.13	1.13	1.13	1.13	1.00	0.00	0.00
Desplazamiento elástico reducido (Ds)	cm	6	1.87	-0.24	0.03	-0.01	0.00	0.00	-0.15	1.88	1.87
Desplazamiento de diseño inelastico - techo (Dd)	cm	6	11.03	-0.72	0.10	-0.02	0.00	0.00	-0.46	11.05	11.04
Coefficiente de cortante basal (Cs)	g		0.05	0.17	0.15	0.14	0.14	0.15	0.10	-	-
Cortante basal (Vbasal)	tonf		193.41	94.73	32.91	15.80	6.66	1.70	90.71	218.54	213.62
Desplazamiento de fluencia (Dy)	cm		5.60	-	-	-	-	-	-	-	-

3. RESPUESTAS PARA EL INSTANTE DEL MÁXIMO DESPLAZAMIENTO

Parámetro	Unidades	Piso	Modo 1	Modo 2	Modo 3	Modo 4	Modo 5	Modo 6	Modo R	SRRS-RE	SRRS-FLE
Desplazamiento por piso	cm	6	11.03	-0.72	0.10	-0.02	0.00	0.00	-0.46	11.05	11.04
		5	10.19	-0.30	-0.03	0.02	-0.01	0.00	-0.31	10.20	10.20
		4	8.78	0.22	-0.10	0.01	0.01	0.00	-0.05	8.79	8.78
		3	6.80	0.61	-0.03	-0.03	0.00	0.00	0.31	6.82	6.80
		2	4.44	0.66	0.08	0.00	-0.01	0.00	0.74	4.49	4.50
		1	1.93	0.37	0.09	0.03	0.01	0.00	1.19	1.97	2.27
Desplazamiento de entrepiso	cm	6	0.84	-0.42	0.13	-0.05	0.01	0.00	-0.15	0.86	0.84
		5	1.41	-0.52	0.07	0.02	-0.02	0.00	-0.26	1.41	1.42
		4	1.99	-0.39	-0.07	0.04	0.01	-0.01	-0.36	1.96	1.98
		3	2.35	-0.05	-0.11	-0.03	0.01	0.01	-0.43	2.33	2.30
		2	2.51	0.29	-0.01	-0.03	-0.02	0.00	-0.45	2.52	2.23
		1	1.93	0.37	0.09	0.03	0.01	0.00	1.19	1.97	2.27
Fuerzas laterales por piso	tonf	6	43.44	-58.20	27.90	-14.62	6.18	-1.56	-22.23	79.42	48.80
		5	47.32	-28.88	-11.73	21.24	-14.97	4.77	-17.53	62.52	50.46
		4	40.76	21.33	-34.66	7.04	12.20	-7.33	-2.91	59.75	40.87
		3	31.54	58.42	-10.13	-23.55	1.35	8.15	17.68	71.65	36.16
		2	20.62	63.34	28.44	-0.85	-13.71	-7.09	42.05	74.06	46.83
		1	9.72	38.72	33.09	26.53	15.60	4.76	73.65	60.49	74.29
Fuerza cortante por piso	tonf	6	43.44	-58.20	27.90	-14.62	6.18	-1.56	-22.23	79.42	48.80
		5	90.76	-87.08	16.17	6.62	-8.79	3.21	-39.76	127.33	99.08
		4	131.52	-65.75	-18.49	13.66	3.41	-4.12	-42.67	148.92	138.27
		3	163.06	-7.33	-28.63	-9.89	4.76	4.02	-24.99	166.13	164.97
		2	183.69	56.02	-0.18	-10.74	-8.95	-3.06	17.06	192.57	184.48
		1	193.41	94.73	32.91	15.80	6.66	1.70	90.71	218.54	213.62
Fuerza cortante de resistencia máxima Vy (Instante de máximo desplazamiento)	tonf	6	130.32	-174.60	83.71	-43.87	18.55	-4.67	-66.68	238.25	146.39
		5	272.27	-261.25	48.51	19.85	-26.37	9.63	-119.28	381.99	297.25
		4	394.56	-197.25	-55.48	40.97	10.23	-12.36	-128.00	446.76	414.80
		3	489.19	-21.98	-85.88	-29.67	14.27	12.07	-74.97	498.39	494.90
		2	551.07	168.05	-0.55	-32.22	-26.84	-9.19	51.18	577.72	553.44
		1	580.22	284.20	98.72	47.39	19.97	5.10	272.12	655.62	640.86

4. RESPUESTAS PARA EL INSTANTE DE MÁXIMA VELOCIDAD

Cantidad	Unidades	Piso	Modo 1	Modo 2	Modo 3	Modo 4	Modo 5	Modo 6	Modo R	SRRS-RE	SRRS-FLE
Velocidad relativa de entre piso	cm/s	6	3.32	-7.47	4.47	-2.43	1.00	-0.23	-2.11	9.68	3.93
		5	5.60	-9.45	2.30	0.90	-1.22	0.43	-3.56	11.33	6.63
		4	7.88	-6.98	-2.46	1.93	0.49	-0.55	-5.01	11.00	9.34
		3	9.33	-0.93	-3.87	-1.43	0.67	0.54	-5.93	10.28	11.05
		2	9.95	5.19	-0.21	-1.60	-1.26	-0.41	-6.33	11.41	11.79
		1	7.67	6.73	3.07	1.55	0.65	0.16	16.57	10.79	18.26
Fuerza axial en los disipadores	tonf	6	22.07	-49.71	29.77	-16.15	6.63	-1.56	-14.04	64.43	26.15
		5	37.24	-62.86	15.30	5.96	-8.09	2.86	-23.69	75.37	44.13
		4	52.41	-46.42	-16.37	12.83	3.23	-3.66	-33.34	73.20	62.11
		3	62.06	-6.16	-25.73	-9.52	4.48	3.61	-39.48	68.38	73.55
		2	66.20	34.51	-1.42	-10.64	-8.37	-2.72	-42.11	75.93	78.46
		1	49.64	43.56	19.84	10.01	4.18	1.01	107.22	69.81	118.15
Fuerza horizontal en disipadores	tonf	6	19.74	-44.46	26.62	-14.44	5.93	-1.40	-12.55	57.62	23.39
		5	33.30	-56.22	13.68	5.33	-7.23	2.56	-21.19	67.41	39.47
		4	46.87	-41.52	-14.64	11.48	2.89	-3.28	-29.82	65.47	55.55
		3	55.50	-5.51	-23.02	-8.52	4.01	3.23	-35.31	61.16	65.78
		2	59.21	30.87	-1.27	-9.52	-7.49	-2.43	-37.66	67.91	70.17
		1	43.18	37.90	17.26	8.71	3.63	0.88	93.28	60.74	102.79
Fuerza lateral sísmica por piso (4 disipadores por piso)	tonf	6	78.94	-177.84	106.49	-57.76	23.71	-5.59	-50.22	230.50	93.56
		5	133.21	-224.88	54.73	21.32	-28.94	10.24	-84.74	269.64	157.88
		4	187.48	-166.08	-58.55	45.92	11.56	-13.11	-119.27	261.87	222.21
		3	222.02	-22.05	-92.07	-34.07	16.03	12.90	-141.24	244.62	263.14
		2	236.82	123.46	-5.09	-38.08	-29.95	-9.73	-150.66	271.65	280.68
		1	172.73	151.59	69.05	34.83	14.53	3.52	373.12	242.94	411.16

5. RESPUESTAS PARA EL INSTANTE DE MÁXIMA ACELERACIÓN

Cantidad	Unidades	Piso	Modo 1	Modo 2	Modo 3	Modo 4	Modo 5	Modo 6	Modo R	SRRS-RE	SRRS-FLE
β_{eff}	-	-	0.26	0.45	0.58	0.61	0.60	0.58	0.82	-	-
Parametro δ	-	-	0.48	0.73	0.86	0.88	0.87	0.86	1.02	-	-
Coefficiente CF1	-	-	0.89	0.75	0.65	0.64	0.64	0.65	0.52	-	-
Producto CF1* μ	-	-	1.75	0.75	0.65	0.64	0.64	0.65	0.52	-	-
CF1 (Desplazamiento)	-	-	1.00	0.75	0.65	0.64	0.64	0.65	0.52	-	-
CF2 (Velocidad)	-	-	0.46	0.67	0.76	0.77	0.77	0.76	0.85	-	-
Fuerzas laterales por piso	tonf	6	166.80	-248.67	135.33	-72.47	30.09	-7.28	-77.60	337.91	183.97
		5	203.50	-214.30	18.62	57.02	-51.03	17.10	-99.73	306.32	226.63
		4	208.93	-62.72	-112.15	48.85	32.36	-24.30	-106.35	253.35	234.44
		3	197.23	116.17	-89.67	-71.26	14.88	25.74	-92.94	257.68	218.03
		2	171.31	224.01	51.70	-30.98	-49.36	-21.26	-62.88	293.34	182.49
		1	108.97	187.57	117.05	77.55	41.20	12.01	433.59	261.95	447.07
Fuerza cortante por piso	tonf	6	166.80	-248.67	135.33	-72.47	30.09	-7.28	-77.60	337.91	183.97
		5	370.30	-462.97	153.94	-15.45	-20.94	9.82	-177.34	613.14	410.58
		4	579.23	-525.70	41.79	33.40	11.42	-14.48	-283.69	784.26	644.97
		3	776.46	-409.53	-47.87	-37.86	26.31	11.26	-376.62	880.42	862.98
		2	947.77	-185.52	3.83	-68.84	-23.06	-10.00	-439.50	968.54	1044.71
		1	1056.74	2.06	120.88	8.71	18.14	2.01	-5.91	1063.82	1056.76

3. Edificio con DFV No lineales ($\alpha=0.5$) con 15% de amortiguamiento.

Se presentan los cuadros resumen para el edificio con DFV No lineales y amortiguamiento del 15%. Los cálculos están realizados para un sismo de diseño $Z=0.45g$ y un tipo de suelo S1.

3.1 Amortiguamiento viscoso para el modo fundamental y superiores.

Amortiguamiento viscoso para el modo 1

T1 (seg)	1.129
----------	-------

Piso	Masa (tonf/g)	C (ton*(s/m)^0.5)	# Disp x piso	θ	Cos (θ)	ϕ_1	ϕ_r	4*N	masa* ϕ_1^2	β_{v1}
6	75.1	210.0	4	26.57	0.89	1.00	0.08	475.95	75.15	15.00%
5	88.6	210.0	4	26.57	0.89	0.92	0.13	1043.34	75.65	
4	88.6	210.0	4	26.57	0.89	0.80	0.18	1742.03	56.15	
3	88.6	210.0	4	26.57	0.89	0.62	0.21	2244.91	33.62	
2	88.6	210.0	4	26.57	0.89	0.40	0.23	2473.11	14.37	
1	95.9	210.0	4	29.54	0.87	0.18	0.18	1605.76	2.95	
								9585.11	257.89	

β_{v1} = Amortiguamiento viscoso para el modo 1 (expresado en porcentaje)

C = Constante de amortiguamiento

θ = Ángulo de inclinación de los disipadores respecto de la horizontal

ϕ_1 = Forma modal - modo 1

$$N = (2\pi)^{\alpha} T_1^{2-\alpha} \lambda C_N f^{1+\alpha} D_{techo}^{\alpha-1} \phi_{r,i}^{1+\alpha j}$$

Amortiguamiento viscoso para el modo 2

T2 (seg)	0.349
----------	-------

Piso	Masa (tonf/g)	C (tonf*s/m)	# Disp x piso	θ	Cos (θ)	ϕ_2	ϕ_r	C*Cos (θ) 2 * ϕ_r^2	masa* ϕ_2^2	β_{v2}
6.00	75.1	584.4	4.0	26.57	0.89	1.00	0.58	626.73	75.15	24.0%
5.00	88.6	449.9	4.0	26.57	0.89	0.42	0.73	771.39	15.70	
4.00	88.6	379.2	4.0	26.57	0.89	-0.31	0.54	354.68	8.57	
3.00	88.6	348.5	4.0	26.57	0.89	-0.85	0.07	5.74	64.24	
2.00	88.6	337.4	4.0	26.57	0.89	-0.92	-0.40	174.38	75.53	
1.00	95.9	384.3	4.0	29.54	0.87	-0.52	-0.52	316.46	26.07	
								2249.39	265.26	

β_{v2} = Amortiguamiento viscoso para el modo 2 (expresado en porcentaje)

C = Constante de amortiguamiento

θ = Ángulo de inclinación de los disipadores respecto de la horizontal

ϕ_2 = Forma modal - modo 2

Amortiguamiento viscoso para el modo 3

T3 (seg) 0.186

Piso	Masa (tonf/g)	C (tonf*s/m)	# Disp x piso	θ	Cos (θ)	ϕ_3	ϕ_r	$C^*Cos(\theta)^{\wedge}2*\phi_r^{\wedge}2$	masa* $\phi_3^{\wedge}2$	β_{v3}
6.00	75.1	584.4	4.0	26.6	0.9	1.0	1.4	3442.0	75.1	32.0%
5.00	88.6	449.9	4.0	26.6	0.9	-0.4	0.7	699.9	11.3	
4.00	88.6	379.2	4.0	26.6	0.9	-1.1	-0.7	675.1	98.4	
3.00	88.6	348.5	4.0	26.6	0.9	-0.3	-1.2	1534.0	8.4	
2.00	88.6	337.4	4.0	26.6	0.9	0.9	-0.1	4.5	66.2	
1.00	95.9	384.3	4.0	29.5	0.9	0.9	0.9	1005.7	76.6	

β_{v3} = Amortiguamiento viscoso para el modo 3 (expresado en porcentaje)

7361.25 336.0

C = Constante de amortiguamiento

θ = Ángulo de inclinación de los disipadores respecto de la horizontal

ϕ_3 = Forma modal - modo 3

Amortiguamiento viscoso para el modo 4

T4 (seg) 0.117

Piso	Masa (tonf/g)	C (tonf*s/m)	# Disp x piso	θ	Cos (θ)	ϕ_4	ϕ_r	$C^*Cos(\theta)^{\wedge}2*\phi_r^{\wedge}2$	masa* $\phi_4^{\wedge}2$	β_{v4}
6.00	75.1	584.4	4.0	26.6	0.9	1.0	2.2	9318.5	75.1	33.0%
5.00	88.6	449.9	4.0	26.6	0.9	-1.2	-0.8	977.2	134.5	
4.00	88.6	379.2	4.0	26.6	0.9	-0.4	-1.8	3821.2	14.8	
3.00	88.6	348.5	4.0	26.6	0.9	1.4	1.3	1933.6	165.3	
2.00	88.6	337.4	4.0	26.6	0.9	0.0	1.5	2338.6	0.2	
1.00	95.9	384.3	4.0	29.5	0.9	-1.4	-1.4	2354.4	194.0	

β_{v4} = Amortiguamiento viscoso para el modo 4 (expresado en porcentaje)

20743.47 584.0

C = Constante de amortiguamiento

θ = Ángulo de inclinación de los disipadores respecto de la horizontal

ϕ_4 = Forma modal - modo 4

Amortiguamiento viscoso para el modo 5

T5 (seg) 0.083

Piso	Masa (tonf/g)	C (tonf*s/m)	# Disp x piso	θ	Cos (θ)	ϕ_5	ϕ_r	$C^*Cos(\theta)^{\wedge}2*\phi_r^{\wedge}2$	masa* $\phi_5^{\wedge}2$	β_{v5}
6.00	75.1	584.4	4.0	26.6	0.9	1.0	3.6	17443.8	75.1	31.0%
5.00	88.6	449.9	4.0	26.6	0.9	-2.6	-6.6	20007.6	373.8	
4.00	88.6	379.2	4.0	26.6	0.9	4.0	8.4	2690.5	248.2	
3.00	88.6	348.5	4.0	26.6	0.9	-4.4	-8.3	4755.4	3.0	
2.00	88.6	337.4	4.0	26.6	0.9	3.9	6.3	16074.0	313.2	
1.00	95.9	384.3	4.0	29.5	0.9	-2.4	-2.4	4553.3	375.1	

β_{v5} = Amortiguamiento viscoso para el modo 5 (expresado en porcentaje)

65524.57 1388.5

C = Constante de amortiguamiento

θ = Ángulo de inclinación de los disipadores respecto de la horizontal

ϕ_5 = Forma modal - modo 5

Amortiguamiento viscoso para el modo 6

T6 (seg) 0.066

Piso	Masa (tonf/g)	C (tonf*s/m)	# Disp x piso	θ	Cos (θ)	ϕ_6	ϕ_r	$C^*Cos(\theta)^{\wedge}2*\phi_r^{\wedge}2$	masa* $\phi_6^{\wedge}2$	β_{v6}
6.00	75.1	584.4	4.0	26.6	0.9	1.0	3.6	24233.1	75.1	28.0%
5.00	88.6	449.9	4.0	26.6	0.9	-2.6	-6.6	62700.3	598.7	
4.00	88.6	379.2	4.0	26.6	0.9	4.0	8.4	86519.4	1417.1	
3.00	88.6	348.5	4.0	26.6	0.9	-4.4	-8.3	77015.0	1749.5	
2.00	88.6	337.4	4.0	26.6	0.9	3.9	6.3	42395.1	1324.2	
1.00	95.9	384.3	4.0	29.5	0.9	-2.4	-2.4	6701.7	552.2	

β_{v6} = Amortiguamiento viscoso para el modo 6 (expresado en porcentaje)

299564.54 5716.9

C = Constante de amortiguamiento

θ = Ángulo de inclinación de los disipadores respecto de la horizontal

ϕ_6 = Forma modal - modo 6

Amortiguamiento viscoso para el modo R

TR (seg)	0.4516
----------	--------

Piso	Masa (tonf/g)	C (tonf*s/m)	# Disp x piso	θ	Cos (θ)	ϕ_R	ϕ_r	Cos (θ) ² * ϕ_r	masa* ϕ_R ²	β_{vR}
6.00	75.1	584.4	4.0	26.6	0.9	1.0	0.3	204.6	75.1	39.0%
5.00	88.6	449.9	4.0	26.6	0.9	0.7	0.6	448.5	39.7	
4.00	88.6	379.2	4.0	26.6	0.9	0.1	0.8	748.9	1.1	
3.00	88.6	348.5	4.0	26.6	0.9	-0.7	0.9	965.1	40.3	
2.00	88.6	337.4	4.0	26.6	0.9	-1.6	1.0	1063.2	228.2	
1.00	95.9	384.3	4.0	29.5	0.9	-2.6	-2.6	7850.0	646.8	

β_{vR} = Amortiguamiento viscoso para el modo residual (expresado en porcentaje)

11280.45 1031.2

C = Constante de amortiguamiento

θ = Ángulo de inclinación de los disipadores respecto de la horizontal

ϕ_R = Forma modal - modo R

3.2 Cálculo de respuesta de los procedimientos simplificados.

1. RESPUESTA ELÁSTICA DE LA ESTRUCTURA

Parámetro	Unidades	Piso	Modo 1	Modo 2	Modo 3	Modo 4	Modo 5	Modo 6	Modo R	SRRS-RE	SRRS-FLE
Periodo elástico (Te)	Segundos	-	1.13	0.35	0.19	0.12	0.08	0.07	0.45	-	-
Amortiguamiento Viscoso (β_v)	-	-	0.15	0.24	0.32	0.33	0.31	0.28	0.39	-	-
Amortiguamiento efectivo (β_{v+i})	-	-	0.20	0.29	0.37	0.38	0.36	0.33	0.44	-	-
Coef. de reducción (BE)	-	-	1.53	1.76	2.00	2.02	1.97	1.87	2.18	-	-
Aceleración Espectral Sa(Te,5%)	g	6	0.40	1.13	1.13	1.13	1.13	1.13	1.00	-	-
Desplazamiento elástico - techo	cm	6	10.74	0.89	0.13	0.03	0.01	0.00	0.69	10.78	10.76

2. CORTANTE BASAL Y DESPLAZAMIENTO DEL TECHO

Parámetro	Unidades	Piso	Modo 1	Modo 2	Modo 3	Modo 4	Modo 5	Modo 6	Modo R	SRRS-RE	SRRS-FLE
μ ductilidad	-	-	1.87	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	-	-
μ max	-	-	2.67	-	-	-	-	-	-	-	-
Periodo efectivo Teff	Segundos	-	1.54	0.35	0.19	0.12	0.08	0.07	0.45	-	-
Amortiguamiento viscoso ($\beta_v * \mu^{0.5}$)	-	-	0.24	0.24	0.32	0.33	0.31	0.28	0.39	-	-
Factor de ajuste (qh)	-	-	0.50	0.77	1.00	1.00	1.00	1.00	0.59	-	-
Amortiguamiento histerético (β_h)	-	-	0.14	-	-	-	-	-	-	-	-
Amortiguamiento efectivo (β_{eff})	-	-	0.43	0.29	0.37	0.38	0.36	0.33	0.44	-	-
Coefficiente de reducción (Bd)	-	-	2.14	1.76	2.00	2.02	1.97	1.87	2.18	-	-
Aceleración Espectral (Sa) Teff (5%)	g	6	0.29	1.13	1.13	1.13	1.13	1.13	1.00	-	-
Desplazamiento elástico reducido (Ds)	cm	6	1.86	-0.30	0.04	-0.01	0.00	0.00	-0.23	1.89	1.88
Desplazamiento de diseño inelástico - techo (Dd)	cm	6	10.46	-0.89	0.13	-0.03	0.01	0.00	-0.69	10.50	10.48
Coefficiente de cortante basal (Cs)	g	-	0.05	0.21	0.19	0.19	0.19	0.20	0.15	-	-
Cortante basal (Vbasal)	tonf	-	193.24	117.69	42.20	20.57	8.82	2.32	136.08	231.25	236.35
Desplazamiento de fluencia (Dy)	cm	-	5.59	-	-	-	-	-	-	-	-

3. RESPUESTAS PARA EL INSTANTE DEL MÁXIMO DESPLAZAMIENTO

Parámetro	Unidades	Piso	Modo 1	Modo 2	Modo 3	Modo 4	Modo 5	Modo 6	Modo R	SRRS-RE	SRRS-FLE
Desplazamiento por piso	cm	6	10.46	-0.89	0.13	-0.03	0.01	0.00	-0.69	10.50	10.48
		5	9.67	-0.37	-0.04	0.03	-0.01	0.00	-0.46	9.68	9.68
		4	8.33	0.28	-0.13	0.01	0.01	0.00	-0.08	8.33	8.33
		3	6.45	0.76	-0.04	-0.04	0.00	0.00	0.46	6.49	6.46
		2	4.21	0.82	0.11	0.00	-0.01	0.00	1.10	4.29	4.36
		1	1.83	0.46	0.12	0.04	0.01	0.00	1.79	1.90	2.56
Desplazamiento de entrepiso	cm	6	0.79	-0.52	0.17	-0.06	0.02	0.00	-0.23	0.82	0.80
		5	1.34	-0.65	0.09	0.02	-0.02	0.01	-0.38	1.34	1.35
		4	1.88	-0.48	-0.09	0.05	0.01	-0.01	-0.54	1.84	1.87
		3	2.23	-0.06	-0.15	-0.03	0.01	0.01	-0.64	2.20	2.11
		2	2.38	0.36	-0.01	-0.04	-0.02	-0.01	-0.68	2.40	1.80
		1	1.83	0.46	0.12	0.04	0.01	0.00	1.79	1.90	2.56
Fuerzas laterales por piso	tonf	6	43.40	-72.30	35.78	-19.05	8.19	-2.12	-33.35	93.91	54.73
		5	47.28	-35.88	-15.04	27.67	-19.83	6.51	-26.30	70.10	54.10
		4	40.73	26.50	-44.45	9.17	16.16	-10.01	-4.36	68.35	40.96
		3	31.52	72.58	-12.99	-30.67	1.78	11.12	26.52	85.93	41.19
		2	20.61	78.69	36.47	-1.11	-18.15	-9.68	63.08	90.93	66.37
		1	9.71	48.10	42.43	34.56	20.67	6.50	110.49	76.40	110.92
Fuerza cortante por piso	tonf	6	43.40	-72.30	35.78	-19.05	8.19	-2.12	-33.35	93.91	54.73
		5	90.68	-108.18	20.73	8.62	-11.64	4.38	-59.65	143.42	108.54
		4	131.41	-81.68	-23.71	17.79	4.52	-5.63	-64.01	157.59	146.17
		3	162.93	-9.10	-36.71	-12.88	6.30	5.49	-37.49	167.89	167.19
		2	183.54	69.59	-0.24	-13.99	-11.85	-4.18	25.59	197.13	185.31
		1	193.24	117.69	42.20	20.57	8.82	2.32	136.08	231.25	236.35
Fuerza cortante de resistencia máxima Vy (Instante de máximo desplazamiento)	tonf	6	130.21	-216.91	107.34	-57.14	24.57	-6.37	-100.04	281.76	164.20
		5	272.04	-324.55	62.20	25.86	-34.92	13.15	-178.95	430.24	325.62
		4	394.23	-245.04	-71.14	53.36	13.55	-16.88	-192.03	472.80	438.51
		3	488.78	-27.31	-110.12	-38.64	18.90	16.48	-112.48	503.63	501.56
		2	550.61	208.77	-0.71	-41.96	-35.55	-12.54	76.78	591.41	555.93
		1	579.73	353.07	126.59	61.72	26.45	6.96	408.25	693.75	709.06

4. RESPUESTAS PARA EL INSTANTE DE MÁXIMA VELOCIDAD

Cantidad	Unidades	Piso	Modo 1	Modo 2	Modo 3	Modo 4	Modo 5	Modo 6	Modo R	SRRS-RE	SRRS-FLE
Velocidad relativa de entre piso	cm/s	6	3.23	-9.28	5.74	-3.16	1.32	-0.32	-3.17	11.87	4.52
		5	5.45	-11.74	2.95	1.17	-1.61	0.59	-5.34	13.44	7.63
		4	7.67	-8.67	-3.15	2.51	0.64	-0.75	-7.52	12.24	10.74
		3	9.08	-1.15	-4.96	-1.86	0.89	0.74	-8.90	10.65	12.72
		2	9.69	6.44	-0.27	-2.08	-1.67	-0.56	-9.50	11.91	13.56
		1	7.47	8.36	3.93	2.01	0.85	0.21	24.85	12.09	25.95
Fuerza axial en los disipadores	tonf	6	35.68	-48.51	29.98	-16.52	6.89	-1.68	-16.54	69.60	39.33
		5	46.36	-47.22	11.86	4.69	-6.48	2.36	-21.49	67.72	51.09
		4	54.99	-29.40	-10.70	8.52	2.18	-2.55	-25.49	63.86	60.62
		3	59.84	-3.59	-15.46	-5.81	2.78	2.31	-27.74	62.27	65.96
		2	61.81	19.44	-0.83	-6.29	-5.03	-1.68	-28.65	65.28	68.13
		1	53.52	27.95	13.14	6.73	2.86	0.71	83.09	62.23	98.84
Fuerza horizontal en disipadores	tonf	6	31.92	-43.39	26.82	-14.78	6.17	-1.50	-14.80	62.25	35.18
		5	41.46	-42.23	10.61	4.20	-5.79	2.11	-19.22	60.57	45.70
		4	49.19	-26.29	-9.57	7.62	1.95	-2.28	-22.80	57.11	54.21
		3	53.52	-3.21	-13.82	-5.20	2.49	2.06	-24.81	55.69	59.00
		2	55.28	17.39	-0.74	-5.62	-4.50	-1.51	-25.63	58.39	60.93
		1	46.56	24.32	11.43	5.86	2.48	0.62	72.29	54.14	85.99
Fuerza lateral sísmica por piso (4 disipadores por piso)	tonf	6	127.66	-173.56	107.27	-59.10	24.66	-5.99	-59.18	249.04	140.72
		5	165.84	-168.94	42.44	16.79	-23.18	8.46	-76.88	242.22	182.79
		4	196.74	-105.17	-38.27	30.49	7.80	-9.12	-91.21	228.51	216.86
		3	214.10	-12.83	-55.30	-20.79	9.94	8.25	-99.26	222.71	235.99
		2	221.12	69.56	-2.96	-22.50	-17.99	-6.02	-102.51	233.59	243.73
		1	186.25	97.28	45.74	23.43	9.94	2.49	289.17	216.56	343.96

5. RESPUESTAS PARA EL INSTANTE DE MÁXIMA ACCELERACIÓN

Cantidad	Unidades	Piso	Modo 1	Modo 2	Modo 3	Modo 4	Modo 5	Modo 6	Modo R	SRRS-RE	SRRS-FLE
β_{eff}	-	-	0.29	0.29	0.37	0.38	0.36	0.33	0.44	-	-
Parametro δ	-	-	0.41	0.51	0.67	0.68	0.65	0.58	0.80	-	-
Coefficiente CF1	-	-	0.92	0.87	0.78	0.77	0.80	0.83	0.70	-	-
Producto CF1* μ	-	-	1.72	0.87	0.78	0.77	0.80	0.83	0.70	-	-
CF1 (Desplazamiento)	-	-	1.00	0.87	0.78	0.77	0.80	0.83	0.70	-	-
CF2 (Velocidad)	-	-	0.63	0.49	0.62	0.63	0.61	0.55	0.71	-	-
Fuerzas laterales por piso	tonf	6	210.61	-274.17	150.79	-81.64	34.48	-8.62	-112.26	387.44	238.66
		5	246.27	-176.71	-8.86	74.93	-61.38	20.94	-110.14	318.37	269.78
		4	246.10	17.64	-128.15	40.59	43.31	-30.07	-74.35	284.24	257.09
		3	229.39	183.39	-64.94	-84.44	10.28	32.38	-15.32	312.63	229.90
		2	201.08	239.82	83.74	-16.79	-54.23	-27.53	59.06	328.87	209.58
Fuerza cortante por piso	tonf	6	210.61	-274.17	150.79	-81.64	34.48	-8.62	-112.26	387.44	238.66
		5	456.89	-450.88	141.92	-6.71	-26.90	12.33	-222.40	658.00	508.14
		4	702.99	-433.24	13.78	33.88	16.41	-17.75	-296.75	826.73	763.05
		3	932.38	-249.85	-51.16	-50.56	26.69	14.63	-312.07	968.33	983.22
		2	1133.46	-10.03	32.58	-67.35	-27.54	-12.90	-253.01	1136.30	1161.36
1	1279.89	163.45	160.65	27.81	27.82	4.73	185.49	1300.84	1293.26		

4. Edificio con DFV No lineales ($\alpha=0.5$) con 20% de amortiguamiento.

Se presentan los cuadros resumen para el edificio con DFV No lineales y amortiguamiento del 20%. Los cálculos están realizados para un sismo de diseño $Z=0.45g$ y un tipo de suelo S1.

4.1 Amortiguamiento viscoso para el modo fundamental y superiores.

Amortiguamiento viscoso para el modo 1

T1 (seg)	1.129
----------	-------

Piso	Masa (tonf/g)	C (tonf*s/m)^0.5	# Disp x piso	θ	Cos (θ)	ϕ_1	ϕ_r	4*N	masa* ϕ_1^2	β_{v1}
6	75.1	281	4	26.57	0.89	1.00	0.08	636.865979	75.15	20.00%
5	88.6	281	4	26.57	0.89	0.92	0.13	1396.09098	75.65	
4	88.6	281	4	26.57	0.89	0.80	0.18	2331.00642	56.15	
3	88.6	281	4	26.57	0.89	0.62	0.21	3003.90951	33.62	
2	88.6	281	4	26.57	0.89	0.40	0.23	3309.2527	14.37	
1	95.9	281	4	29.54	0.87	0.18	0.18	2148.66621	2.95	

β_{v1} = Amortiguamiento viscoso para el modo 1 (expresado en porcentaje) 12825.79 257.89

C = Constante de amortiguamiento

θ = Ángulo de inclinación de los disipadores respecto de la horizontal

$$N = (2\pi)^{\alpha} T_1^{2-\alpha} \lambda C_N f^{1+\alpha} D_{techo}^{\alpha-1} \theta_{ri,1}^{1+\alpha}$$

ϕ_1 = Forma modal - modo 1

Amortiguamiento viscoso para el modo 2

T2 (seg)	0.349
----------	-------

Piso	Masa (tonf/g)	C (tonf*s/m)	# Disp x piso	θ	Cos (θ)	ϕ_2	ϕ_r	C*Cos (θ) 2 * ϕ_r^2	masa* ϕ_2^2	β_{v2}
6.00	75.1	802.27517	4.0	26.57	0.89	1.00	0.58	860.4	75.15	32.0%
5.00	88.6	617.59171	4.0	26.57	0.89	0.42	0.73	1059.0	15.70	
4.00	88.6	520.58487	4.0	26.57	0.89	-0.31	0.54	486.9	8.57	
3.00	88.6	478.38449	4.0	26.57	0.89	-0.85	0.07	7.9	64.24	
2.00	88.6	463.19379	4.0	26.57	0.89	-0.92	-0.40	239.4	75.53	
1.00	95.9	527.5729	4.0	29.54	0.87	-0.52	-0.52	434.5	26.07	

β_{v2} = Amortiguamiento viscoso para el modo 2 (expresado en porcentaje) 3088.14 265.26

C = Constante de amortiguamiento

θ = Ángulo de inclinación de los disipadores respecto de la horizontal

ϕ_2 = Forma modal - modo 2

Amortiguamiento viscoso para el modo 3

T3 (seg) 0.186

Piso	Masa (tonf/g)	C (tonf*s/m)	# Disp x piso	θ	Cos (θ)	ϕ_3	ϕ_r	C*Cos (θ) ² * ϕ_r ²	masa* ϕ_3 ²	β_{v3}
6.00	75.1	802.3	4.0	26.6	0.9	1.0	1.4	4725.4	75.1	45.0%
5.00	88.6	617.6	4.0	26.6	0.9	-0.4	0.7	960.8	11.3	
4.00	88.6	520.6	4.0	26.6	0.9	-1.1	-0.7	926.9	98.4	
3.00	88.6	478.4	4.0	26.6	0.9	-0.3	-1.2	2106.0	8.4	
2.00	88.6	463.2	4.0	26.6	0.9	0.9	-0.1	6.2	66.2	
1.00	95.9	527.6	4.0	29.5	0.9	0.9	0.9	1380.7	76.6	

β_{v3} = Amortiguamiento viscoso para el modo 3 (expresado en porcentaje)

10106.11 336.0

C = Constante de amortiguamiento

θ = Ángulo de inclinación de los disipadores respecto de la horizontal

ϕ_3 = Forma modal - modo 3

Amortiguamiento viscoso para el modo 4

T4 (seg) 0.117

Piso	Masa (tonf/g)	C (tonf*s/m)	# Disp x piso	θ	Cos (θ)	ϕ_4	ϕ_r	C*Cos (θ) ² * ϕ_r ²	masa* ϕ_4 ²	β_{v4}
6.00	75.1	802.3	4.0	26.6	0.9	1.0	2.2	12793.2	75.1	45.0%
5.00	88.6	617.6	4.0	26.6	0.9	-1.2	-0.8	1341.6	134.5	
4.00	88.6	520.6	4.0	26.6	0.9	-0.4	-1.8	5246.0	14.8	
3.00	88.6	478.4	4.0	26.6	0.9	1.4	1.3	2654.6	165.3	
2.00	88.6	463.2	4.0	26.6	0.9	0.0	1.5	3210.6	0.2	
1.00	95.9	527.6	4.0	29.5	0.9	-1.4	-1.4	3232.4	194.0	

β_{v4} = Amortiguamiento viscoso para el modo 4 (expresado en porcentaje)

28478.28 584.0

C = Constante de amortiguamiento

θ = Ángulo de inclinación de los disipadores respecto de la horizontal

ϕ_4 = Forma modal - modo 4

Amortiguamiento viscoso para el modo 5

T5 (seg) 0.083

Piso	Masa (tonf/g)	C (tonf*s/m)	# Disp x piso	θ	Cos (θ)	ϕ_5	ϕ_r	C*Cos (θ) ² * ϕ_r ²	masa* ϕ_5 ²	β_{v5}
6.00	75.1	802.3	4.0	26.6	0.9	1.0	3.6	23948.2	75.1	43.0%
5.00	88.6	617.6	4.0	26.6	0.9	-2.6	-6.6	27468.0	373.8	
4.00	88.6	520.6	4.0	26.6	0.9	4.0	8.4	3693.8	248.2	
3.00	88.6	478.4	4.0	26.6	0.9	-4.4	-8.3	6528.6	3.0	
2.00	88.6	463.2	4.0	26.6	0.9	3.9	6.3	22067.7	313.2	
1.00	95.9	527.6	4.0	29.5	0.9	-2.4	-2.4	6251.1	375.1	

β_{v5} = Amortiguamiento viscoso para el modo 5 (expresado en porcentaje)

89957.35 1388.5

C = Constante de amortiguamiento

θ = Ángulo de inclinación de los disipadores respecto de la horizontal

ϕ_5 = Forma modal - modo 5

Amortiguamiento viscoso para el modo 6

T6 (seg) 0.066

Piso	Masa (tonf/g)	C (tonf*s/m)	# Disp x piso	θ	Cos (θ)	ϕ_6	ϕ_r	$C * Cos (\theta)^2 * \phi_r^2$	masa * ϕ_6^2	β_{v6}
6.00	75.1	802.3	4.0	26.6	0.9	1.0	3.6	33269.1	75.1	38.0%
5.00	88.6	617.6	4.0	26.6	0.9	-2.6	-6.6	86079.9	598.7	
4.00	88.6	520.6	4.0	26.6	0.9	4.0	8.4	118780.8	1417.1	
3.00	88.6	478.4	4.0	26.6	0.9	-4.4	-8.3	105732.3	1749.5	
2.00	88.6	463.2	4.0	26.6	0.9	3.9	6.3	58203.4	1324.2	
1.00	95.9	527.6	4.0	29.5	0.9	-2.4	-2.4	9200.6	552.2	

β_{v6} = Amortiguamiento viscoso para el modo 6 (expresado en porcentaje)

411266.06

5716.9

C = Constante de amortiguamiento

θ = Ángulo de inclinación de los disipadores respecto de la horizontal

ϕ_6 = Forma modal - modo 6

Amortiguamiento viscoso para el modo R

TR (seg) 0.4516

Piso	Masa (tonf/g)	C (tonf*s/m)	# Disp x piso	θ	Cos (θ)	ϕ_R	ϕ_r	$C * Cos (\theta)^2 * \phi_r^2$	masa * ϕ_R^2	β_{vR}
6.00	75.1	802.3	4.0	26.6	0.9	1.0	0.3	280.9	75.1	54.0%
5.00	88.6	617.6	4.0	26.6	0.9	0.7	0.6	615.8	39.7	
4.00	88.6	520.6	4.0	26.6	0.9	0.1	0.8	1028.2	1.1	
3.00	88.6	478.4	4.0	26.6	0.9	-0.7	0.9	1325.0	40.3	
2.00	88.6	463.2	4.0	26.6	0.9	-1.6	1.0	1459.7	228.2	
1.00	95.9	527.6	4.0	29.5	0.9	-2.6	-2.6	10777.1	646.8	

β_{vR} = Amortiguamiento viscoso para el modo residual (expresado en porcentaje)

15486.70

1031.2

C = Constante de amortiguamiento

θ = Ángulo de inclinación de los disipadores respecto de la horizontal

ϕ_R = Forma modal - modo R

4.2 Cálculo de respuesta de los procedimientos simplificados.

1. RESPUESTA ELÁSTICA DE LA ESTRUCTURA

Parámetro	Unidades	Piso	Modo 1	Modo 2	Modo 3	Modo 4	Modo 5	Modo 6	Modo R	SRRS-RE	SRRS-FLE
Periodo elástico (Te)	Segundos	-	1.13	0.35	0.19	0.12	0.08	0.07	0.45	-	-
Amortiguamiento Viscoso (β_v)	-	-	0.20	0.32	0.45	0.45	0.43	0.38	0.54	-	-
Amortiguamiento efectivo (β_{v+i})	-	-	0.25	0.37	0.50	0.50	0.48	0.43	0.59	-	-
Coef. de reducción (BE)	-	-	1.67	2.00	2.32	2.35	2.28	2.14	2.58	-	-
Aceleración Espectral Sa(Te,5%)	g	6	0.40	1.13	1.13	1.13	1.13	1.13	1.00	-	-
Desplazamiento elástico - techo	cm	6	9.83	0.79	0.11	0.02	0.00	0.00	0.58	9.86	9.85

2. CORTANTE BASAL Y DESPLAZAMIENTO DEL TECHO

Parámetro	Unidades	Piso	Modo 1	Modo 2	Modo 3	Modo 4	Modo 5	Modo 6	Modo R	SRRS-RE	SRRS-FLE
μ ductilidad	-	-	1.70	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	-	-
μ max	-	-	2.67	-	-	-	-	-	-	-	-
Período efectivo Teff	Segundos	-	1.47	0.35	0.19	0.12	0.08	0.07	0.45	-	-
Amortiguamiento viscoso ($\beta v \mu^{0.5}$)	-	-	0.30	0.32	0.45	0.45	0.43	0.38	0.54	-	-
Factor de ajuste (qh)	-	-	0.50	0.77	1.00	1.00	1.00	1.00	0.59	-	-
Amortiguamiento histerético (βh)	-	-	0.12	-	-	-	-	-	-	-	-
Amortiguamiento efectivo (β_{eff})	-	-	0.47	0.37	0.50	0.50	0.48	0.43	0.59	-	-
Coefficiente de reducción (Bd)	-	-	2.25	2.00	2.32	2.35	2.28	2.14	2.58	-	-
Aceleración Espectral (Sa) Teff (5%)	g	6	0.31	1.13	1.13	1.13	1.13	1.13	1.00	-	-
Desplazamiento elástico reducido (Ds)	cm	6	1.86	-0.26	0.04	0.01	0.00	0.00	-0.19	1.88	1.87
Desplazamiento de diseño inelástico - techo (Dd)	cm	6	9.48	-0.79	0.11	-0.02	0.00	0.00	-0.58	9.51	9.49
Coefficiente de cortante basal (Cs)	g		0.05	0.19	0.16	0.16	0.16	0.17	0.13	-	-
Cortante basal (Vbasal)	tonf		192.54	103.86	36.32	17.68	7.62	2.02	114.98	222.60	224.26
Desplazamiento de fluencia (Dy)	cm		5.57								

3. RESPUESTAS PARA EL INSTANTE DEL MÁXIMO DESPLAZAMIENTO

Parámetro	Unidades	Piso	Modo 1	Modo 2	Modo 3	Modo 4	Modo 5	Modo 6	Modo R	SRRS-RE	SRRS-FLE
Desplazamiento por piso	cm	6	9.48	-0.79	0.11	-0.02	0.00	0.00	-0.58	9.51	9.49
		5	8.76	-0.33	-0.04	0.03	-0.01	0.00	-0.39	8.76	8.77
		4	7.54	0.24	-0.11	0.01	0.01	0.00	-0.06	7.55	7.54
		3	5.84	0.67	-0.03	-0.03	0.00	0.00	0.39	5.88	5.85
		2	3.82	0.73	0.09	0.00	-0.01	0.00	0.93	3.89	3.93
1	1.66	0.41	0.10	0.03	0.01	0.00	1.51	1.72	2.24		
Desplazamiento de entrepiso	cm	6	0.72	-0.45	0.15	-0.05	0.02	0.00	-0.19	0.75	0.73
		5	1.21	-0.58	0.08	0.02	-0.02	0.01	-0.32	1.21	1.22
		4	1.71	-0.42	-0.08	0.04	0.01	-0.01	-0.46	1.67	1.69
		3	2.02	-0.06	-0.13	-0.03	0.01	0.01	-0.54	1.99	1.92
		2	2.16	0.32	-0.01	-0.03	-0.02	-0.01	-0.58	2.17	1.68
1	1.66	0.41	0.10	0.03	0.01	0.00	1.51	1.72	2.24		
Fuerzas laterales por piso	tonf	6	43.24	-63.81	30.80	-16.37	7.07	-1.85	-28.18	84.89	51.61
		5	47.10	-31.66	-12.95	23.77	-17.13	5.68	-22.22	65.22	52.08
		4	40.58	23.39	-38.26	7.88	13.96	-8.73	-3.68	62.50	40.75
		3	31.40	64.05	-11.18	-26.36	1.54	9.70	22.41	76.94	38.58
		2	20.53	69.45	31.40	-0.95	-15.68	-8.44	53.30	80.43	57.12
1	9.67	42.45	36.53	29.70	17.85	5.67	93.36	66.61	93.86		
Fuerza cortante por piso	tonf	6	43.24	-63.81	30.80	-16.37	7.07	-1.85	-28.18	84.89	51.61
		5	90.35	-95.47	17.85	7.41	-10.05	3.82	-50.40	133.25	103.45
		4	130.93	-72.08	-20.41	15.29	3.90	-4.91	-54.08	151.65	141.66
		3	162.33	-8.03	-31.60	-11.07	5.44	4.79	-31.68	166.05	165.39
		2	182.86	61.41	-0.20	-12.02	-10.24	-3.65	21.62	193.54	184.14
1	192.54	103.86	36.32	17.68	7.62	2.02	114.98	222.60	224.26		
Fuerza cortante de resistencia máxima Vy (Instante de máximo desplazamiento)	tonf	6	129.73	-191.42	92.40	-49.10	21.22	-5.56	-84.53	254.69	154.84
		5	271.04	-286.41	53.55	22.22	-30.16	11.47	-151.20	399.72	310.36
		4	392.79	-216.25	-61.24	45.86	11.71	-14.73	-162.25	454.99	424.98
		3	486.99	-24.10	-94.80	-33.21	16.33	14.38	-95.03	498.11	496.18
		2	548.59	184.24	-0.61	-36.06	-30.71	-10.94	64.87	580.62	552.41
1	577.61	311.58	108.97	53.04	22.85	6.07	344.94	667.78	672.77		

4. RESPUESTAS PARA EL INSTANTE DE MÁXIMA VELOCIDAD

Cantidad	Unidades	Piso	Modo 1	Modo 2	Modo 3	Modo 4	Modo 5	Modo 6	Modo R	SRRS-RE	SRRS-FLE
Velocidad relativa de entre piso	cm/s	6	3.07	-8.19	4.94	-2.72	1.14	-0.28	-2.67	10.45	4.07
		5	5.18	-10.36	2.54	1.00	-1.39	0.51	-4.51	12.00	6.87
		4	7.28	-7.65	-2.72	2.16	0.56	-0.66	-6.35	11.10	9.66
		3	8.63	-1.02	-4.27	-1.60	0.77	0.65	-7.52	9.87	11.44
		2	9.20	5.69	-0.24	-1.79	-1.44	-0.49	-8.02	11.04	12.21
		1	7.09	7.38	3.38	1.73	0.74	0.19	21.00	10.95	22.16
Fuerza axial en los disipadores	tonf	6	46.54	-58.78	35.44	-19.49	8.18	-2.01	-19.19	85.56	50.34
		5	60.46	-57.21	14.02	5.54	-7.68	2.83	-24.93	84.95	65.39
		4	71.72	-35.62	-12.64	10.05	2.59	-3.05	-29.57	81.71	77.58
		3	78.05	-4.34	-18.27	-6.86	3.30	2.76	-32.18	80.65	84.42
		2	80.61	23.56	-0.98	-7.42	-5.96	-2.02	-33.24	84.51	87.19
		1	69.80	33.87	15.53	7.94	3.39	0.86	96.39	79.60	119.01
Fuerza horizontal en disipadores	tonf	6	41.62	-52.57	31.69	-17.43	7.31	-1.79	-17.16	76.53	45.02
		5	54.07	-51.17	12.54	4.95	-6.87	2.53	-22.30	75.98	58.49
		4	64.15	-31.86	-11.31	8.99	2.31	-2.73	-26.45	73.08	69.39
		3	69.81	-3.89	-16.34	-6.13	2.95	2.47	-28.78	72.14	75.51
		2	72.10	21.07	-0.87	-6.64	-5.33	-1.80	-29.73	75.59	77.98
		1	60.73	29.47	13.51	6.91	2.95	0.74	83.86	69.25	103.54
Fuerza lateral sísmica por piso (4 disipadores por piso)	tonf	6	166.50	-210.28	126.77	-69.73	29.25	-7.18	-68.65	306.14	180.10
		5	216.29	-204.68	50.16	19.81	-27.48	10.13	-89.18	303.89	233.95
		4	256.59	-127.42	-45.23	35.97	9.25	-10.93	-105.80	292.39	277.55
		3	279.23	-15.54	-65.35	-24.53	11.79	9.88	-115.13	288.50	302.03
		2	288.38	84.28	-3.50	-26.54	-21.33	-7.21	-118.91	302.38	311.94
		1	242.91	117.87	54.05	27.65	11.79	2.98	335.43	277.00	414.15

5. RESPUESTAS PARA EL INSTANTE DE MÁXIMA ACCELERACIÓN

Cantidad	Unidades	Piso	Modo 1	Modo 2	Modo 3	Modo 4	Modo 5	Modo 6	Modo R	SRRS-RE	SRRS-FLE
β_{eff}	-	-	0.35	0.37	0.50	0.50	0.48	0.43	0.59	-	-
Parametro δ	-	-	0.46	0.67	0.89	0.91	0.86	0.77	1.06	-	-
Coefficiente CF1	-	-	0.90	0.78	0.63	0.62	0.65	0.72	0.49	-	-
Producto CF1* μ	-	-	1.52	0.78	0.63	0.62	0.65	0.72	0.49	-	-
CF1 (Desplazamiento)	-	-	1.00	0.78	0.63	0.62	0.65	0.72	0.49	-	-
CF2 (Velocidad)	-	-	0.67	0.62	0.78	0.79	0.76	0.70	0.87	-	-
Fuerzas laterales por piso	tonf	6	240.73	-280.66	156.67	-85.17	36.01	-8.99	-101.22	412.07	261.14
		5	285.49	-201.66	14.51	59.60	-54.38	19.28	-110.39	359.04	306.09
		4	292.79	-24.27	-107.40	42.89	34.36	-26.43	-97.69	317.56	308.66
		3	280.35	140.83	-71.90	-68.08	11.95	27.79	-67.56	329.25	288.37
		2	253.84	215.58	56.57	-22.65	-46.88	-23.22	-25.53	341.76	255.12
		1	190.95	173.02	110.99	76.73	43.91	14.30	429.54	294.19	470.07
Fuerza cortante por piso	tonf	6	240.73	-280.66	156.67	-85.17	36.01	-8.99	-101.22	412.07	261.14
		5	526.22	-482.32	171.18	-25.57	-18.37	10.30	-211.61	734.74	567.17
		4	819.01	-506.58	63.78	17.32	15.99	-16.13	-309.31	965.41	875.47
		3	1099.36	-365.75	-8.12	-50.77	27.94	11.66	-376.87	1160.09	1162.16
		2	1353.20	-150.17	48.45	-73.42	-18.94	-11.55	-402.40	1364.47	1411.77
		1	1544.15	22.85	159.43	3.32	24.97	2.74	27.14	1552.74	1544.39

5. Cálculos para un Sismo Máximo Considerado

A continuación, se muestra el resumen de cálculos para un Sismo Máximo Considerado de $Z=0.675$ g con el fin de diseñar los brazos metálicos de los disipadores. Se considera un amortiguamiento viscoso de 15% y un exponente de velocidad ($\alpha=0.5$).

1. RESPUESTA ELÁSTICA DE LA ESTRUCTURA

Parámetro	Unidades	Piso	Modo 1	Modo 2	Modo 3	Modo 4	Modo 5	Modo 6	Modo R	SRRS-RE	SRRS-FLE
Periodo elástico (Te)	Segundos	-	1.13	0.35	0.19	0.12	0.08	0.07	0.45	-	-
Amortiguamiento Viscoso (β_v)	-	-	0.15	0.24	0.32	0.33	0.31	0.28	0.39	-	-
Amortiguamiento efectivo (β_v+i)	-	-	0.20	0.29	0.37	0.38	0.36	0.33	0.44	-	-
Coef. de reducción (BE)	-	-	1.53	1.76	2.00	2.02	1.97	1.87	2.18	-	-
Aceleración Espectral Sa(Te,5%)	g	6	0.60	1.69	1.69	1.69	1.69	1.69	1.49	-	-
Desplazamiento elástico-techo	cm	6	16.11	1.43	0.20	0.04	0.01	0.00	1.13	16.17	16.15

2. CORTANTE BASAL Y DESPLAZAMIENTO DEL TECHO

Parámetro	Unidades	Piso	Modo 1	Modo 2	Modo 3	Modo 4	Modo 5	Modo 6	Modo R	SRRS-RE	SRRS-FLE
μ ductilidad	-	-	1.87	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	-	-
μ max	-	-	2.67	-	-	-	-	-	-	-	-
Periodo efectivo Teff	Segundos	-	1.54	0.35	0.19	0.12	0.08	0.07	0.45	-	-
Amortiguamiento viscoso ($\beta v^{\mu \cdot 0.5}$)	-	-	0.24	0.24	0.32	0.33	0.31	0.28	0.39	-	-
Factor de ajuste (qh)	-	-	0.50	0.77	1.00	1.00	1.00	1.00	0.59	-	-
Amortiguamiento histerético (Bh)	-	-	0.14	-	-	-	-	-	-	-	-
Amortiguamiento efectivo (β_{eff})	-	-	0.43	0.29	0.37	0.38	0.36	0.33	0.44	-	-
Coefficiente de reducción (Bd)	-	-	2.14	1.76	2.00	2.02	1.97	1.87	2.18	-	-
Aceleración Espectral (Sa) Teff (5%)	g	6	0.44	1.69	1.69	1.69	1.69	1.69	1.49	-	-
Desplazamiento elástico reducido (Ds)	cm	6	2.80	-0.48	0.07	-0.01	0.00	0.00	-0.38	2.84	2.82
Desplazamiento de diseño inelástico - techo (Dd)	cm	6	15.69	-1.43	0.20	-0.04	0.01	0.00	-1.13	15.76	15.73
Coefficiente de cortante basal (Cs)	g	-	0.07	0.34	0.31	0.30	0.31	0.32	0.25	-	-
Cortante basal (Vbasal)	tonf	-	289.87	189.23	68.74	33.55	14.34	3.75	223.81	354.81	366.21
Desplazamiento de fluencia (Dy)	cm	-	8.39	-	-	-	-	-	-	-	-

3. RESPUESTAS PARA EL INSTANTE DEL MÁXIMO DESPLAZAMIENTO

Parámetro	Unidades	Piso	Modo 1	Modo 2	Modo 3	Modo 4	Modo 5	Modo 6	Modo R	SRRS-RE	SRRS-FLE
Desplazamiento por piso	cm	6	15.69	-1.43	0.20	-0.04	0.01	0.00	-1.13	15.76	15.73
		5	14.50	-0.60	-0.07	0.05	-0.02	0.00	-0.76	14.52	14.52
		4	12.49	0.45	-0.21	0.02	0.02	-0.01	-0.13	12.50	12.49
		3	9.67	1.22	-0.06	-0.06	0.00	0.01	0.76	9.75	9.70
		2	6.32	1.32	0.18	0.00	-0.02	-0.01	1.82	6.46	6.58
		1	2.75	0.75	0.19	0.06	0.02	0.00	2.94	2.86	4.03
Desplazamiento de entrepiso	cm	6	1.19	-0.83	0.28	-0.10	0.03	-0.01	-0.37	0.82	0.80
		5	2.01	-1.05	0.14	0.04	-0.03	0.01	-0.63	1.34	1.35
		4	2.83	-0.77	-0.15	0.08	0.01	-0.01	-0.89	1.84	1.87
		3	3.35	-0.10	-0.24	-0.06	0.02	0.01	-1.05	2.20	2.11
		2	3.57	0.58	-0.01	-0.06	-0.04	-0.01	-1.12	2.40	1.80
		1	2.75	0.75	0.19	0.06	0.02	0.00	2.94	1.90	2.56
Fuerzas laterales por piso	tonf	6	65.10	-116.25	58.29	-31.06	13.32	-3.43	-54.84	149.29	85.13
		5	70.91	-57.69	-24.51	45.11	-32.24	10.52	-43.26	109.74	83.07
		4	61.10	42.61	-72.41	14.95	26.27	-16.19	-7.17	108.12	61.52
		3	47.28	116.69	-21.17	-50.01	2.90	17.99	43.61	137.21	64.32
		2	30.91	126.53	59.41	-1.80	-29.52	-15.65	103.75	146.13	108.26
		1	14.56	77.34	69.13	56.36	33.61	10.51	181.72	123.64	182.30
Fuerza cortante por piso	tonf	6	65.10	-116.25	58.29	-31.06	13.32	-3.43	-54.84	149.29	85.13
		5	136.02	-173.94	33.78	14.05	-18.93	7.09	-98.10	224.64	167.70
		4	197.11	-131.33	-38.63	29.01	7.35	-9.10	-105.27	241.83	223.47
		3	244.39	-14.64	-59.80	-21.00	10.25	8.89	-61.66	253.13	252.05
		2	275.30	111.89	-0.38	-22.81	-19.27	-6.76	42.09	298.66	278.50
		1	289.87	189.23	68.74	33.55	14.34	3.75	223.81	354.81	366.21
Fuerza cortante de resistencia máxima Vy (instante de máximo desplazamiento)	tonf	6	195.31	-348.75	174.86	-93.17	39.95	-10.30	-164.53	447.91	255.38
		5	408.06	-521.83	101.34	42.16	-56.78	21.27	-294.30	673.87	503.11
		4	591.34	-393.99	-115.90	87.02	22.04	-27.30	-315.82	725.52	670.40
		3	733.17	-43.91	-179.39	-63.01	30.74	26.67	-184.98	759.34	756.15
		2	825.91	335.67	-1.15	-68.43	-57.81	-20.29	126.27	895.99	835.51
		1	869.60	567.68	206.23	100.65	43.01	11.25	671.43	1064.42	1098.64

4. RESPUESTAS PARA EL INSTANTE DE MÁXIMA VELOCIDAD

Cantidad	Unidades	Piso	Modo 1	Modo 2	Modo 3	Modo 4	Modo 5	Modo 6	Modo R	SRRS-RE	SRRS-FLE
Velocidad relativa de entre piso	cm/s	6	4.84	-14.92	9.35	-5.15	2.15	-0.52	-5.21	19.08	7.11
		5	8.17	-18.87	4.80	1.90	-2.62	0.95	-8.78	21.39	12.00
		4	11.50	-13.94	-5.14	4.10	1.05	-1.22	-12.36	19.22	16.89
		3	13.62	-1.85	-8.08	-3.04	1.45	1.20	-14.64	16.33	20.00
		2	14.53	10.36	-0.45	-3.40	-2.71	-0.90	-15.62	18.35	21.33
		1	11.20	13.44	6.40	3.28	1.39	0.35	40.87	18.98	42.38
Fuerza axial en los disipadores	tonf	6	43.70	-63.69	39.88	-21.99	9.15	-2.21	-22.21	90.12	49.03
		5	56.77	-61.99	15.78	6.25	-8.60	3.12	-28.86	86.21	63.69
		4	67.35	-38.59	-14.23	11.35	2.90	-3.37	-34.24	79.76	75.55
		3	73.29	-4.71	-20.56	-7.74	3.69	3.05	-37.26	76.77	82.22
		2	75.70	25.53	-1.10	-8.37	-6.68	-2.22	-38.48	80.59	84.92
		1	65.55	36.70	17.48	8.97	3.79	0.94	111.58	77.75	129.41
Fuerza horizontal en disipadores	tonf	6	39.09	-56.96	35.67	-19.67	8.19	-1.98	-19.87	80.60	43.85
		5	50.78	-55.45	14.11	5.59	-7.69	2.79	-25.81	77.10	56.96
		4	60.24	-34.52	-12.73	10.15	2.59	-3.01	-30.62	71.34	67.58
		3	65.55	-4.21	-18.39	-6.92	3.30	2.72	-33.32	68.66	73.54
		2	67.70	22.83	-0.98	-7.49	-5.97	-1.99	-34.41	72.08	75.95
		1	57.03	31.93	15.21	7.80	3.30	0.82	97.08	67.64	112.59
Fuerza lateral sísmica por piso (4 disipadores por piso)	tonf	6	156.36	-227.85	142.68	-78.69	32.75	-7.92	-79.48	322.45	175.39
		5	203.11	-221.78	56.45	22.36	-30.77	11.17	-103.24	308.36	227.84
		4	240.96	-138.07	-50.90	40.59	10.36	-12.05	-122.48	285.41	270.30
		3	262.22	-16.84	-73.55	-27.68	13.20	10.90	-133.28	274.59	294.15
		2	270.82	91.32	-3.94	-29.95	-23.89	-7.95	-137.66	288.37	303.79
		1	228.11	127.71	60.84	31.20	13.20	3.28	388.30	270.55	450.35

5.1 Diseño del brazo metálico.

La fuerza axial máxima para los disipadores según los resultados anteriores es de 129.4 tonf, por lo tanto, se procedió a dimensionar la sección del brazo metálico.

Para diseñar el brazo metálico se tiene las siguientes propiedades mecánicas de la sección HSS8.625x.500

$$A = 11.9 \text{ in}^2$$

$$F_y = 46.00 \text{ ksi}$$

$$E = 29\,000 \text{ ksi}$$

$$r = 2.89 \text{ in}$$

Asumiendo una longitud de 1.00 m para el disipador, la longitud del brazo para el disipador del primer nivel será

$$L_{eff} = L - L_{dis} = 7.21 \text{ m} - 1.00 \text{ m} = 6.21 \text{ m} = 244.5 \text{ in}$$

La relación D/t

$D/t = 18.5$ Considerando un valor de 1 para el factor K, se tiene

$$\frac{KL_{eff}}{r} = \frac{1.00 \times 244.5}{2.89} = 84.60$$

$$\frac{0.11E}{F_y} = 69.35$$

Como $\frac{KL_{eff}}{r} > \frac{0.11E}{F_y}$ La sección es no esbelta

Se halló el esfuerzo de Euler como

$$F_e = \frac{\pi^2 \times E}{\left(\frac{KL_{eff}}{r}\right)^2} = 40 \text{ ksi}$$

Como la relación $F_y/F_e = 46/40 = 1.15 < 2.25$ se utiliza la siguiente expresión para hallar el esfuerzo crítico

$$F_{cr} = 0.658 \frac{F_y}{F_e} \cdot F_y = 28.42 \text{ ksi}$$

La resistencia a compresión de la sección sería:

$$\phi P_n = \phi \cdot F_{cr} \cdot A_g = 304.4 \text{ kip} = 137.89 \text{ tonf} > 129.4 \text{ tonf}$$

Con lo cual se verifica que la sección propuesta cumple con la demanda máxima para el disipador del primer nivel.

6. Diseño de vigas y columnas

A continuación, se muestra el diseño de vigas y columnas para el sistema sismorresistente para un sismo de diseño $Z=0.45g$ y un amortiguamiento agregado del $\beta=20\%$.

6.1 Diseño de vigas del sistema sismorresistente

La fuerza cortante dinámica calculada es de 222.6 ton, y utilizando el software ETABS se tiene una fuerza $V=227.9$ ton, la cual se tomará en cuenta para el diseño.

SX/(SRxBd)	Combination	Max		227.8813
SX/(SRxBd)	Combination	Min		-227.8813

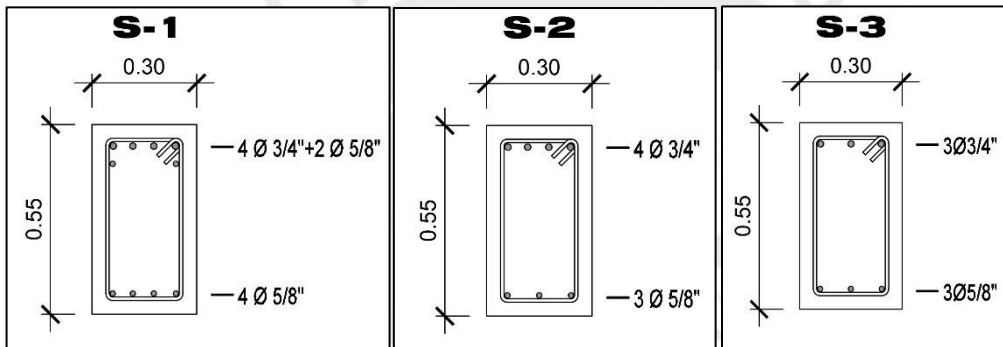
DISEÑO DE VIGAS

As min (cm2) 3.55
 As max (cm2) 23.4 Sección 30x55

PISO	Mu (-) (tonf-m)	a (cm)	As req (cm2)	As coloc (cm2)	Distribución	Sección
6	11.80	5.3	6.7	8.55	3φ3/4"	S3
5	16.00	7.3	9.3	11.4	4φ3/4"	S2
4	18.00	8.3	10.6	11.4	4φ3/4"	
3	19.20	8.9	11.4	15.36	4φ3/4"+2φ5/8"	S1
2	20.14	9.4	12.0	15.36	4φ3/4"+2φ5/8"	
1	19.80	9.3	11.8	15.36	4φ3/4"+2φ5/8"	

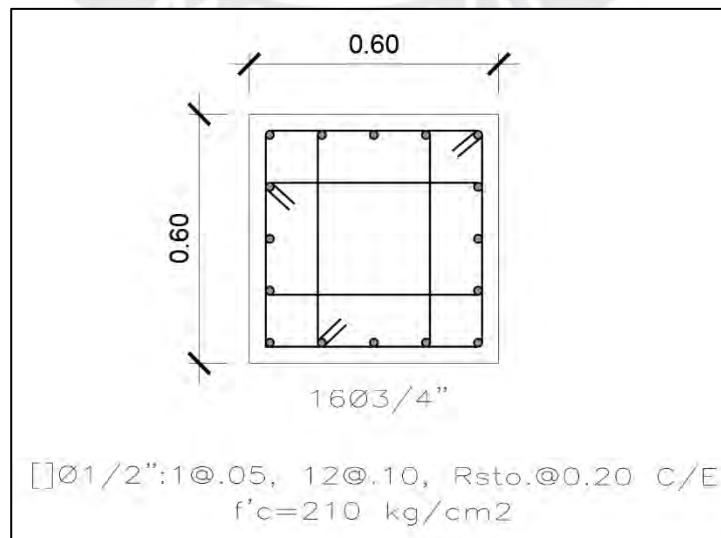
PISO	Mu (+) (tonf-m)	a (cm)	As req (cm2)	As coloc (cm2)	Distribución	Sección
6	7.72	3.4	4.3	6	3φ5/8"	S3
5	9.80	4.3	5.5	6	3φ5/8"	S2
4	9.83	4.4	5.6	6	3φ5/8"	
3	9.83	4.4	5.6	8	4φ5/8"	S1
2	9.83	4.4	5.6	8	4φ5/8"	
1	9.84	4.4	5.6	8	4φ5/8"	

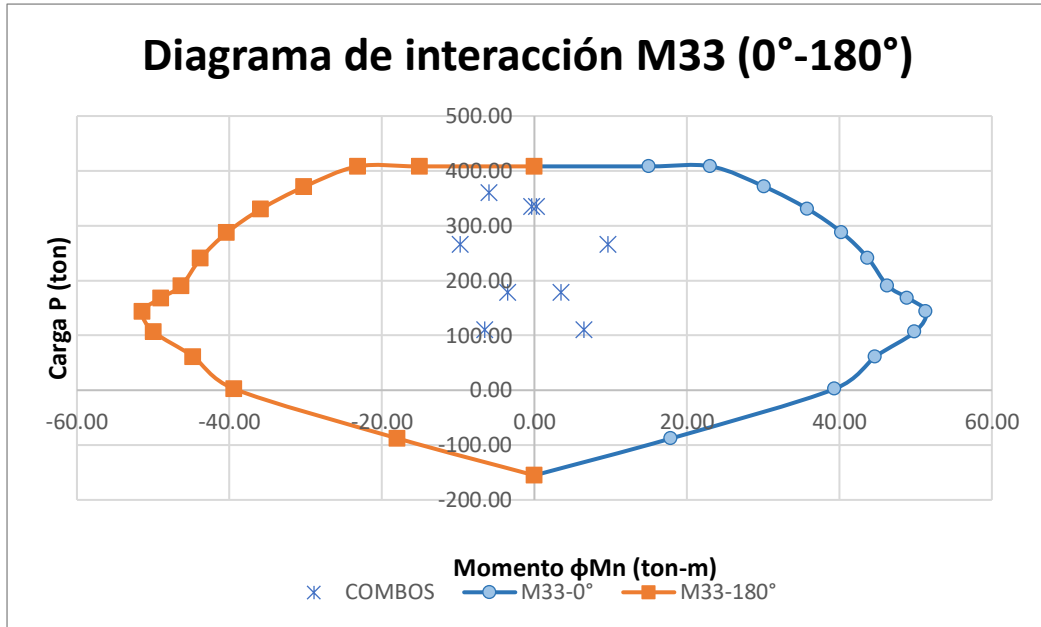
Estribos: □φ3/8":1 @ 5, 12 @ 10, rest @ 20 C/E



6.2 Diseño de columnas del sistema sismorresistente

A continuación, se muestra el armado propuesto para una columna y el diagrama de interacción de φ Mn vs P





7. Factores de combinación CF1 y CF2 para determinar las respuestas para el instante de máxima aceleración.

Esta deducción fue propuesta primeramente por (Tsopeles et. al, 1997), sin embargo, estos factores no funcionaban bien para el caso de una estructura con disipadores no lineales, debido a ello, (Ramirez, et. alm, 2000) los corrigió.

La deducción del cálculo de estos factores, parte del estudio de una estructura lineal con un sistema de disipadores de fluido viscoso no lineales sujeta a una vibración armónica ω_n . El desplazamiento y la velocidad se pueden expresar como:

$$u = u_o \cos(\omega_n t) \tag{a}$$

$$\dot{u} = -\omega_n u_o \text{sen}(\omega_n t) \tag{b}$$

La fuerza de restauración y la de amortiguamiento viene dada por

$$F = Ku + C|\dot{u}|^\alpha \text{sgn}(\dot{u}) \tag{c}$$

donde K es la rigidez del sistema y es igual a $m\omega_n^2$. Reescribiendo la ecuación (c) se tiene

$$\frac{F}{m\omega_n^2 u_o} = \cos(\omega_n t) - \frac{2\pi}{\lambda} \beta_v \text{sen}^\alpha(\omega_n t) \tag{d}$$

Donde el parámetro λ fue definida con la ecuación (2.5) y β_v en la ecuación (2.14). La ecuación (d) se obtuvo de reemplazar (a) y (b) en (c). La máxima aceleración ocurrirá cuando la fuerza de respuesta llegue a su máximo valor para un instante t^* mostrado en la Figura A y este instante de ocurrencia de la máxima aceleración puede ser determinada tomando simplemente la primera derivada respecto al tiempo del término que está a la derecha de la ecuación (d) e igualando a cero.

De esto tenemos

$$\frac{\text{sen}^{2-\alpha}\omega_n t^*}{\text{cos}\omega_n t^*} = -\frac{2\pi\alpha\beta_v}{\lambda} \quad (\text{e})$$

La ecuación (e) no puede ser exactamente resuelta para un tiempo t^* excepto para el caso de un disipador lineal ($\alpha = 1$), sin embargo, se puede llegar a una solución aproximada asumiendo que

$$\omega_n t^* = \pi - \delta \quad (\text{f})$$

En donde, δ es un pequeño desfase que se muestra en la Figura A. La suposición de (f) es buena para valores de α pequeños, por ejemplo $\delta = 0$ cuando $\alpha=0$ y el desfase puede ser calculado como

$$\delta = \left(\frac{2\pi\alpha\beta_v}{\lambda}\right)^{\frac{1}{2-\alpha}} \quad (\text{g})$$

Para disipadores lineales, δ puede calcularse como

$$\delta = \tan^{-1}(2\beta_v) \quad (\text{h})$$

La aceleración máxima se puede determinar sustituyendo (f) y (g) en (d)

$$A_{max} = A(CF1 + \frac{2\pi\beta_v}{\lambda} CF2) \quad (\text{h})$$

De donde

$$CF_1 = \cos(\delta) \quad (\text{i})$$

$$CF_2 = \text{sen}(\delta)^\alpha \quad (i)$$

Los parámetros CF1 y CF2 son factores de combinación de fuerzas usados para calcular la respuesta para el instante de máxima aceleración combinando la respuesta para los instantes de máximo desplazamiento y máxima velocidad.

La ecuación (i) describe la contribución de la fuerza de restauración para la máxima aceleración. Este factor es válido para un comportamiento elástico, sin embargo, para un comportamiento inelástico, este valor se incrementa hasta un valor igual a la unidad. A continuación, se muestran los valores que pueden tomar cada coeficiente.

Si $D < D_y$ $CF_1 = \cos(\delta)$ (9-1)

Si $D > D_y$ $\cos(\delta) \cdot \mu < 1$; $CF_1 = \cos(\delta) \cdot \mu$ (9-2)

Si $D > D_y$ $\cos(\delta) \cdot \mu \geq 1$; $CF_1 = 1$ (9-3)

$$CF_2 = \text{sen}(\delta)^\alpha \quad (9-4)$$

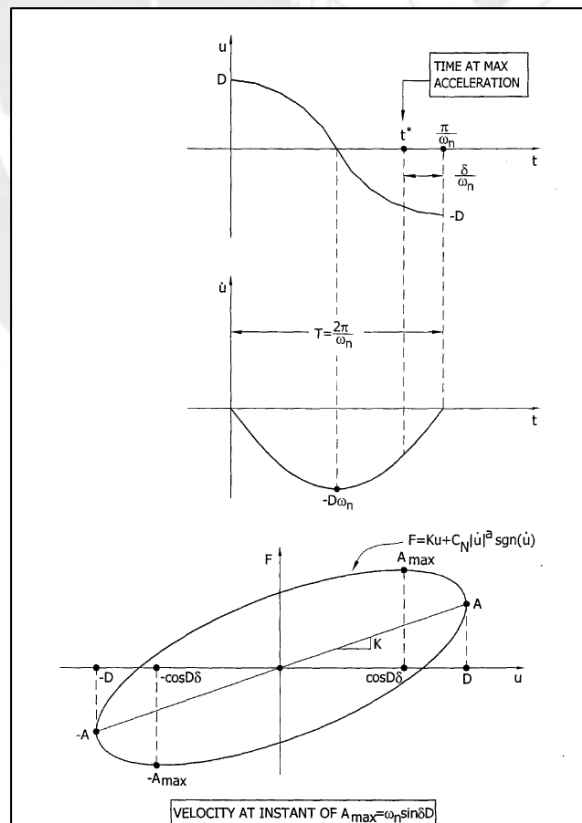


Figura A. Movimiento Armónico de una estructura con disipadores no lineales. Relación fuerza desplazamiento.