

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL



TESIS

**“ANÁLISIS Y COMPARACIÓN DE LA EFECTIVIDAD DE
DISIPADORES FLUIDO VISCOSOS EN FUNCIÓN DE SU
DISPOSICIÓN”**

PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO CIVIL

ELABORADO POR

CARLOS YU-YI ROBLES MENDOZA

ASESOR

MSc. Maribel Burgos Namuche

LIMA- PERÚ

2019

© 2019, Universidad Nacional de Ingeniería. Todos los derechos reservados

“El autor autoriza a la UNI a reproducir la tesis en su totalidad o en parte, con fines estrictamente académicos.”

Carlosrobles14@hotmail.com

992906669

A Dios por haberme dado la fortaleza para continuar cuando estaba por momentos a punto de decaer.

De igual forma lo dedico a mis padres por su incondicional apoyo moral y cariño que siempre me han ofrecido.

Y a mis hermanas por ser una parte importante en mi vida, por sus palabras y compañía.

CARLOS ROBLES

AGRADECIMIENTO

Mi más sincero agradecimiento a la M. Sc. Maribel Burgos Namuche por todo su apoyo para la realización de esta tesis.

A la empresa Córdova Ingenieros SAC. y al Ing. Carlos Alejandro Córdova Rojas y a la empresa por poder darme la oportunidad de aprender de ellos, además por la información brindada sobre disipadores viscosos y el proyecto de reforzamiento estructural del Ministerio de Economía y Finanzas.

ÍNDICE

RESUMEN	4
ABSTRACT	5
PRÓLOGO	6
LISTA DE TABLAS	7
LISTA DE FIGURAS	8
LISTA DE SÍMBOLOS Y SIGLAS	11
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	13
CAPÍTULO 2. FUNDAMENTO TEÓRICO	15
2.1. SISTEMAS DE UN GRADO DE LIBERTAD	15
2.2. USO DE LA SEGUNDA LEY DE MOVIMIENTO DE NEWTON	15
2.3. VIBRACIÓN LIBRE AMORTIGUADA	17
2.3.1. Movimiento Sub-Amortiguado ($\beta < 1$)	17
2.3.2. Movimiento Críticamente Amortiguado ($\beta = 1$)	18
2.3.3. Movimiento sobre – amortiguado ($\beta > 1$)	18
2.4. VIBRACIÓN FORZADA AMORTIGUADA	19
2.4.1. Movimiento sinusoidal	19
2.4.2. Movimiento sísmico	21
2.4.3. Sistema de 1 GDL con disipadores fluido viscosos	22
2.4.4. Balance de Energía	24
CAPÍTULO 3. SISTEMAS MODERNOS DE PROTECCIÓN SÍSMICA	26
3.1. SISTEMAS DE CONTROL ACTIVOS	26
3.2. SISTEMAS DE CONTROL HÍBRIDOS	27
3.3. SISTEMAS DE CONTROL SEMIACTIVOS	28
3.4. SISTEMAS DE CONTROL PASIVOS	29
3.4.1. Aisladores de base:	29
3.4.2. Sistemas inerciales acoplados	32
3.4.3. Disipadores de energía	33
CAPÍTULO 4. DISIPADORES DE ENERGÍA DE FLUIDO VISCOSO	39
4.1. FILOSOFÍA SISMORRESISTENTE ACTUAL	39
4.2. FILOSOFÍA SISMORRESISTENTE CON DISIPADORES DE ENERGÍA	40

4.3. FUNCIONAMIENTO DE LOS DISIPADORES FLUIDO VISCOSOS	42
4.4. RESPUESTA DEL DISIPADOR DE ENERGÍA FLUIDO VISCOSO	42
4.5. FACTOR DE AMPLIFICACIÓN.....	45
4.6. DISPOSICIÓN Y CRITERIOS DE UBICACIÓN	45
4.6.1. Disposición diagonal	46
4.6.2. Disposición Chevron	46
4.6.3. Disposición Toggle Brace	47
4.6.4. Disposición horizontal junto con aisladores de base	49
4.7. EFECTO DEL DISIPADOR DE FLUIDO VISCOSO SOBRE EL ESPECTRO DE RESPUESTA.....	51
4.8. RESPUESTA DE EDIFICIOS CON DISIPADORES FLUIDO VISCOSOS	52
4.8.1. Disipadores de fluido viscoso lineales.....	53
4.8.2. Disipadores de fluido viscoso no lineales.....	57
4.9. RECOMENDACIONES DEL USO DE LOS DISIPADORES DE FLUIDO VISCOSO EN EDIFICACIONES	59
CAPÍTULO 5. METODOLOGÍA DE DISEÑO	62
5.1. CÓDIGOS APLICABLES	62
5.2. DISTORSIÓN DE ENTREPISO	62
5.3. REDUCCIÓN DE LA RESPUESTA.....	62
5.4. METODOLOGÍA GENERAL DE DISEÑO.....	64
5.4.1. Análisis Tiempo – Historia de la edificación sin disipadores de energía	64
5.4.2. Distorsión objetivo.....	65
5.4.3. Determinación de los parámetros de los disipadores	65
5.4.4. Análisis Tiempo – Historia con disipadores (FNA).	66
5.4.5. Respuesta de la estructura con sistema de amortiguamiento.	68
5.4.6. Diseño estructural.....	69
5.4.7. Esquema de la metodología	73
CAPÍTULO 6. EVALUACIÓN DE LA EFECTIVIDAD DE LOS DISIPADORES FLUIDO VISCOSOS.....	74
6.1. DESCRIPCIÓN DE LA ESTRUCTURA.....	74

6.2. ANÁLISIS DEL EDIFICIO SIN DISIPADORES	75
6.2.1. Análisis Modal espectral.	75
6.2.2. Análisis Tiempo - Historia.	77
6.3. ANÁLISIS DEL EDIFICIO CON DISIPADORES	78
6.3.1. Análisis para un mismo nivel de daño	79
6.3.2. Para un mismo coeficiente de amortiguamiento.....	90
CAPÍTULO 7. APLICACIÓN DE LA DISPOSICIÓN UPPER TOGGLE BRACE	95
7.1. EVALUACIÓN EDIFICIO UNIVERSAL	95
7.1.1. Ubicación	95
7.1.2. Recopilación de información	96
7.1.3. Análisis estructural.....	98
7.1.4. Análisis del Edificio Universal sin disipadores.	99
7.1.5. Análisis del Edificio Universal con disipadores.....	107
7.1.6. Comparación con disposición Chevron	125
CONCLUSIONES.....	129
RECOMENDACIONES.....	131
BIBLIOGRAFÍA.....	132

RESUMEN

En la presente tesis, se busca comparar diversos tipos de disposición para la instalación de disipadores viscosos, para así hallar la disposición más efectiva. Dicha efectividad se mide en base al control de Distorsiones de la estructura, coeficientes de amortiguamiento, exponentes de velocidad, fuerzas en los dispositivos y cantidad de estos.

Para ello se ha evaluado las disposiciones Diagonal, Chevron con 01 y 02 dispositivos y Toggle Brace en sus configuraciones Lower y Upper en una edificación aporticada de cuatro niveles, ubicado en la costa peruana, apoyado sobre un suelo gravoso y destinado para oficinas.

Primero se colocó la disposición diagonal y se estableció como base una distorsión menor a la reglamentaria; se llevaron todas las disposiciones a dicha distorsión y se compararon las respuestas.

Como segunda prueba se consideraron los mismos coeficientes de amortiguamiento C y exponentes de velocidad α , para todas las disposiciones y se compararon las respuestas.

Con base en las respuestas obtenidas para cada disposición, se logró determinar que la disposición Toggle Brace Upper es la más eficiente.

Finalmente se ha aplicado dicha disposición al reforzamiento del edificio Universal del Ministerio de Economía y Finanzas el cual ha sido reforzado en las oficinas de Córdova Ingenieros S.A.C con una disposición Chevron Doble; dicho reforzamiento se ha comparado con los resultados obtenidos en cuanto a la respuesta estructural, cantidad de dispositivos, coeficientes de amortiguamiento, amortiguamiento añadido, fuerza en el dispositivo y porcentaje de participación en la disipación de energía, obteniéndose una vez más mejores resultados para la disposición Toggle Brace Upper.

ABSTRACT

The following thesis seeks to compare different types of layout for the installation of viscous heat sinks, and so finding which one is the most effective. The effectiveness is measured based on the drift monitoring of the structure, damping coefficients, exponents speed, forces in devices and quantity of these.

For this, we have evaluated the Diagonal layout, Chevron, with 01 and 02 devices and Toggle Brace in their Lower and Upper settings on a four-level portal frame building, located in the Peruvian coast, supported on a floor burdensome and designed for offices.

Firstly, it was placed at the diagonal disposition and a distortion less than the regulatory one was established as a base; all the dispositions were taken to this distortion and answers were compared.

As a second test, the same damping coefficients C and exponents of α -speed were considered and tested to all the layouts and the responses were compared.

Based on the responses obtained for each layout, it was determined that the Toggle Brace Upper is actually the most efficient.

Finally, this layout has been applied to reinforce the Universal building of the Ministry of Economy and Finance which has been reinforced in the offices of Cordova Engineers S.A.C with Double Chevron layout; that reinforcement has been compared in terms of the structural response, number of devices, damping coefficients, added damping, device strength, and percentage share of energy dissipation, resulting once again better results for Toggle Upper Brace layout.

PRÓLOGO

En los últimos sismos ocurridos alrededor del mundo ha quedado en evidencia que se espera algo más que solo evitar el colapso de las estructuras, esto corresponde a disminuir los daños en las estructuras y proteger el contenido de la propiedad.

Una alternativa para afrontar esta problemática, es el uso de disipadores de fluido viscoso, por ello, la presente tesis muestra las ventajas de estos dispositivos, sus diversas formas de disposición y la efectividad de cada disposición en el control de la respuesta en las edificaciones.

Esta tesis presenta el tema “Análisis y comparación de la efectividad de disipadores fluido viscosos en función de su disposición”. El objetivo es mostrar al lector la metodología de uso y aplicación de estos dispositivos, así como también dar a conocer las diversas alternativas de instalación como son la disposición Diagonal, Chevron, Chevron Doble, Upper Toggle Brace, Lower Toggle Brace, las cuales son evaluadas a fin de determinar la configuración más eficiente en términos de la modificación de la respuesta sísmica (desplazamientos, distorsión de entrepiso, amortiguamiento adicional obtenido, fuerzas en los disipadores, etc.).

M Sc. Ing. Maribel Burgos Namuche

LISTA DE TABLAS

Tabla N° 3.1 Resumen de dispositivos de disipación de energía pasivos	38
Tabla N° 4.1 Valores del Parámetro Lambda	58
Tabla N° 5.1 Límites para la distorsión de entrepiso	62
Tabla N° 5.2 Factor de reducción de la respuesta sísmica	64
Tabla N° 6.1 Características del edificio considerado.....	74
Tabla N° 6.2 Parámetros sísmicos del edificio considerado.....	76
Tabla N° 6.3 Distorsiones resultantes del análisis sin disipadores.....	76
Tabla N° 6.4 Distorsiones obtenidas del análisis tiempo-historia en X-X.....	78
Tabla N° 6.5 Distorsiones obtenidas del análisis tiempo-historia en Y-Y.....	78
Tabla N° 6.6 Distorsiones y amortiguamiento obtenidas del análisis	82
Tabla N° 6.7 Parámetros geométricos principales considerados.	83
Tabla N° 7.1 Parámetros sísmicos utilizados.....	103
Tabla N° 7.2 Máximas distorsiones en la dirección X – X	106
Tabla N° 7.3 Máximas distorsiones en la dirección Y – Y	106
Tabla N° 7.4 Máximas distorsiones en la dirección X – X	107
Tabla N° 7.5 Máximas distorsiones en la dirección Y – Y	107
Tabla N° 7.6 Parámetros Geométricos considerados.....	108
Tabla N° 7.7 Distorsiones máximas en la dirección X – X.....	116
Tabla N° 7.8 Distorsiones máximas en la dirección Y – Y.....	116
Tabla N° 7.9 Comparación de reducción de distorsiones (X-X)	118
Tabla N° 7.10 Comparación de reducción de distorsiones (Y-Y)	118
Tabla N° 7.11 Fuerza en los dispositivos en la dirección X-X.	124
Tabla N° 7.12 Resumen de dispositivos en la dirección X – X.....	124
Tabla N° 7.13 Fuerza en los dispositivos en la dirección Y – Y.	125
Tabla N° 7.14 Resumen de dispositivos en la dirección Y – Y.....	125
Tabla N° 7.15 Disipadores disposición Chevron Doble dirección X-X	127
Tabla N° 7.16 Disipadores disposición Chevron Doble dirección Y-Y	127
Tabla N° 7.17 Resumen de dispositivos Chevron doble.....	128
Tabla N° 7.18 Resumen de dispositivos Upper Toggle	128

LISTA DE FIGURAS

Figura N° 2.1 Sistema de un grado de libertad	15
Figura N° 2.2 Fuerzas actuantes en un instante de tiempo.....	16
Figura N° 2.3 Efectos del amortiguamiento en la vibración libre	17
Figura N° 2.4 Vibración Libre Sistemas 1GDL.....	19
Figura N° 2.5 FAD para carga sinusoidal	21
Figura N° 2.6 Espectro de aceleración absoluta. Sismo Lima 1974	22
Figura N° 2.7 Sistema de 1 GDL con disipador de fluido viscoso	23
Figura N° 2.8 Idealización de un sistema de 1GDL.....	23
Figura N° 2.9 Ciclo de Histéresis en un sistema estructural	25
Figura N° 2.10 Balance de energía.	25
Figura N° 3.1 Sistemas de control estructural ante sismos	26
Figura N° 3.2 Sistema con control activo	27
Figura N° 3.3 Esquema Estructurado con sistema de control activo	27
Figura N° 3.4 Sistema con control Híbrido	28
Figura N° 3.5 Esquema de un sistema de control Híbrido	28
Figura N° 3.6 Sistema con control Semiactivo	28
Figura N° 3.7 Esquema Estructurado con sistema de control semiactivo	29
Figura N° 3.8 Reducción de la demanda sísmica por medio de aisladores	30
Figura N° 3.9 Técnica de aislamiento sísmico en la base	30
Figura N° 3.10 Aislador elastomérico con núcleo de plomo	31
Figura N° 3.11 Aislador péndulo friccionante triple	31
Figura N° 3.12 Esquema de sistemas inerciales acoplados.....	32
Figura N° 3.13 Comparación de edificio sin disipadores y con disipadores	33
Figura N° 3.14 Disipador metálico tipo ADAS	34
Figura N° 3.15 Dispositivo de amortiguamiento por fricción tipo Pall	34
Figura N° 3.16 Dispositivos de disipación fluido viscosos Taylor	36
Figura N° 3.17 Disipador sólido viscoelástico	37
Figura N° 4.1 Cortante de diseño reducido	39
Figura N° 4.2 Distribución de la energía sísmica en una edificación	40
Figura N° 4.3 Analogía hidráulica para explicar los criterios de diseño	41
Figura N° 4.4 Reducción del espectro por un aumento en el amortiguamiento	41
Figura N° 4.5 Disipador Fluido Viscoso.....	42
Figura N° 4.6 Comportamiento de un disipador viscoso.....	43
Figura N° 4.7 Desfase entre el desplazamiento y la velocidad	43
Figura N° 4.8 Lazo histerético en disipadores viscosos	44
Figura N° 4.9 Relación Fuerza – Velocidad en disipadores viscosos	45
Figura N° 4.10 Disipadores instalados en disposición diagonal	46
Figura N° 4.11 Disipadores instalados en disposición Chevron	47
Figura N° 4.12 Instalación del sistema Toggle Brace	48
Figura N° 4.13 Disipadores instalados en disposición Upper y Lower Togle.....	49
Figura N° 4.14 Instalación de disipador en disposición Lower Toggle	49
Figura N° 4.15 Disipadores instalados en la base de un edificio.....	49
Figura N° 4.16 Diversas disposiciones de disipadores viscosos.....	50
Figura N° 4.17 Espectro de desplazamiento para un incremento de β	51
Figura N° 4.18 Espectro de desplazamiento para un incremento de β	52
Figura N° 4.19 Pórtico de varios grados de libertad con disipadores viscosos..	55
Figura N° 4.21 Pórtico con disipadores escondidos en drywall	60
Figura N° 5.1 Representación esquemática de un análisis tiempo-historia	68
Figura N° 5.2 Vibración libre amortiguada. Amplitudes sucesivas	69
Figura N° 5.3 Reducción del espectro según ASCE 7-10	70

Figura N° 5.4 Propiedades de los disipadores	71
Figura N° 5.5 Propiedades de los disipadores	72
Figura N° 5.6 Esquema de la metodología de diseño con disipadores	73
Figura N° 6.1 Vista tridimensional del modelo matemático del edificio	75
Figura N° 6.2 Vista de la planta típica del modelo considerado	75
Figura N° 6.3 Espectro de diseño de acuerdo a la norma E-030	76
Figura N° 6.4 Registro de aceleraciones – Sismo 1995 Japón Kobe.....	77
Figura N° 6.5 Registro de aceleraciones – Sismo 2001 Arequipa-Moquegua ...	77
Figura N° 6.6 Registro de aceleraciones – Sismo 2007 Pisco PCN	77
Figura N° 6.7 Vista tridimensional de la disposición diagonal	79
Figura N° 6.8 Ubicación de disipadores diagonales	80
Figura N° 6.9 Gráfica con los valores de amplificación “f”	83
Figura N° 6.10 Vista tridimensional de la disposición Chevron simple.....	84
Figura N° 6.11 Ubicación de disipadores en arreglo chevron simple	84
Figura N° 6.12 Vista tridimensional de la disposición Chevron Doble.....	84
Figura N° 6.13 Ubicación de disipadores en arreglo chevron doble	85
Figura N° 6.14 Vista tridimensional de la disposición Toggle Brace Upper 1	85
Figura N° 6.15 Ubicación de disipadores en arreglo Toggle Brace Upper 1.....	85
Figura N° 6.16 Vista tridimensional de la disposición Toggle Brace Upper 2	86
Figura N° 6.17 Ubicación de disipadores en arreglo Toggle Brace Upper 2.....	86
Figura N° 6.18 Vista tridimensional de la disposición Toggle Brace Lower 1	86
Figura N° 6.19 Ubicación de disipadores en arreglo Toggle Brace Lower 1.....	87
Figura N° 6.20 Vista tridimensional de la disposición Toggle Brace Lower 2	87
Figura N° 6.21 Ubicación de disipadores en arreglo Toggle Brace Lower 2.....	87
Figura N° 6.22 Valores del factor de amortiguamiento	88
Figura N° 6.23 Fuerza máxima en el disipador en función de su disposición	89
Figura N° 6.24 Porcentaje de disipación de energía	89
Figura N° 6.25 Amortiguamiento viscoso en función de su disposición	90
Figura N° 6.26 Distorsión en la dirección X – X para un mismo valor de C	91
Figura N° 6.27 Distorsión en la dirección Y – Y para un mismo valor de C	91
Figura N° 6.28 Máxima Distorsión para un mismo valor de C	92
Figura N° 6.29 Fuerza máxima para un mismo valor de C.....	92
Figura N° 6.30 Amortiguamiento viscoso para un mismo valor de C	93
Figura N° 6.31 Porcentaje de disipación de energía para un mismo valor de C	93
Figura N° 7.1 Vista Satelital de la ubicación del Edificio Universal	96
Figura N° 7.2 Fotografías Edificio Universal	96
Figura N° 7.3 Levantamiento de información	97
Figura N° 7.4 Presencia de grietas en conexión de muros de albañilería	97
Figura N° 7.5 Escaneo del acero de refuerzo en el edificio Universal	98
Figura N° 7.6 Vista frontal del modelo matemático tridimensional	100
Figura N° 7.7 Vista lateral del modelo matemático tridimensional	100
Figura N° 7.8 Planta estructural Sótano.....	100
Figura N° 7.9 Planta estructural Mezanine.....	101
Figura N° 7.10 Planta estructural 1er. Piso	101
Figura N° 7.11 Planta estructural típica del 2do. y 3er. Piso	101
Figura N° 7.12 Planta estructural típica del 4to. al 8vo. Piso.....	102
Figura N° 7.13 Espectro de diseño de acuerdo a la norma E-030	104
Figura N° 7.14 Registro de aceleraciones – Sismo 1995 Japón Kobe	104
Figura N° 7.15 Registro de aceleraciones – Sismo 2001 Arequipa-Moquegua	104
Figura N° 7.16 Registro de aceleraciones – Sismo 2007 Pisco PCN	105
Figura N° 7.17 Forma de modo 1	105
Figura N° 7.18 Forma de modo 2	105
Figura N° 7.19 Forma de modo 3	106

Figura N° 7.20 Ubicación de los disipadores en el Edificio Universal	109
Figura N° 7.21 Ubicación de disipadores en el EJE 1	109
Figura N° 7.22 Ubicación de disipadores en el EJE 2	110
Figura N° 7.23 Ubicación de disipadores en el EJE 4	110
Figura N° 7.24 Ubicación de disipadores en el EJE A.....	111
Figura N° 7.25 Ubicación de disipadores en el EJE G.....	111
Figura N° 7.26 Vista tridimensional del modelo matemático	112
Figura N° 7.27 Historia de desplazamientos en la dirección X-X.	115
Figura N° 7.28 Historia de desplazamientos en la dirección Y-Y.	116
Figura N° 7.29 Comparación de Distorsiones X-X.....	117
Figura N° 7.30 Comparación de Distorsiones Y-Y	117
Figura N° 7.31 Función pulso	119
Figura N° 7.32 Decremento del desplazamiento en X-X	119
Figura N° 7.33 Decremento del desplazamiento en Y-Y	120
Figura N° 7.34 Balance de energía para el edificio Universal	122
Figura N° 7.35 Lazo histerético en la dirección X-X.....	122
Figura N° 7.36 Lazo histerético en la dirección Y-Y.....	123
Figura N° 7.37 Modelo Matemático del reforzamiento.....	125
Figura N° 7.38 Comparación: distorsiones en X-X	126
Figura N° 7.39 Comparación: distorsiones en Y-Y	126
Figura N° 7.40 Comparación de fuerzas máximas	127
Figura N° 7.41 Comparación del amortiguamiento viscoso.....	127

LISTA DE SÍMBOLOS Y SIGLAS

A	Amplitud, área de la sección transversal
α	Exponente de velocidad
β	Fracción de amortiguamiento
β_d	Fracción de amortiguamiento viscoso
β_{ef}	Fracción de amortiguamiento efectiva
β_o	Fracción de amortiguamiento inherente
C	Coefficiente de amortiguamiento
C_{cr}	Coefficiente de amortiguamiento crítico
DFV	Disipador fluido viscoso
E	Energía
E_h	Energía histerética
E_D	Energía viscosa
E_k	Energía cinética
E_s	Energía elástica
E	Módulo de elasticidad del material
FAD	Factor de amplificación dinámica
F_D	Fuerza en el disipador
f_D	Fuerza de amortiguamiento
f_I	Fuerza inercial
f_s	Fuerza restauradora o elástica
GDL	Grado de libertad
k	Rigidez
L	Longitud del brazo
LTB	Lower Toggle Brace
m	Masa
p_0	Fuerza externa
$p(t)$	Fuerza externa dependiente del tiempo
t	Tiempo
t_0	Instante de tiempo al inicio del movimiento
u_0	Posición de referencia al inicio del movimiento
u_p	Desplazamiento debido a la solución permanente
\dot{u}_0	Velocidad al inicio del movimiento
$\ddot{u}_g(t)$	Aceleración del terreno
$\dot{u}(t)$	Velocidad
$\ddot{u}(t)$	Aceleración
$u(t)$	Desplazamiento dependiente del tiempo
UTB	Upper Toggle Brace
V	Cortante en la base
V_{min}	Cortante mínima en la base
W_j	Energía disipada por un disipador
W_k	Energía de deformación elástica
ω	Frecuencia natural de vibración
ω'_D	Frecuencia natural sobre amortiguada
ω_D	Frecuencia natural amortiguada
y	Desplazamiento relativo
$\dot{y}(t)$	Velocidad relativa
$\ddot{y}(t)$	Aceleración relativa
Φ_1	Primera forma de modo del sistema

θ_j	Es el ángulo de inclinación del amortiguador j
ϕ_i	Es el desplazamiento de la primera forma de modo del entrepiso i
ϕ_{rj}	Desplazamiento relativo horizontal en el amortiguador j correspondiente a la primera forma de modo
Γ	Función Gamma
λ	Parámetro lambda
Ω	Frecuencia natural de la fuerza externa

CAPITULO I. INTRODUCCIÓN

El Perú es un país altamente sísmico, debido a la interacción de las placas tectónicas de Nazca y Sudamericana. Estos movimientos amenazan las construcciones, las cuales van aumentando día a día en el país; por tanto la seguridad estructural es muy importante no solo para edificaciones nuevas sino también para las más antiguas, que en muchos casos son consideradas monumentos históricos. Los sistemas de disipación de energía tales como los aisladores y disipadores de energía son usados para este fin, en donde las vibraciones son controladas, logrando de este modo aumentar el nivel de desempeño de las estructuras.

En nuestro medio se realiza la concepción de estructuras nuevas y reforzamiento de estructuras usando métodos y tecnologías tradicionales; sin embargo existen tecnologías modernas como son los disipadores de fluido viscoso, los cuales se vienen introduciendo en nuestro medio, por lo cual es importante conocer sus bondades y desventajas, para que de este modo no solo logremos optimizar, sino también garantizar un buen comportamiento de nuestras estructuras las cuales son importantes para el desarrollo del país.

Los disipadores Fluido – Viscosos son tecnologías que vienen siendo usadas desde 1968 en la industria militar y aeronáutica. El uso de disipadores fluido viscoso para la disipación de energía sísmica sobre estructuras netamente de ingeniería civil empezó en 1993 como alternativa para el control de vibraciones y reducción de distorsiones en edificaciones sometidas a acciones de sismo y viento. En la actualidad alrededor del mundo se están usando con éxito en más de 2000 edificios; mientras que en el Perú se ha hecho uso de esta tecnología para el reforzamiento de la Torre del Aeropuerto Jorge Chávez, el diseño y construcción del edificio Reducto de 16 pisos en Miraflores, la nueva sede del Banco de la Nación, y el edificio República de Panamá en Surquillo.

Hoy en día en el país, estos sistemas son costosos; sin embargo, esto se ve compensado al evitar rigidizar las estructuras, lo cual se traduce en mayores espacios arquitectónicos, reducción de tiempos de construcción y en el caso de reforzamiento se logra además evitar procesos constructivos difíciles que conlleven a paralizar el funcionamiento de toda o gran parte de la edificación.

Actualmente se vienen usando los disipadores de fluido viscoso tanto en edificaciones nuevas como en reforzamientos en las cuales se vienen usando disposiciones diagonales y Chevron. Sin embargo, existen más formas de instalarlas en la estructuras como es la disposición Toggle Brace, que funciona de manera más efectiva que las disposiciones antes mencionadas.

Por tanto, se busca verificar que con el uso de estas configuraciones alternativas es posible mejorar aún más la respuesta de las estructuras logrando no solo reducir las distorsiones sino tal vez reduciendo el número de dispositivos instalados y por ende reducir el costo que implica hacer uso de estas tecnologías.

En el Capítulo I, se realiza una revisión de la dinámica estructural en sistemas de un grado de libertad, en el cual se ve la vibración libre amortiguada y forzada amortiguada, movimiento en la base y el balance de energía.

En el Capítulo II, se hace una revisión del estado del arte de los sistemas modernos de protección sísmica, se revisan los sistemas de control activos, híbridos, semiactivos y pasivos en los que se revisan sus características y funcionamiento.

En el Capítulo III, se describe la filosofía, comportamiento y respuesta de los amortiguadores fluido viscoso, las ecuaciones que gobiernan el comportamiento del dispositivo. Así mismo, se hace una revisión de las diferentes disposiciones de estos sistemas para su instalación, además del efecto de estos dispositivos sobre el espectro de respuesta y sus recomendaciones para el uso de estos en edificaciones.

En el Capítulo IV, se muestra la metodología general de diseño, los códigos aplicables, análisis tiempo-historia, determinación de parámetros de los disipadores viscosos y diseño estructural.

En el Capítulo V, se evalúa la efectividad de los disipadores viscosos en función de su disposición, se verifican los coeficientes de amortiguamiento, amortiguamiento añadido, cargas en los dispositivos y balance de energía.

En el Capítulo VI, se aplica la disposición más efectiva, a un proyecto de reforzamiento, que en este caso es el edificio Universal del Ministerio de Economía y Finanzas (MEF).

CAPITULO II. FUNDAMENTO TEÓRICO

2.1. SISTEMAS DE UN GRADO DE LIBERTAD

Según Chopra (2012), “*El número de desplazamientos independientes requeridos para definir las posiciones desplazadas de todas las masas en relación con su posición original, se denomina número de grados de libertad para el análisis dinámico.*”

Para empezar con el estudio de los sistemas de un grado de libertad, partiremos del esquema considerado en la Figura N°2.1, en donde se considera el modelo idealizado de un pórtico plano restringido que puede moverse sólo en la dirección de la excitación (sistema de un grado de libertad), cuya masa m se concentra en el nivel del techo, el marco sin masa proporciona rigidez lateral K al sistema, y un amortiguador viscoso con un coeficiente de amortiguamiento C que añade amortiguamiento al sistema, y se supone que la viga y las columnas son axialmente indeformables.

Vale indicar que el amortiguamiento se define como la capacidad de un sistema o un cuerpo para disipar energía cinética en otro tipo de energía. Típicamente los disipadores viscosos disipan la energía cinética en energía térmica y/o energía plástica.

En ambos casos Fig. 2.1 (a) y (b), u indica el desplazamiento relativo entre la masa y la base de la estructura.

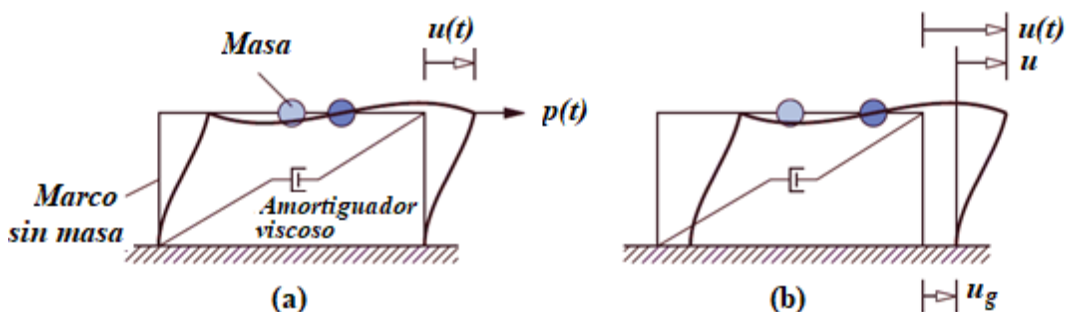


Figura N° 2.1 Sistema de un grado de libertad. (a) Fuerza externa aplicada. (b) Movimiento del terreno inducido por sismo. (Chopra 2012)

2.2. USO DE LA SEGUNDA LEY DE MOVIMIENTO DE NEWTON

En la Figura N°2.2, se observan las fuerzas que actúan en un cierto instante de tiempo: la fuerza externa $p(t)$, la fuerza restauradora (elástica o inelástica) f_s , la

fuerza de amortiguamiento f_D y la fuerza inercial f_I . Considerando que la fuerza externa, el desplazamiento $u(t)$, la velocidad $\dot{u}(t)$ y la aceleración $\ddot{u}(t)$ son positivos en el sentido del eje X, las fuerzas elásticas y de amortiguamiento actúan en dirección contraria dado que éstas se oponen a la deformación y a la velocidad respectivamente.

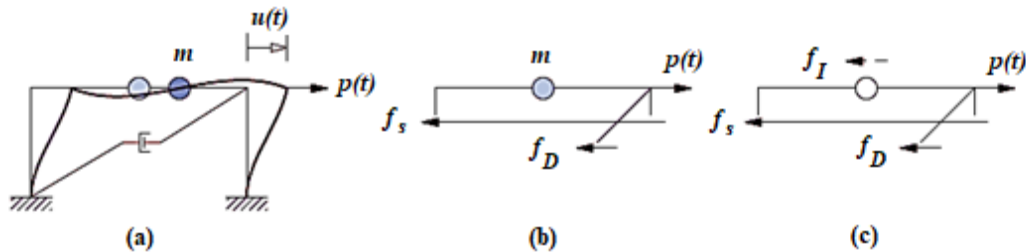


Figura N° 2.2 Fuerzas actuantes en un instante de tiempo. Chopra 2012

Planteando el equilibrio de la Figura N° 2.2 (c), tenemos que la fuerza resultante es: $p(t) - f_s - f_D$, y aplicando la Segunda Ley de Newton y ordenando tenemos:

$$m\ddot{u}(t) + f_D + f_s = p(t) \quad (2.1)$$

Considerando el rango lineal y elástico, sabemos que la fuerza restauradora es proporcional a la rigidez, y la fuerza de amortiguamiento es proporcional a la velocidad, tenemos:

$$m\ddot{u}(t) + C\dot{u}(t) + Ku(t) = p(t) \quad (2.2)$$

Cabe indicar que se presentan dos tipos de movimiento en las estructuras amortiguadas: la vibración libre y la vibración forzada.

a) Vibración libre amortiguada: En este caso no se presenta una fuerza excitadora, por tanto tenemos:

$$\begin{aligned} m\ddot{u}(t) + C\dot{u}(t) + Ku(t) &= 0 \\ f_I + f_D + f_s &= 0 \end{aligned}$$

b) Vibración forzada amortiguada: En este caso la fuerza excitadora es diferente de cero.

$$\begin{aligned} m\ddot{u}(t) + C\dot{u}(t) + Ku(t) &= p(t) \\ f_I + f_D + f_s &= p(t) \end{aligned}$$

2.3. VIBRACIÓN LIBRE AMORTIGUADA

Este tipo de movimiento ocurre cuando la estructura es perturbada desde su posición de equilibrio estático y se le permite vibrar sin ninguna fuerza dinámica excitadora.

La ecuación de movimiento de vibración libre es:

$$m\ddot{u}(t) + C\dot{u}(t) + Ku(t) = 0 \quad (2.3)$$

Al dividir ambos términos de la ecuación 2.3 entre la masa, obtenemos la siguiente expresión:

$$\ddot{u}(t) + 2\beta\omega\dot{u}(t) + \omega^2u(t) = 0 \quad (2.4)$$

Donde:

$$\omega = \sqrt{\frac{K}{m}} \quad : \text{Frecuencia natural de vibración} \quad (2.5a)$$

$$\beta = \frac{c}{2m\omega} = \frac{c}{c_{cr}} \quad : \text{Amortiguamiento} \quad (2.5b)$$

La forma de la solución de la ecuación 2.3 es de la forma:

$$u(t) = e^{-\beta\omega t}(A \sin \omega_D t + B \cos \omega_D t) \quad (2.6)$$

Donde las constantes A y B se obtienen a partir de las condiciones iniciales del movimiento y $\omega_D = \omega\sqrt{1 - \beta^2}$ es la frecuencia natural amortiguada.

2.3.1. Movimiento Sub-Amortiguado ($\beta < 1$)

En el caso de un sistema sub-amortiguado, el amortiguamiento β resulta menor a la unidad. Corresponde a un sistema que vibra sobre su posición de equilibrio en la cual la amplitud decrece con el tiempo. Ver Figura N°2.3.

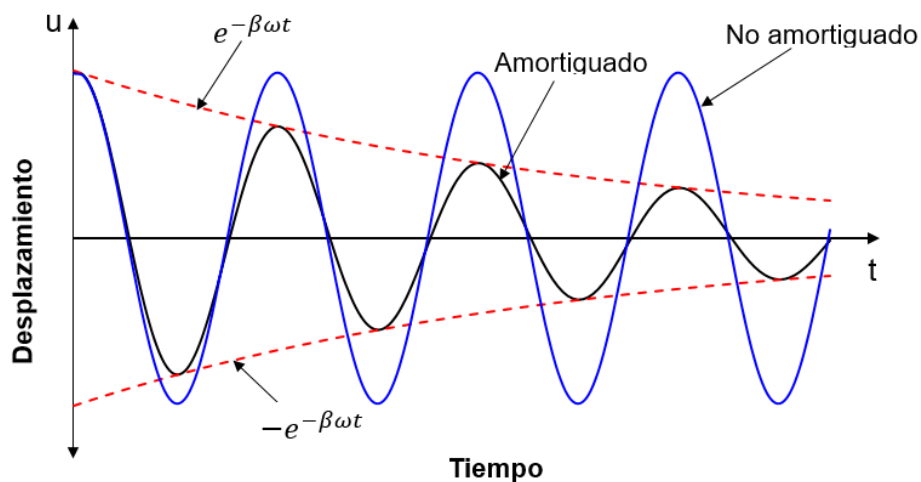


Figura N° 2.3 Efectos del amortiguamiento en la vibración libre (Elaboración propia)

La solución de la ecuación que gobierna el movimiento sub amortiguado considerando $t_0 = 0, u = u_0$ y $\dot{u} = \dot{u}_0$ es:

$$u(t) = e^{-\beta\omega t} \left\{ u_0 \cos \omega_D t + \left[\frac{\dot{u}_0 + \beta\omega u_0}{\omega_D} \right] \sin \omega_D t \right\} \quad (2.7)$$

Este tipo de amortiguamiento es el de mayor importancia en la dinámica de estructuras sometidas a sismos.

2.3.2. Movimiento Críticamente Amortiguado ($\beta = 1$)

En este caso el sistema retorna a su posición de equilibrio sin vibrar y la amplitud de movimiento decae rápidamente.

La solución de la ecuación que gobierna al movimiento crítico es:

$$u(t) = e^{-\beta\omega t} \{ u_0 + (\dot{u}_0 + \omega u_0) t \} \quad (2.8)$$

2.3.3. Movimiento sobre – amortiguado ($\beta > 1$)

En este caso el sistema no vibra y regresa a su posición de equilibrio de manera más lenta que el caso crítico.

La solución de la ecuación que gobierna al movimiento sobre – amortiguado es:

$$u(t) = e^{-\beta\omega t} [A \cos h \omega_D' t + B \sin h \omega_D' t] \quad (2.9a)$$

$$\omega_D' = \omega \sqrt{\beta^2 - 1} \quad (2.9b)$$

ω_D' Es la frecuencia natural sobre amortiguada.

Las constantes A y B, se definen al evaluar las condiciones iniciales:

$$t_0 = 0, u = u_0 \text{ y } \dot{u} = \dot{u}_0$$

$$A = C_1 + C_2 \quad (2.10a)$$

$$A = C_1 - C_2 \quad (2.10b)$$

Donde:

$$C_1 = \frac{\dot{u}_0 + [\beta + \sqrt{\beta^2 - 1}] \omega u_0}{2\omega \sqrt{\beta^2 - 1}} \quad (2.11a)$$

$$C_2 = \frac{-\dot{u}_0 - [\beta + \sqrt{\beta^2 - 1}] \omega u_0}{2\omega \sqrt{\beta^2 - 1}} \quad (2.11b)$$

En la Figura N°2.4, se aprecia de forma gráfica los diferentes tipos de movimiento:

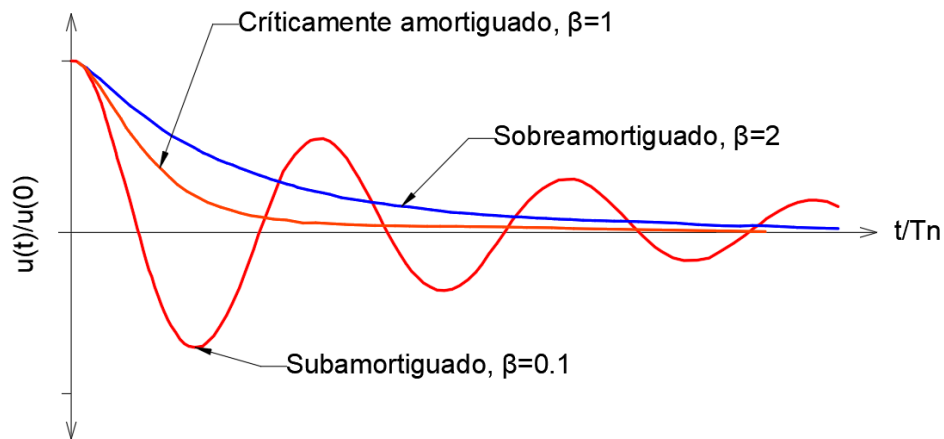


Figura N° 2.4 Vibración Libre Sistemas 1GDL. Sub – Amortiguado, Críticamente amortiguado y Sobre – amortiguado (Elaboración propia)

2.4. VIBRACIÓN FORZADA AMORTIGUADA

Este tipo de movimiento ocurre cuando la estructura es perturbada mediante una fuerza externa que depende del tiempo, la cual hace que el sistema se encuentre en vibración forzada. En este apartado veremos el movimiento forzado que se genera al aplicar una carga sinusoidal (carga armónica) y una carga sísmica.

2.4.1. Movimiento sinusoidal

Consideremos una fuerza externa $P_0 \text{sen} \Omega t$; por tanto la ecuación que gobierna este tipo de movimiento es:

$$m\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = P_0 \text{sen} \Omega t \quad (2.12)$$

La solución de esta ecuación está constituida por la suma de la solución particular y la solución homogénea (Ec. 2.6), la solución particular es de la forma:

$$u_p = u_p(t) = \frac{P_0}{K} \times \frac{\left(1 - \frac{\Omega^2}{\omega^2}\right) \text{sen} \Omega t - 2\beta \frac{\Omega}{\omega} \text{cos} \Omega t}{\left(1 - \frac{\Omega^2}{\omega^2}\right)^2 + 4\beta^2 \frac{\Omega^2}{\omega^2}} \quad (2.13)$$

Si consideramos como condiciones iniciales $t_0 = 0, u = u_0$ y $\dot{u} = \dot{u}_0$:

$$A = u_0 - u_p(0) \quad (2.14a)$$

$$B = \frac{1}{\omega_D} \left\{ \dot{u}_0 - \dot{u}_p(0) + \beta \omega [u_0 - u_p(0)] \right\} \quad (2.14b)$$

Si reescribimos la ecuación 2.13 tenemos:

$$u_p = u_p(t) = \frac{P_0}{K} \frac{1}{\sqrt{\left(1 - \frac{\Omega^2}{\omega^2}\right)^2 + 4\beta^2 \frac{\Omega^2}{\omega^2}}} [\text{cos} \delta \cdot \text{sen} \Omega t - \text{sen} \delta \cdot \text{cos} \Omega t] \quad (2.15)$$

Donde:

$$2\beta \frac{\Omega}{\omega} \quad \sqrt{\left(1 - \frac{\Omega^2}{\omega^2}\right)^2 + 4\beta^2 \frac{\Omega^2}{\omega^2}} \quad \delta \quad \left(1 - \frac{\Omega^2}{\omega^2}\right)$$

Podemos decir que la solución de la solución de movimiento forzado puede escribirse de la forma:

$$u = u_{\text{VIBRACION LIBRE AMORTIGUADA}} + u_{\text{VIBRACION ARMONICA FORZADA}} \quad (2.16)$$

- De esto se nota que la componente perteneciente a la solución de la vibración libre amortiguada se reduce significativamente hasta el punto que se puede despreciar su aporte en el movimiento, siendo la componente de la solución forzada llamada también solución **permanente** la más importante.

Una vez que la componente de vibración libre se hace despreciable la ecuación 2.16, se puede escribir de la siguiente forma:

$$u \approx u_{\text{PERMANENTE}} \approx u_{\text{VIBRACION ARMONICA FORZADA}} \quad (2.17)$$

$$u_{\text{PERMANENTE}} = \frac{P_0}{k} \frac{1}{\sqrt{\left(1 - \frac{\Omega^2}{\omega^2}\right)^2 + 4\beta^2 \frac{\Omega^2}{\omega^2}}} [\cos \delta \cdot \sin \Omega t - \sin \delta \cdot \cos \Omega t] \quad (2.18)$$

De donde el factor de amplificación dinámica FAD es:

$$FAD = \frac{1}{\sqrt{\left(1 - \frac{\Omega^2}{\omega^2}\right)^2 + 4\beta^2 \frac{\Omega^2}{\omega^2}}} \quad (2.19)$$

En la Figura N° 2.5 para diferentes valores de la relación de frecuencia natural y la frecuencia de la fuerza externa se presentan diferentes valores de FAD. Se logra apreciar la importancia del amortiguamiento ya que al incrementarse éste se reduce la respuesta.

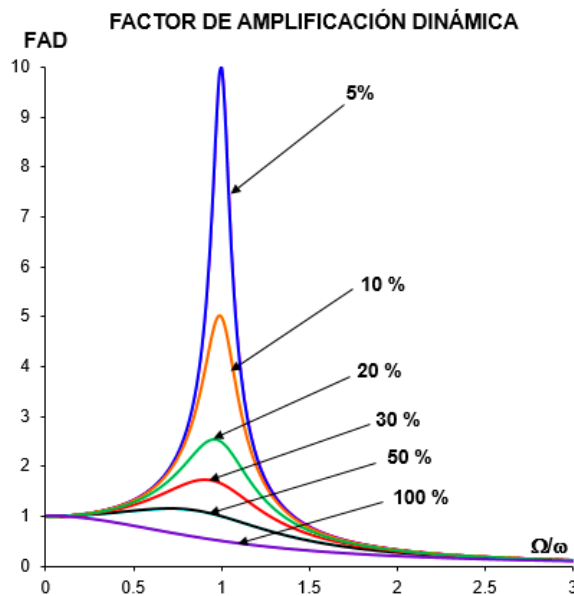


Figura N° 2.5 FAD para carga sinusoidal (Elaboración propia)

2.4.2. Movimiento sísmico

En este caso la fuerza externa es una excitación arbitraria que parte de un registro sísmico que registra valores de aceleración cada cierto intervalo de tiempo.

De la Figura 2.1 (b), podemos llegar a la ecuación de movimiento para la estructura de un grado de libertad con aceleración en la base:

$$m\ddot{u}(t) + C\dot{u}(t) + Ku(t) = -m\ddot{u}_g(t) \quad (2.20)$$

Si dividimos ambos términos de la ecuación por la masa, se tiene:

$$\ddot{u}(t) + 2\beta\omega\dot{u}(t) + \omega^2u(t) = -\ddot{u}_g(t) \quad (2.21)$$

La aceleración durante un sismo varía de manera muy irregular, es por ello que los métodos analíticos deben ser descartados para la solución de este tipo de problema. La solución de este problema parte de métodos numéricos en los que se obtienen valores de $u(t)$ para aprovecharlos en el cálculo de fuerzas internas en los elementos estructurales.

Con los valores máximos se grafican espectros de respuesta para un determinado sismo, estos parten de valores específicos de amortiguamiento.

Por tanto un espectro es una forma de resumir gráficamente la máxima respuesta de todos los posibles sistemas lineales de 1GDL sometidos a la misma componente de movimiento del terreno.

Los espectros más importantes en la ingeniería son:

a) Espectro de respuesta de desplazamiento: Indica la máxima deformación de un sistema.

$$u_0(T_n, \beta) \equiv \text{máx}|u(t, T_n, \beta)| \quad (2.22)$$

b) Espectro de respuesta de velocidad: Relacionado directamente con la máxima energía de deformación almacenada en el sistema durante un sismo.

$$\dot{u}_0(T_n, \beta) \equiv \text{máx}|\dot{u}(t, T_n, \beta)| \quad (2.23)$$

c) Espectro de respuesta de aceleración: Relacionado directamente con los valores de máxima fuerza estática equivalente y corte basal.

$$\ddot{u}_0(T_n, \beta) \equiv \text{máx}|\ddot{u}(t, T_n, \beta)| \quad (2.24)$$

De la Figura N°2.6 se observa que un aumento del amortiguamiento conlleva a una reducción de espectro de aceleración caso similar sucede con el desplazamiento y la velocidad.

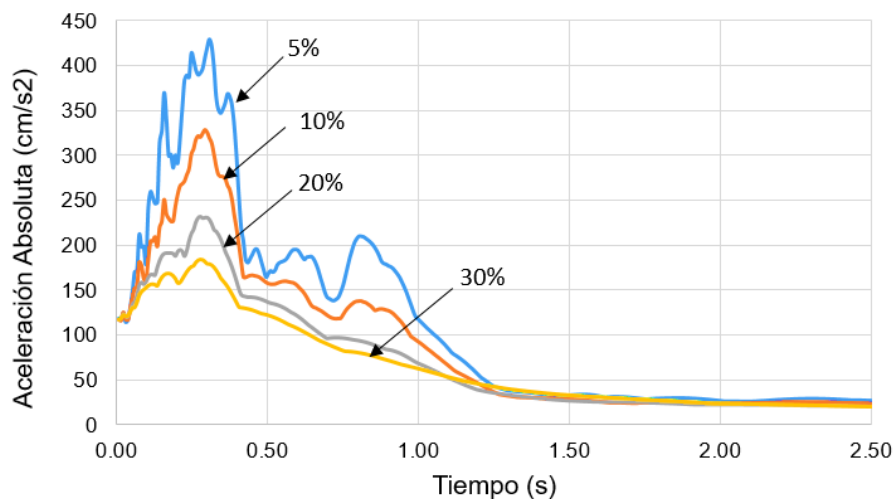


Figura N° 2.6 Espectro de aceleración absoluta en función del amortiguamiento. Sismo Lima 1974 dirección E-W (Elaboración propia)

2.4.3. Sistema de 1 GDL con disipadores fluido viscosos

Se ha considerado un sistema de un grado de libertad, el cual lleva instalado en la diagonal un disipador de energía fluido viscoso con una constante de amortiguamiento “C” muestra a continuación en la Figura N°2.7 un sistema de 1 GDL el cual está sometido a una excitación en la base.

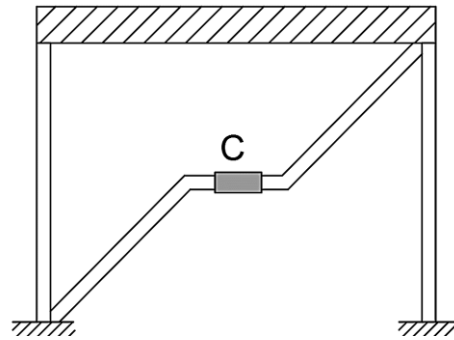


Figura N° 2.7 Sistema de 1 GDL con disipador de fluido viscoso (Elaboración propia)

Considerando que la estructura tiene una rigidez “K”, una masa “m”, un coeficiente de amortiguamiento viscoso asociado al amortiguamiento natural de la estructura “C₀” y considerando que la fuerza en el dispositivo es proporcional a la velocidad relativa.

La idealización de la estructura de la Figura N°2.7, se muestra en la siguiente figura:

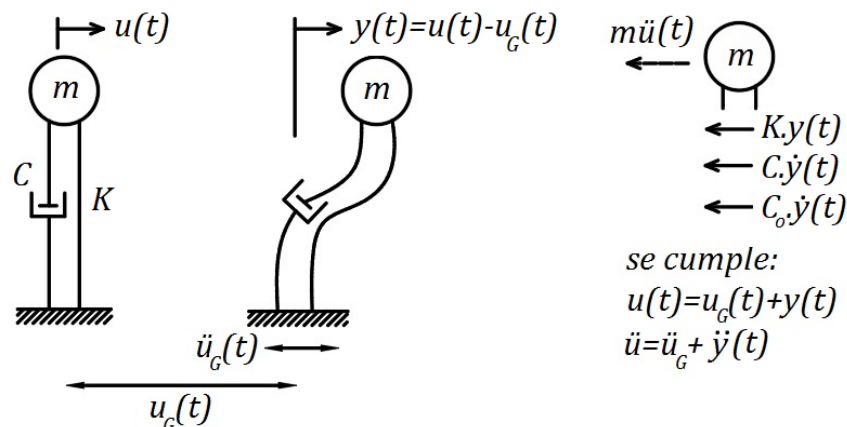


Figura N° 2.8 Idealización de un sistema de 1GDL con un disipador de fluido viscoso

Estableciendo el equilibrio dinámico de las fuerzas que actúan sobre la masa “m” se tiene:

$$m\ddot{y}(t) + c_0\dot{y}(t) + c\dot{y}(t) + ky(t) = -m\ddot{u}_g(t) \quad (2.25)$$

$$\ddot{y}(t) + 2\beta_0\omega\dot{y}(t) + 2\beta_d\omega\dot{y}(t) + ky(t) = -\ddot{u}_g(t) \quad (2.26)$$

$$\ddot{y}(t) + 2\omega\dot{y}(t)(\beta_0 + \beta_d) + \omega^2y(t) = -\ddot{u}_g(t) \quad (2.27)$$

Considerando:

$$\beta_{ef} = \beta_0 + \beta_d \quad (2.28)$$

Donde β_0 es el amortiguamiento inherente de la estructura y β_d el amortiguamiento añadido por los disipadores fluidos viscosos. Entonces tenemos:

$$\ddot{y}(t) + 2\omega\beta_{ef}\dot{y}(t) + \omega^2 y(t) = -\ddot{u}_g(t) \quad (2.29)$$

Note que la ecuación 2.29 presenta la misma forma que la ecuación 2.21.

2.4.4. Balance de Energía

De la Figura N°2.8, se observa que la masa m , adquiere un desplazamiento relativo $y(t)$, y un desplazamiento absoluto $u(t) = u_g(t) + y(t)$.

Se puede interpretar que el movimiento de la base es generado por una fuerza aplicada en la base. Si aplicamos la segunda ley de Newton para el movimiento absoluto tenemos:

$$F = m\ddot{u} \quad (2.25)$$

El trabajo de la fuerza aplicada resulta igual a su magnitud por el desplazamiento en la base (desplazamiento absoluto).

El trabajo realizado por la fuerza puede ser interpretado como la energía de entrada al sistema:

$$E_{Entrada} = W_{ug}^F = \int m\ddot{u} du_g \quad (2.26)$$

Debido al principio de conservación de la energía, ésta energía de entrada se transforma en energía cinética, energía de deformación, en energía viscosa y energía histerética.

La energía cinética es la responsable de que la masa adquiera velocidad y se expresa como:

$$E_{Cinética} = \frac{mu^2}{2} \quad (2.27)$$

La energía de deformación o elástica es la responsable de la deformación de elementos. Considerando un sistema lineal elástico se tiene:

$$E_{Elástica} = \int Ky dy = \frac{Ky^2}{2} \quad (2.28)$$

La energía viscosa se disipa gracias a algún elemento amortiguador, por tanto la energía disipada es igual al trabajo realizado por la fuerza de amortiguamiento, si consideramos un amortiguador viscoso lineal la energía disipada es:

$$E_{Viscosa} = W_y^{F_{amort}} = \int C\dot{y} dy \quad (2.29)$$

Por último, la energía histerética se presenta cuando los elementos ingresan en el rango no lineal, y resulta de los movimientos cíclicos producto de un movimiento sísmico que se da particularmente en este caso de estudio.

El área encerrada por cada lazo representa la energía disipada por ciclo.

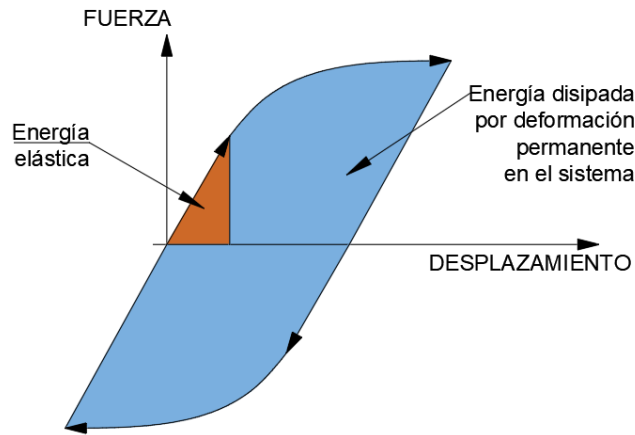


Figura N° 2.9 Ciclo de Histéresis en un sistema estructural, energía elástica e inelástica
(Elaboración propia)

Finalmente de la conservación de energía podemos plantear la siguiente relación:

$$E_{ENTRADA} = E_{ELASTICA} + E_{HISTERETICA} + E_{CINETICA} + E_{VISCOSA} \quad (2.30)$$

$$E_{ENTRADA} = E_s + E_h + E_k + E_d \quad (2.31)$$

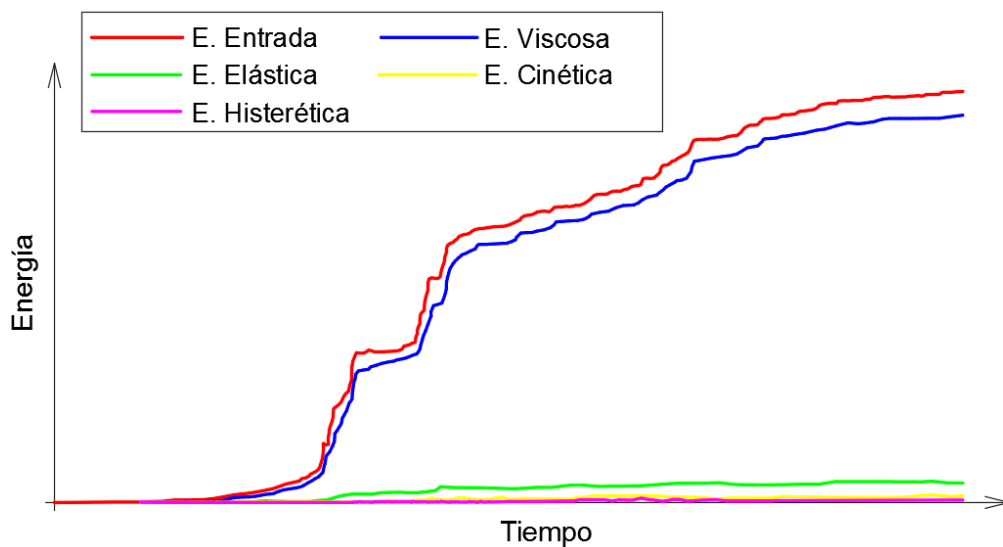


Figura N° 2.10 Balance de energía. (Elaboración propia)

CAPITULO III. SISTEMAS MODERNOS DE PROTECCIÓN SÍSMICA

Una alternativa al diseño sismorresistente convencional es el control estructural ante acciones sísmicas, basado en la combinación adecuada de energía elástica y de disipación de energía en sus elementos principales.

Estos sistemas surgen principalmente como respuesta a una demanda de la sociedad, que requiere no solo evitar pérdidas humanas ocasionadas por los sismos, sino también reducir y controlar las pérdidas económicas resultantes del daño a la construcción.

En la actualidad existen dispositivos dedicados a la disipación de energía que interactúan con la estructura. De esta forma, los elementos estructurales están sometidos a una sollicitación menor y por consiguiente, su nivel de daño sería minimizado.

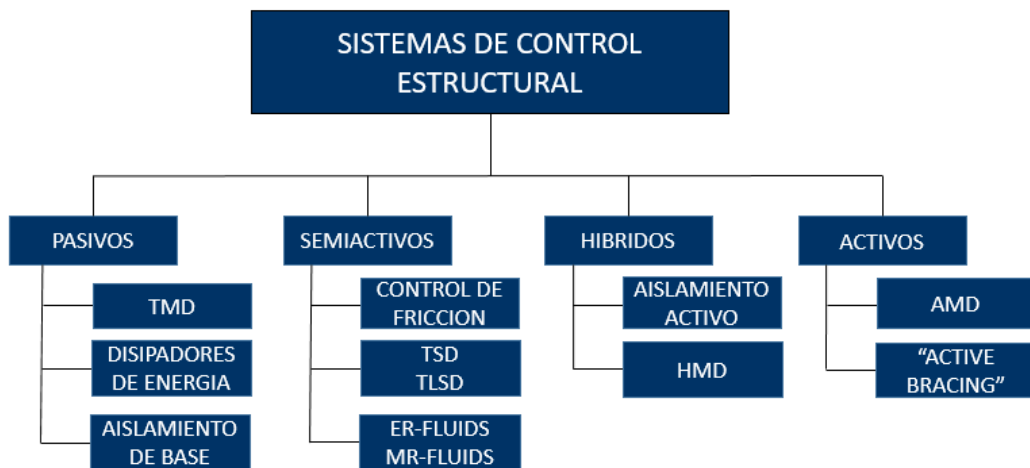


Figura N° 3.1 Sistemas de control estructural ante sismos (Villareal y Oviedo, 2008)

3.1. SISTEMAS DE CONTROL ACTIVOS

Un sistema de control activo consta de sensores situados en la estructura cuya función es medir variables correspondientes a la excitación externa y/o variables de la respuesta estructural. Cuentan con controladores que se basan en la medida de los sensores y calculan las fuerzas a aplicar por los actuadores para contrarrestar los efectos sísmicos; los actuadores son alimentados por fuentes de energía externa para ejercer fuerzas.

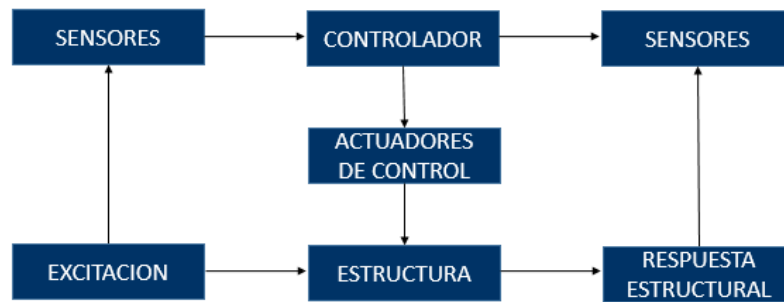


Figura N° 3.2 Sistema con control activo (2008 Villareal y Oviedo)

Se muestra en la Figura N° 3.3 el esquema estructurado de un sistema con control activo

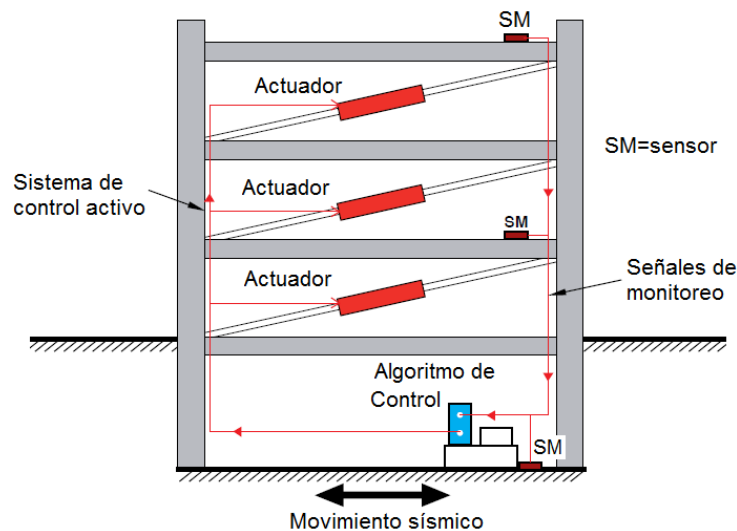


Figura N° 3.3 Esquema Estructurado con sistema de control activo (Cámara Chilena de la Construcción, documento técnico N°29)

3.2. SISTEMAS DE CONTROL HÍBRIDOS

“Los sistemas híbridos son la combinación de sistemas activos y los sistemas pasivos” (2008 Villareal y Oviedo: 26). Estos sistemas presentan mejoras respecto a los sistemas activos debido a que el control se consigue a partir de sistemas pasivos, donde se demanda menores requerimientos energéticos y en caso de falla del componente activo el sistema pasivo sigue ejerciendo funciones de control.

Por ejemplo el HMD (Híbrido Mass Damper), es el resultado de la combinación de un oscilador resonante (TMD) y un actuador de control activo. La capacidad de este dispositivo radica principalmente en el oscilador resonante, donde las fuerzas generadas en el actuador son solamente para mejorar el desempeño del oscilador de este modo incrementando la eficiencia del sistema.

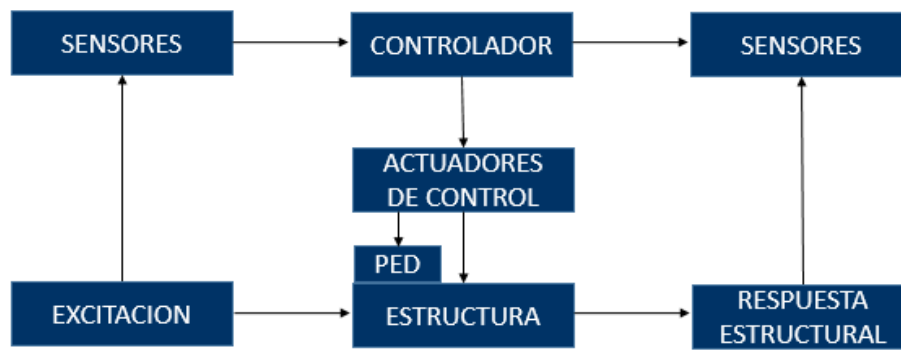


Figura N° 3.4 Sistema con control Híbrido (2008 Villareal y Oviedo)

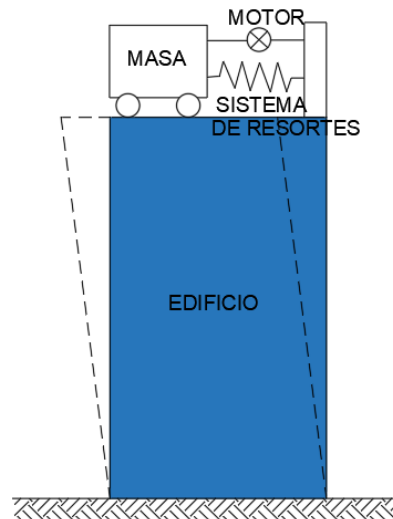


Figura N° 3.5 Esquema de un sistema de control Híbrido (IHI Infraestructure System)

3.3. SISTEMAS DE CONTROL SEMIACTIVOS

Con un funcionamiento similar a los sistemas activos, a diferencia de estos el control se realiza con dispositivos de carácter reactivo, cuyas características son controlables. Los dispositivos que intervienen son los dispositivos que se usan en los sistemas pasivos combinado con actuadores que permiten modificar las propiedades dinámicas de la estructura a un bajo consumo energético.

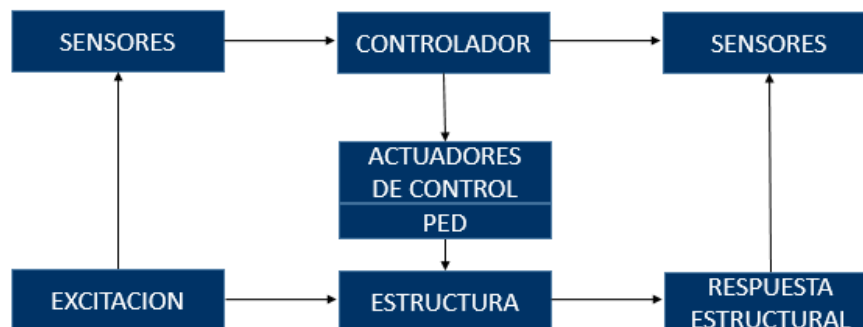


Figura N° 3.6 Sistema con control Semiactivo (2008 Villareal y Oviedo)

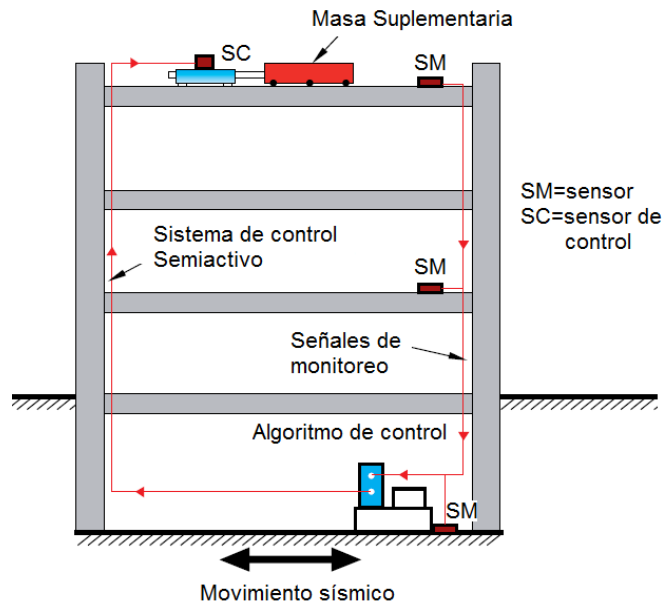


Figura N° 3.7 Esquema Estructurado con sistema de control semiactivo (Cámara Chilena de la Construcción, documento técnico N°29)

3.4. SISTEMAS DE CONTROL PASIVOS

Son dispositivos que no requieren de un agente externo para su funcionamiento, es decir, que su funcionamiento depende de las condiciones de trabajo en la que se encuentra.

Estos sistemas se dividen en tres tipos:

- Aisladores de base.
- Sistemas inerciales acoplados.
- Disipadores de energía.

3.4.1. Aisladores de base:

Son dispositivos flexibles a movimientos horizontales y rígidos al desplazamiento vertical; estos se sitúan entre la cimentación y la superestructura con el fin de desacoplar la estructura del movimiento del terreno, lo cual modifica las características dinámicas del edificio aumentando el periodo fundamental de este; lo cual en suelos rígidos permite una reducción en las demandas ya que ésta se aleja de la de la zona de demandas altas correspondientes a periodos cortos. Ver Fig. N° 3.8.

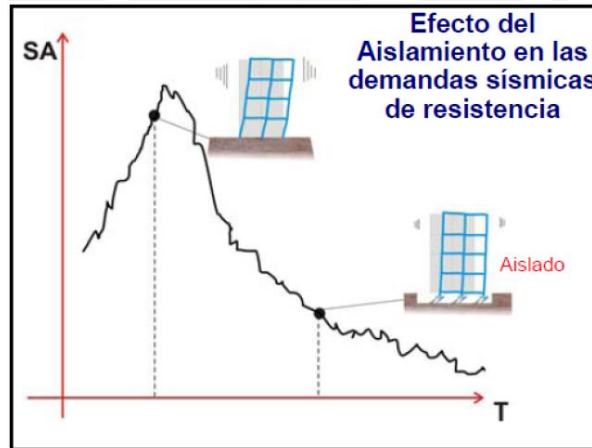


Figura N° 3.8 Reducción de la demanda sísmica por medio de aisladores (Muñoz 2009)

Existen dos tipos de aisladores:

- a) Aisladores elastoméricos
- b) Aisladores de fricción

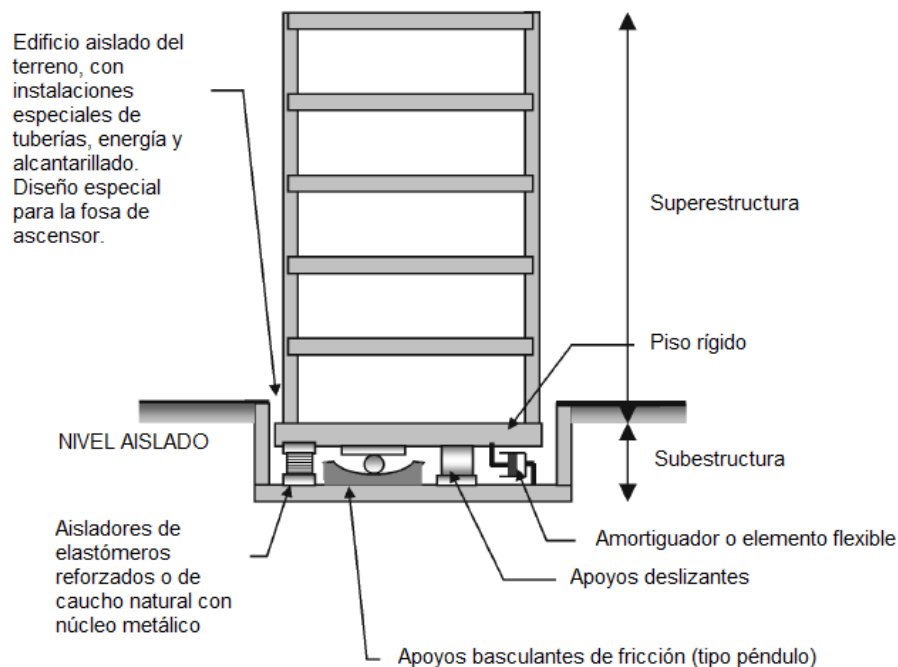


Figura N° 3.9 Técnica de aislamiento sísmico en la base (Juan Oviedo, María Duque, 2006)

a) Aisladores elastoméricos

Estos aisladores son muy flexibles lateralmente gracias a sus componentes de caucho natural o neopreno; verticalmente estos dispositivos poseen una gran rigidez ya que contiene láminas finas de acero. Dentro de estos aisladores encontramos tres tipos: los de caucho natural (NFB), los de caucho con núcleo de plomo (LRB) y los de caucho con alta disipación de energía (HDR).

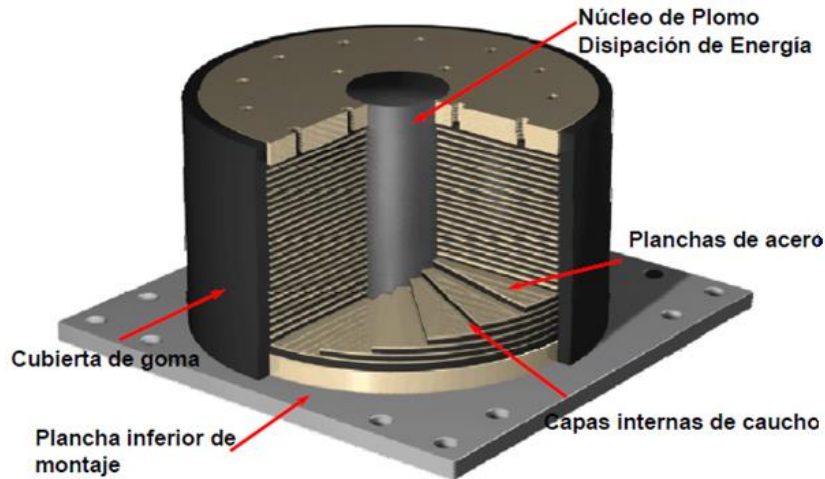


Figura N° 3.10 Aislador elastomérico con núcleo de plomo (Dynamic Isolation Systems)

b) Aisladores de fricción

Estos a diferencia de los aisladores elastoméricos trabajan a partir de un coeficiente de fricción, su principal ventaja es el costo y la carga vertical que puede soportar, presenta un inconveniente que es la dificultad en la modelación de la fricción a lo largo del tiempo y en función del deslizamiento y la presión actuante.

La velocidad en cada capa es pequeña manteniendo, de esta manera, un bajo coeficiente de fricción. Además de los elementos deslizantes, este sistema también tiene un núcleo de caucho que no soporta cargas verticales pero provee una fuerza restauradora.; existen varios tipos como el pendular friccionante, el elástico friccionante, TASS, etc.



Figura N° 3.11 Aislador péndulo friccionante triple (Earthquake Protection Systems)

3.4.2. Sistemas inerciales acoplados

En los disipadores de masa sincronizada, la masa se adhiere a la estructura por medio de resortes y amortiguadores que inducen fuerzas contrarias a la excitación, reduciendo los movimientos y desplazamientos impuestos por el sismo. En el Japón se han dotado varias edificaciones con esta técnica; la torre Landmark de Yokohama (75 pisos) posee en su último piso un amortiguador de masa sincronizada (tuned mass damper), para controlar las vibraciones debidas al viento y al sismo, evitar problemas estructurales y otorgar comodidad a los usuarios de la edificación.

Dentro de estos amortiguadores de masa sincronizada también se pueden considerar los de líquido sincronizado (tuned liquid damper). Estos son amortiguadores que aprovechan la frecuencia de vibración del oleaje de un líquido contenido en tanques u otros depósitos que se sitúan, generalmente, en el último piso de la estructura. El oleaje dentro del tanque produce una serie de frecuencias de vibración que reduce la respuesta de la estructura ante la excitación.

Una variante de este tipo de amortiguadores es el amortiguador de columna de líquido sincronizado (tuned liquid column damper), que imparte amortiguamiento adicional al disipar energía mediante el paso del agua por unos orificios, para mejorar el desempeño estructural de la edificación.

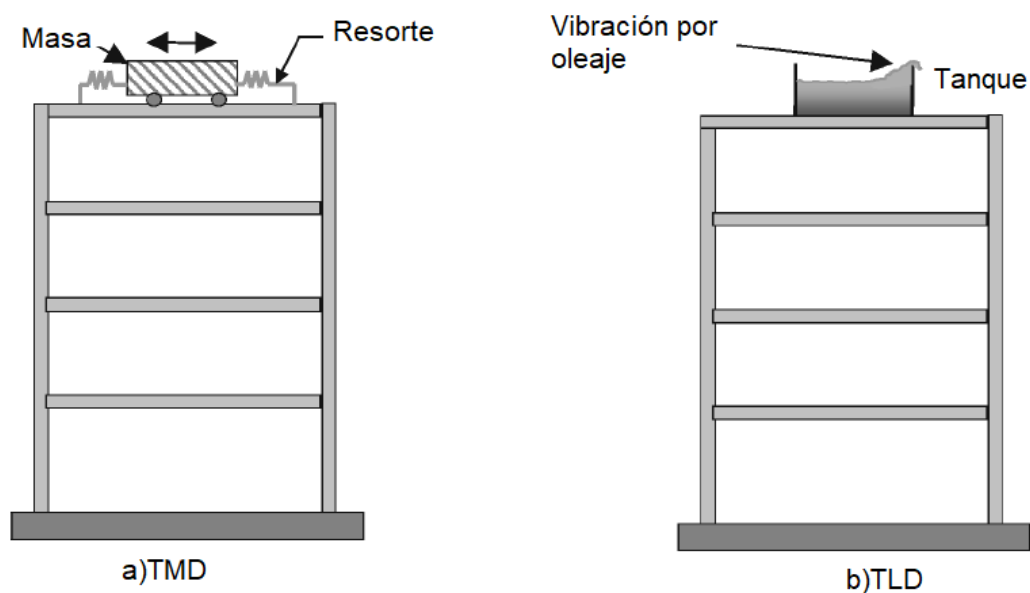


Figura N° 3.12 Esquema de sistemas inerciales acoplados (Juan Oviedo, María Duque, 2006)

3.4.3. Disipadores de energía

Son dispositivos que transforman la energía en calor, se tienen categorías dentro de este grupo:

- Dependientes del desplazamiento
- Dependientes de la velocidad
- Dependientes del desplazamiento y la velocidad.

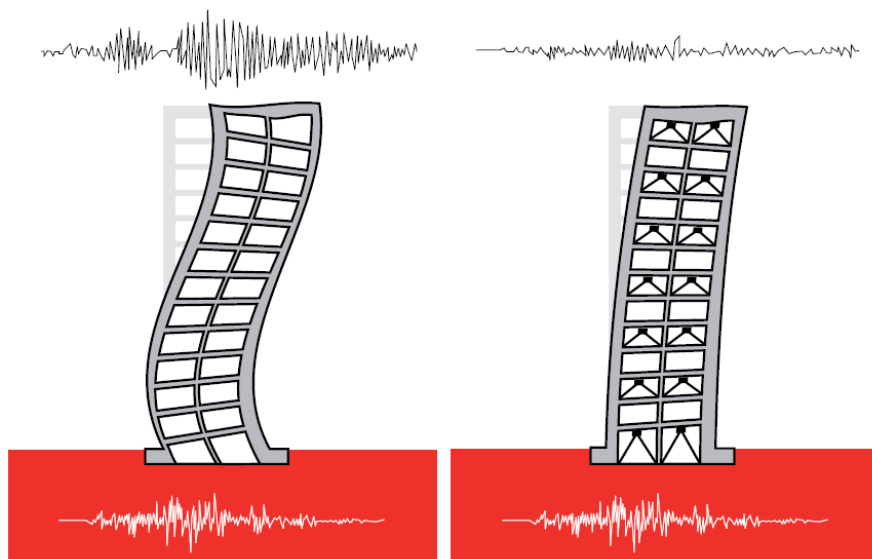


Figura N° 3.13 Comparación de edificio sin disipadores y edificio con disipadores de energía (Cámara Chilena de la Construcción, documento técnico N°29)

a) Disipadores dependientes del desplazamiento (Histeréticos)

Estos disipadores funcionan aumentando la rigidez de la estructura al momento de presentarse un desplazamiento relativo en los entrepisos; por tanto estos dispositivos modifican el periodo de la estructura; existen dos tipos los que funcionan a partir de la fluencia de metales y los friccionantes.

• Disipadores por fluencia de metales

Estos disipan la energía mediante la fluencia de metales los cuales son inducidos al rango inelástico mediante ciclos de deformación inelástica por flexión, torsión, corte o extrusión.

La principal desventaja de estos dispositivos es que estos sistemas no pueden ser ensayados antes de su colocación, ya que su funcionamiento depende de la fluencia de los metales y con el uso estos se van degenerando perdiendo así su capacidad para disipar energía, por tanto estos sistemas requerirán mantenimiento o reemplazo luego de un evento sísmico.

Entre los más usados tenemos al llamado dispositivo ADAS.

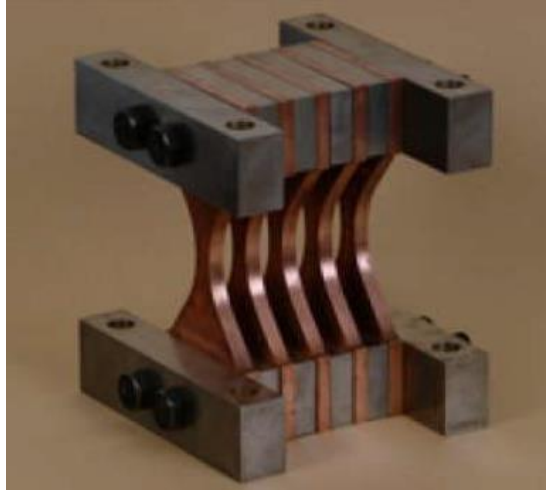


Figura N° 3.14 Disipador metálico tipo ADAS (Cámara Chilena de la Construcción, documento técnico N°29)

- **Disipadores por fricción**

Son dispositivos metálicos que se caracterizan por tener un comportamiento histéretico que se logra a través de la fricción entre sólidos metálicos y de este modo disipar energía por calor.

El principio básico de estos disipadores consiste en utilizar la deformación relativa entre dos puntos de una estructura para disipar energía a través de fricción.

Su principal desventaja radica en la incertidumbre en el coeficiente de fricción que no se mantiene constante a lo largo del tiempo y además varía en función del desplazamiento, la presión actuante y las condiciones de contacto.



Figura N° 3.15 Dispositivo de amortiguamiento por fricción tipo Pall (Symans, Charney, Whittaker, Constantinou, Kircher, Johnson McNamara, 2008)

b) Disipadores dependientes de la velocidad.

Como su nombre lo indica, estos dispositivos se accionan mediante la velocidad relativa de entrepiso a diferencia de los disipadores por desplazamiento, estos no añaden rigidez a la estructura y por tanto el periodo de esta se mantiene constante.

• Disipadores fluido – viscosos.

Inicialmente fue desarrollada esta tecnología para la industria militar y aeronáutica; sin embargo su uso se ha ampliado a estructuras civiles mejorando el comportamiento de estos, especialmente en estructuras ubicadas en zonas sísmicas.

Un amortiguador fluido viscoso disipa la energía, empujando el líquido a través de un orificio, produciendo una presión de amortiguamiento que crea una fuerza que es proporcional a la velocidad.

Su uso se basa principalmente en la rehabilitación de estructuras mejorando el comportamiento de estos de tal manera que cumplan con los requerimientos normativos modernos.

De hecho, la adición de amortiguadores viscosos a una estructura puede elevar el amortiguamiento de la estructura a un 30 % del amortiguamiento crítico o más. Por consiguiente, esta adición puede reducir las aceleraciones y desplazamientos laterales por un 50% respecto a la estructura sin amortiguadores (Constantinou y Symans, 1992).

Entre sus principales ventajas podemos mencionar:

- Amortiguamiento grandemente mejorado, disminuye tanto el esfuerzo como la deformación.
- El amortiguamiento crítico se eleva entre un 20-50% versus el típico 1-5% de un diseño sin amortiguamiento, de una forma simple y eficiente.
- No cambian de forma significativa los períodos de vibración de la estructura.
- Operación sin problemas: Completamente sellados, sin necesidad de rellenar, sin goteos, sin problemas. Controlados termostáticamente, virtualmente no afectados por temperaturas entre -40°C a $+71^{\circ}\text{C}$
- Tranquilidad: Amortiguadores totalmente pasivos, no dependen de ninguna fuente de energía externa
- Diversos tamaños: De 10 kip a 2000 kip (5 t a 1000 t)



Figura N° 3.16 Dispositivos de disipación fluido viscosos Taylor (Taylor devices)

Teniendo en cuenta que en la presente tesis el análisis desarrollado es con disipadores fluido viscosos; en el siguiente capítulo se describe con mayor detalle este tipo de amortiguadores.

c) Disipadores dependientes del desplazamiento y la velocidad.

• Disipadores visco - elásticos.

Los disipadores viscoelásticos sólidos están formados por placas metálicas unidas por capas finas de material viscoelástico y presentan ciclos histeréticos característicamente elípticos.

Su comportamiento depende del desplazamiento y la velocidad, su acción disipativa se basa en el aumento del amortiguamiento estructural, presentan algunas ventajas con relación a los disipadores histeréticos, tales como:

- No requieren de una gran fuerza para lograr disipar energía.
- No cambian de forma significativa los períodos de vibración de la estructura.

Entre sus principales desventajas podemos mencionar:

- Los materiales Viscoelásticos, en general son sensibles a los cambios de temperatura, frecuencia y deformación y resulta necesario minimizar la influencia de estas variables en sus rangos de servicio en estructuras sismorresistentes para que su comportamiento resulte predecible.

- Para conseguir un aumento del amortiguamiento estructural a valores que reduzcan significativamente la respuesta estructural ante un sismo severo es necesaria una gran cantidad de dispositivos.

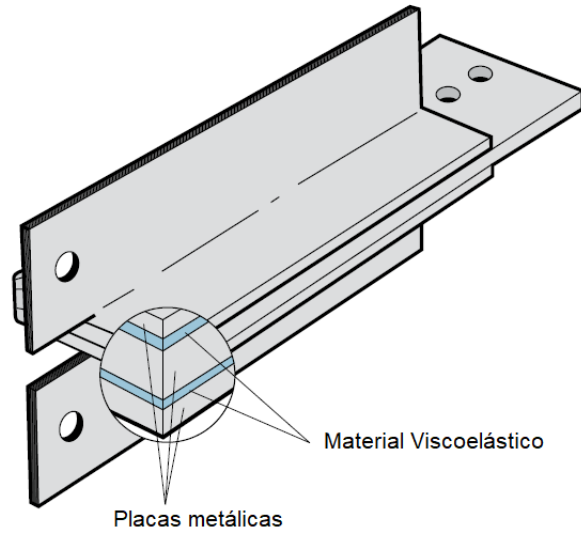


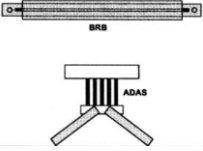
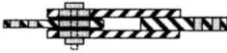
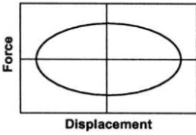
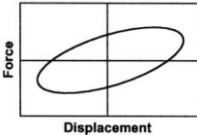
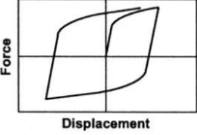
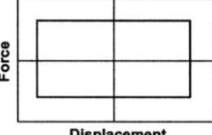
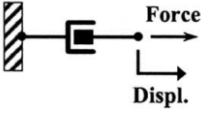
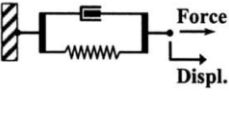
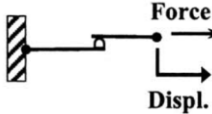


Figura N° 3.17 Disipador sólido viscoelástico (Cámara Chilena de la Construcción, documento técnico N°29)

Tabla N° 3.1 Resumen de dispositivos de disipación de energía pasivos (Journal of Structural Engineering, enero 2008)

	DISIPADOR FLUIDO VISCOSO	DISIPADOR SOLIDO VISCOELÁSTICO	DISIPADOR METÁLICO	DISIPADOR POR FRICCIÓN
Esquema básico				
Modelo histórico idealizado				
Modelo físico idealizado			Idealized Model Not Available	
Ventajas	<ul style="list-style-type: none"> • Se activa frente a pequeños desplazamientos • Mínima fuerza de recuperación • Para disipadores lineales el modelamiento es simplificado • Sus propiedades en gran parte son independientes a efectos de frecuencia y temperatura • Se tiene un historial probado en aplicaciones militares 	<ul style="list-style-type: none"> • Se activa frente a pequeños desplazamientos. • Provee una fuerza de recuperación • Comportamiento lineal, por tanto simple de modelar. 	<ul style="list-style-type: none"> • Comportamiento histérico estable • Confiabilidad a largo plazo • Insensibilidad a temperatura ambiente • Comportamiento y materiales familiares en las practicas ingenieriles 	<ul style="list-style-type: none"> • Gran energía de disipación por ciclo • Insensibilidad a temperatura ambiente
Desventajas	<ul style="list-style-type: none"> • Posible fuga de fluido 	<ul style="list-style-type: none"> • Limitada capacidad de deformación. • Sus propiedades son dependientes de la frecuencia y la temperatura • Posible pérdida de adherencia y fuga del material viscoelástico 	<ul style="list-style-type: none"> • Daños en el dispositivo después de un sismo • Comportamiento no lineal, requiere un análisis no lineal 	<ul style="list-style-type: none"> • La condición de la interfaz de deslizamiento puede cambiar con el tiempo. • Comportamiento no lineal, puede excitar modos superiores y requiere un análisis no lineal

CAPITULO IV. DISIPADORES DE ENERGÍA DE FLUIDO VISCOSO

4.1. FILOSOFÍA SISMORRESISTENTE ACTUAL

En el enfoque convencional sismorresistente se considera como desempeño aceptable a la capacidad que tiene una estructura para disipar energía, la cual es inducida por un sismo. La disipación de energía ocurre mediante deformaciones presentes en la estructura, las cuales son de carácter elástico e inelástico; en el caso de las deformaciones elásticas, las deformaciones son recuperables y generalmente provienen de la acción de sismos leves, mientras que en el caso de las deformaciones inelásticas las deformaciones son irrecuperables.

Las estructuras sismorresistentes, salvo casos especiales se diseñan para responder en el rango inelástico, de modo de desarrollar ductilidad y disipar energía durante un sismo severo. Este caso se presenta generalmente ante la ocurrencia de sismos moderados o raros que tienen altos períodos de retorno mayores a los 475 años cuya probabilidad de ocurrencia es muy baja durante la vida útil de la estructura.

Por este motivo, se acepta que una estructura incurra en el rango inelástico, dicho de otra manera se acepta daño pero se evita el colapso de la estructura proveyendo a ésta la suficiente ductilidad evitando catástrofes que involucren la pérdida de vidas humanas.

Es importante resaltar que la disipación de energía y el comportamiento dúctil de la estructura bajo la acción sísmica solo puede lograrse si los miembros que componen la misma son adecuadamente detallados (para evitar fallas frágiles).

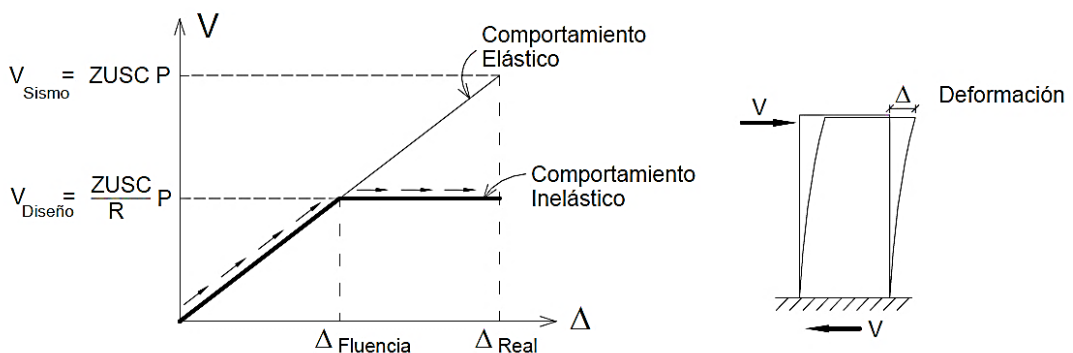


Figura N° 4.1 Cortante de diseño reducido (Pique del Pozo)

Sin embargo, la presente filosofía de diseño presenta inconvenientes en el caso de estructuras importantes donde la estructura debe permanecer funcional (hospitales, colegios, etc.), en estos casos la estructura debe ser diseñada de tal

modo que incurra solamente en el rango elástico o en el rango inelástico de manera mínima, lo que resulta bastante costoso.

En este tipo de estructuras se debe considerar el uso de nuevas tecnologías como son los aisladores de base y los disipadores de energía de fluido viscoso ya que las experiencias demuestran los buenos resultados obtenidos con la aplicación de estos sistemas.

4.2. FILOSOFÍA SISMORRESISTENTE CON DISIPADORES DE ENERGÍA

La adición de estos sistemas en las estructuras influye básicamente en la distribución de la energía inducida por el sismo y/o viento a la estructura.

La energía entregada a una estructura sin disipadores de energía se disipa mediante deformación elástica, deformación inelástica (histerética), transformación de la energía cinética en energía térmica y debido al amortiguamiento inherente de la estructura que se considera del orden de 5%.

En una estructura con disipadores de energía, sometida a la misma demanda de energía, la energía se distribuye de tal manera que la disipación debido al amortiguamiento se incrementa reduciendo así las respuestas debido a deformación elástica e inelástica.

$$E_{SISMO} = E_{ELASTICA} + E_{HISTERETICA} + E_{CINETICA} + E_{VISCOSA} \quad (4.1)$$

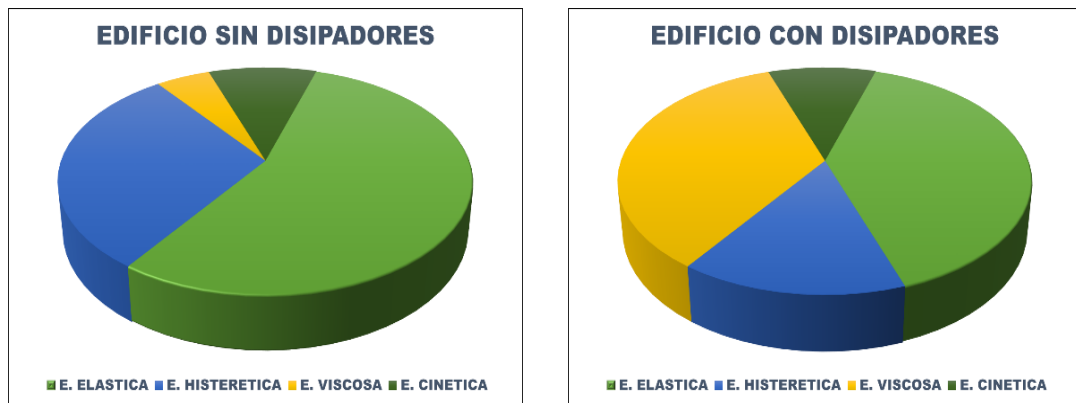


Figura N° 4.2 Distribución de la energía sísmica en una edificación

A continuación se muestra una analogía planteada por Popov, en la cual la estructura se representa mediante un recipiente y la energía del sismo mediante cierto caudal que ingresa al recipiente tal como se muestra en la Fig. 4.3.

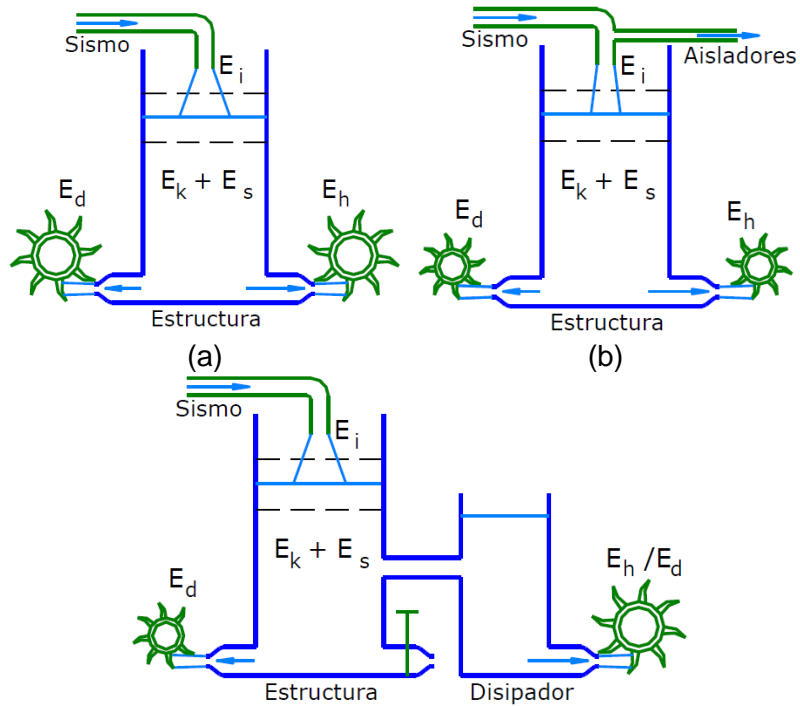


Figura N° 4.3 Analogía hidráulica para explicar los criterios de diseño (a) convencional, (b) con aisladores y (c) con disipadores. (Francisco Crisafulli, 2013)

Donde E_i representa la energía introducida por el sismo al sistema (input), E_k es la energía cinética, E_d es la energía disipada por amortiguamiento viscoso, E_s es la energía de deformación elástica y E_h es la energía disipada por comportamiento histerético.

En el caso de los disipadores viscosos, debido al incremento en la amortiguación de la estructura, la energía entregada directamente a ésta, se reduce; por tanto esto conlleva a una reducción del espectro de entrada y esto a su vez a una menor demanda de resistencia (Fig. 4.4).

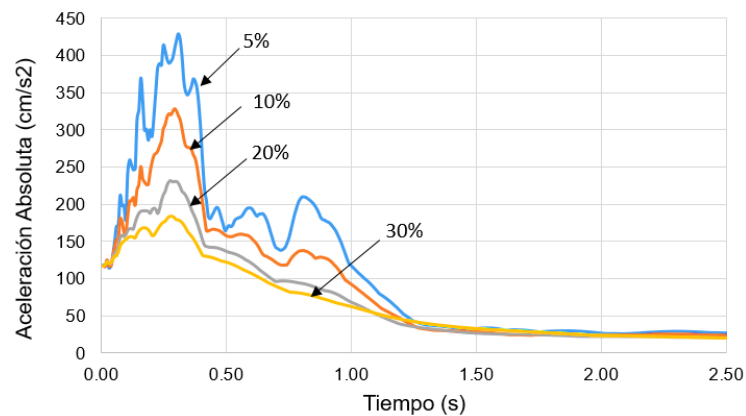


Figura N° 4.4 Reducción del espectro de entrada debido a un aumento en el amortiguamiento (Sismo Lima 1974)

4.3. FUNCIONAMIENTO DE LOS DISIPADORES FLUIDO VISCOSOS

Este es una de las técnicas más eficientes de disipación de energía; como se mencionó en el apartado anterior estos dispositivos disipan energía por la fricción que surge al transferir un fluido a través de orificios que tienen en su interior. La cantidad y el tamaño de los orificios se gradúan de acuerdo a la respuesta deseada para el dispositivo.

Estos dispositivos consisten básicamente en un cilindro de acero inoxidable que contiene un fluido de alta viscosidad, resistente al fuego, estable a cambios de temperatura (-40°C hasta 70°C) y a largos periodos de tiempo; en la parte interna el cilindro posee un pistón que en su borde interior presenta una cabeza con orificios, la cabeza divide al interior del cilindro en dos cámaras.

Al presentarse un desplazamiento del pistón a altas velocidades provoca que el fluido pase de la cámara 1 a la cámara 2; es en este proceso donde se produce la fuerza de amortiguamiento que buscará la igualdad de presión entre ambas cámaras.

Además existe en el dispositivo una tercera cámara de acumulación cuya principal función es permitir el desplazamiento del pistón al presentarse la excitación y además compensar la expansión y contracción térmica del fluido lo cual prevé así el efecto de rebote.

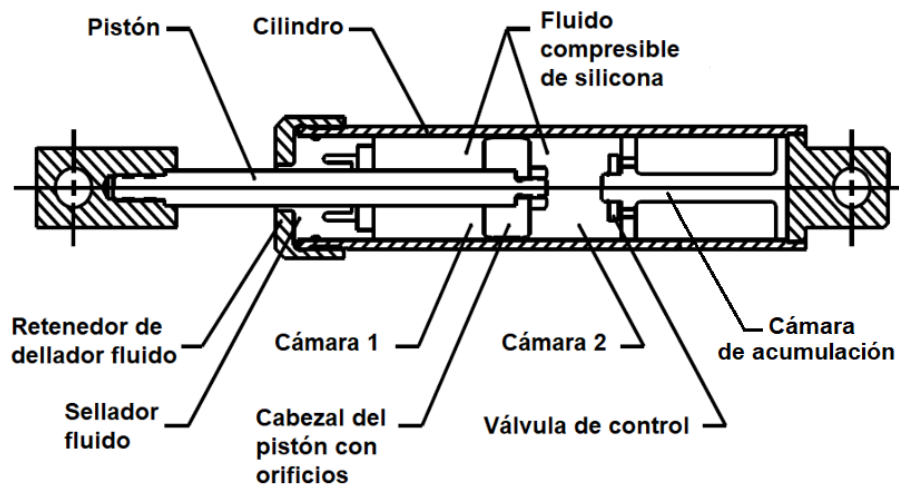


Figura N° 4.5 Disipador Fluido Viscoso (Saif Hussain, Taylor Devices)

4.4. RESPUESTA DEL DISIPADOR DE ENERGÍA FLUIDO VISCOSO

El disipador fluido viscoso reduce esfuerzos y deformaciones en la estructura al mismo tiempo, ya que la fuerza en el disipador está completamente fuera de fase con los esfuerzos debido a la flexión en las columnas que son inducidos por la

acción del sismo; esto se cumple ya que la fuerza en el disipador varía con la velocidad.

En la Fig. N°4.6 Se muestra que la fuerza máxima en la estructura se da cuando ocurre el desplazamiento máximo pero en ese instante de tiempo la fuerza en el disipador es mínima.

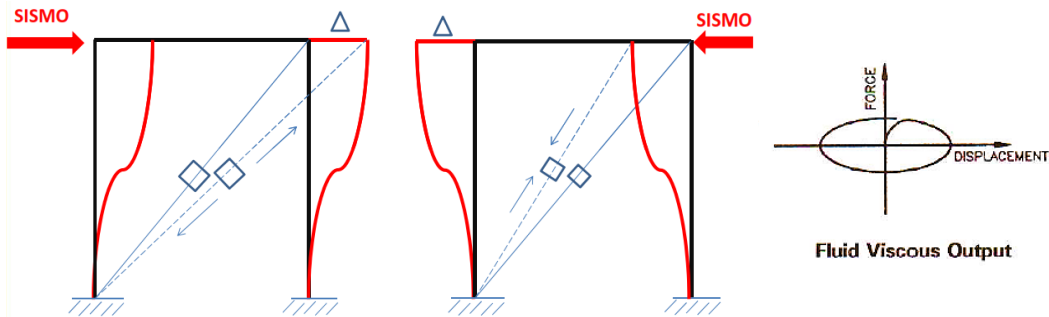


Figura N° 4.6 Comportamiento de un disipador viscoso (Maribel Burgos, 2013)

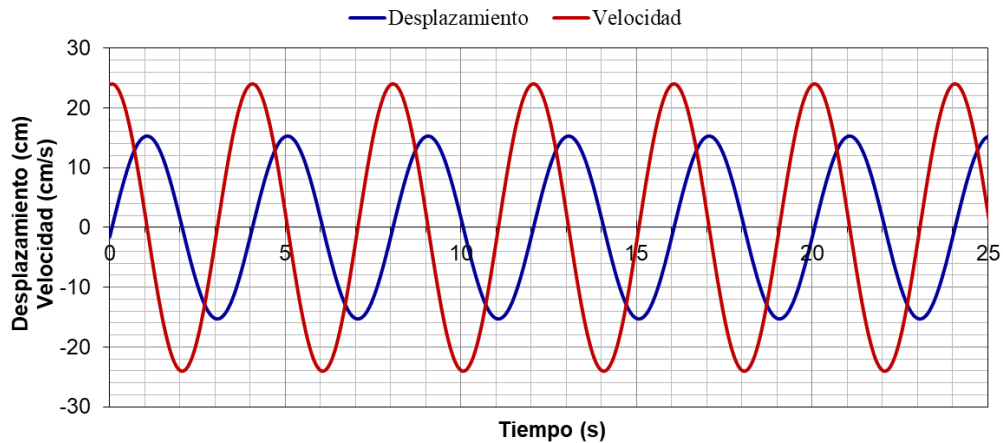


Figura N° 4.7 Desfase entre el desplazamiento y la velocidad (Elaboración propia)

El modelo utilizado en disipadores con cabeza de pistón con orificios como son los disipadores Taylor, es el modelo exponencial.

La ecuación de estos dispositivos es:

$$F_D = C[\text{sgn}(\dot{u})]|\dot{u}|^\alpha \quad (4.2)$$

Donde:

F_D : Fuerza en el disipador

C : Constante de amortiguamiento determinada principalmente por el diámetro de la compuerta y el área del orificio.

\dot{u} : Velocidad relativa en el disipador

α : Exponente de velocidad (0.3 - 1), el valor exacto de α depende de la forma de la cabeza del pistón; en edificaciones los valores más usados están en el rango de 0.4 - 0.6

Estos dispositivos generan una fuerza (F) que depende de un coeficiente de amortiguamiento (C) que está relacionado con el diámetro y área del orificio y debe ser definido por el proyectista, su cálculo depende del tipo de disipador (lineal o no lineal) y del amortiguamiento objetivo.

El exponente de velocidad α describe el comportamiento histerético del disipador, este exponente define la reacción del dispositivo ante los impactos de velocidad y depende de la forma de la cabeza del pistón.

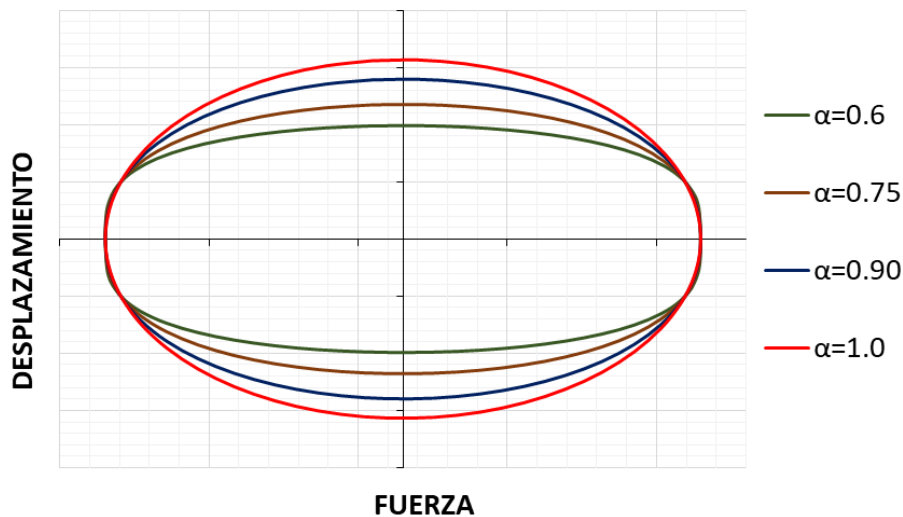


Figura N° 4.8 Lazo histerético en disipadores viscosos (Elaboración propia)

Se observa en la Figura N° 4.8, que el comportamiento histerético es de forma elíptica donde se alcanza valores máximos de fuerza para desplazamientos nulos.

Se observa además que para los disipadores con un $\alpha < 1$ se tienen menores fuerzas para un mismo nivel de desplazamientos.

A medida que el valor de α se reduce, la forma de la elipse va cambiando a una forma rectangular en donde el comportamiento se asemeja a un disipador de fluencia.

Cuando este exponente de velocidad α toma el valor de 1 se dice que el “disipador es lineal” ya que la fuerza en el disipador es proporcional a la velocidad relativa. Cuando el exponente de velocidad α toma valores mayores y/o menores a la unidad el disipador adquiere un comportamiento no lineal.

Los disipadores con α mayor a 1 no son comúnmente utilizados en edificaciones ya que se requieren velocidades altas para incrementar la fuerza en el disipador. (Figura N° 4.9)

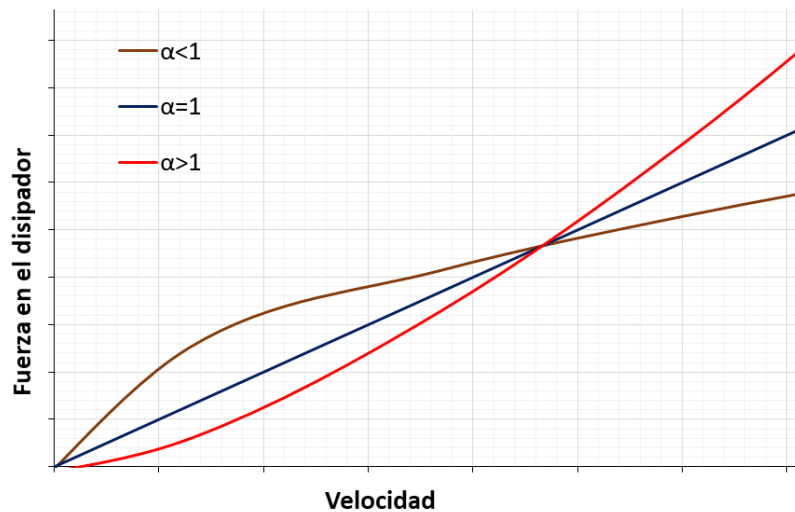


Figura N° 4.9 Relación Fuerza – Velocidad en disipadores viscosos (Elaboración propia)

4.5. FACTOR DE AMPLIFICACIÓN

El factor de amplificación depende de la disposición del disipador y se define como la relación del desplazamiento relativo del disipador u_D , y el desplazamiento de entrepiso u .

$$f = \frac{u_D}{u} \quad (4.3)$$

Así mismo, para un pórtico, la fuerza en el disipador F_D , se puede relacionar con la fuerza de entrepiso F .

$$F = fF_D \quad (4.4)$$

La fuerza en el disipador asumiendo un disipador lineal es:

$$F_D = C_0 \dot{u}_D \quad (4.5)$$

Usando las ecuaciones (4.3), (4.4) y (4.5) se tiene:

$$F = f^2 C_0 \dot{u} \quad (4.6)$$

4.6. DISPOSICIÓN Y CRITERIOS DE UBICACIÓN

La ubicación y disposición de los disipadores de energía influyen de manera significativa en la efectividad en el control de la respuesta; por tanto se recomienda la búsqueda de simetría en planta, además de la colocación de los disipadores en las zonas donde se presentan las mayores velocidades y en los entrepisos en las que se presentan las mayores distorsiones; sin embargo aún con estas recomendaciones es muy difícil lograr en un primer intento la respuesta deseada por lo que para lograr la óptima respuesta es necesario un proceso iterativo.

Existen diversas formas de disposición de los disipadores con las que se pueden lograr eficiencias diferentes, es decir lograr mejores o peores valores en cuanto al amortiguamiento, fuerzas en los disipadores, distorsiones de entrepiso, etc. Entre las disposiciones o arreglos más comunes tenemos:

4.6.1. Disposición diagonal

Esta disposición consiste en colocar al disipador en una disposición diagonal como su nombre lo indica, en esta disposición solo la componente horizontal de la fuerza del disipador participa en la absorción de fuerzas horizontales, por tanto es ésta la que proporciona el amortiguamiento. En este caso el factor de amplificación depende del ángulo de inclinación del brazo metálico que va a sostener el disipador y se expresa:

$$f = \cos \theta \quad (4.4)$$



Figura N° 4.10 Disipadores instalados en disposición diagonal (Taylor Devices)

4.6.2. Disposición Chevron

Esta disposición consiste en colocar los disipadores en forma horizontal paralela al plano del techo y/o el piso (CHEVRON invertida). Al tener los disipadores en dirección horizontal (dirección de la excitación) se tiene un factor de amplificación de 1, ya que el desplazamiento relativo en el disipador es igual al desplazamiento de entrepiso. Para lograr esta configuración se requieren arriostres diagonales los cuales están sometidos a esfuerzos de tracción y compresión estos esfuerzos deben ser controlados por pernos, planchas de anclaje, la cual conlleva generalmente a un reforzamiento de las vigas y columnas que forman el pórtico.

$$f = 1 \quad (4.5)$$



Figura N° 4.11 Disipadores instalados en disposición Chevron (Taylor Devices)

4.6.3. Disposición Toggle Brace

Aunque las configuraciones de instalación de disipadores en disposición diagonal y Chevron proporcionan comodidad para la construcción, vemos que los desplazamientos axiales en los dispositivos son menores o iguales a la Distorsión de piso, bajando así su eficiencia de disipación de energía (Constantinou et al., 2001).

El problema mencionado anteriormente podría resolverse mediante la adopción de las siguientes alternativas:

- Seleccionando un amortiguador de gran tamaño
- Amplificando el desplazamiento y la velocidad en el disipador.

Sin embargo, la primero resultará en un aumento del costo, por lo que la última puede ser una opción económica y eficiente para la configuración de la instalación del amortiguador, tal es el caso del sistema Toggle Brace.

En el sistema de Toggle Brace la fuerza de amortiguación se aplica directamente a la viga y puede afectar significativamente su diseño (Fig. 4.12 (a)).

El factor de amplificación del desplazamiento puede ser menor que lo que se espera debido a la flexibilidad de la viga. Por lo tanto, el coeficiente de amortiguamiento eficaz contribuido por el amortiguador podría ser menor que el valor de diseño esperado (Hwang et al., 2005). Para superar la insuficiencia

inherente a esta configuración de la instalación del amortiguador, Taylor propuso dos sistemas mejorados, como se muestra en la Figura 4.12 (b) y (c), en la que los elementos amortiguadores y tirantes están conectados directamente a los nudos viga-columna.

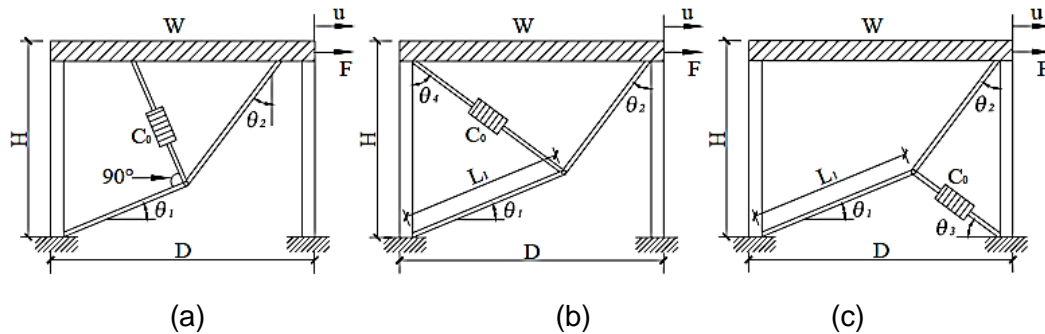


Figura N° 4.12 Instalación del sistema Toggle Brace (a) Configuración convencional. (b) Configuración mejorada Upper Toggle. (c) Configuración mejorada Lower Toggle. (Li Bo, Liang Xingwen)

Las investigaciones experimentales y analíticas en el sistema Toggle Brace se han llevado a cabo por muchos investigadores y su ventaja sobre las disposiciones tradicionales también fue validado (Hwang et al., 2005). Sin embargo, el procedimiento práctico para su uso en el diseño de este sistema (Toggle brace) sigue siendo en gran parte inexplorado.

En esta disposición, el movimiento axial del disipador se amplifica con respecto al desplazamiento lateral mediante el sistema de palanca, lo que conlleva a una magnificación en la efectividad facilitando de esta manera su uso en sistemas rígidos. El factor de amplificación para los sistemas tradicionales, Lower y Upper mostrada en la Fig. 4.11 (a), (b) y (c) son las siguientes respectivamente:

$$f = \frac{\sin \theta_2}{\cos(\theta_1 + \theta_2)} + \sin \theta_1 \quad (4.6)$$

$$f_L = \frac{\sin \theta_2 \sin(\theta_1 + \theta_3)}{\cos(\theta_1 + \theta_2)} \quad (4.7)$$



$$f_U = \frac{\sin \theta_2}{\cos(\theta_1 + \theta_2)} \cos(\theta_4 - \theta_1) + \sin \theta_4 \quad (4.8)$$



Figura N° 4.13 Disipadores instalados en disposición Upper y Lower Toggle (Taylor Devices)

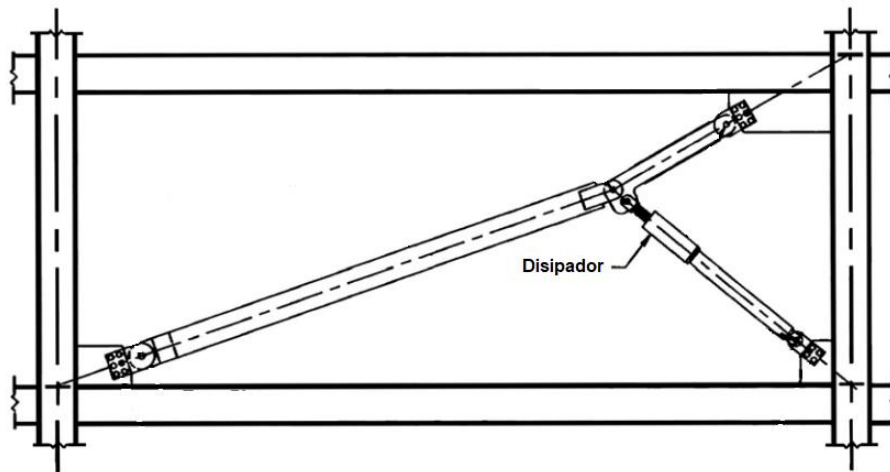


Figura N° 4.14 Esquema de instalación de disipador en disposición Lower Toggle

4.6.4. Disposición horizontal junto con aisladores de base

Como su nombre lo indica, se disponen los disipadores en forma horizontal en la base del edificio trabajando en forma conjunta con el sistema de aislamiento de base.

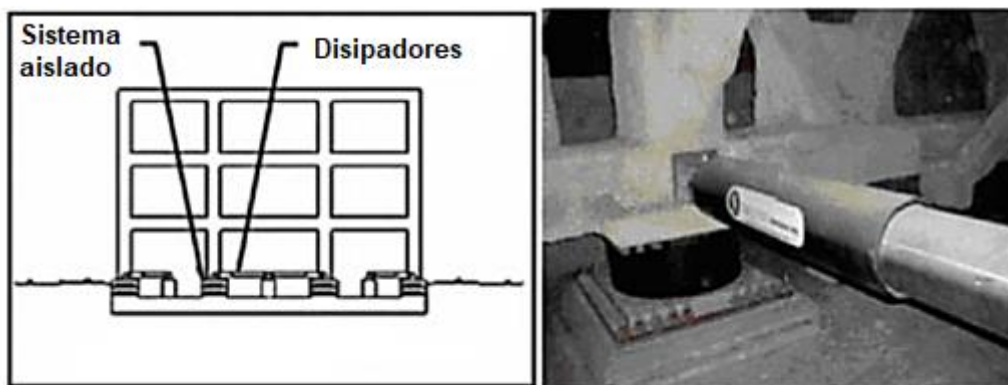


Figura N° 4.15 Disipadores instalados en la base de un edificio (Hart y Wong 2000)

A continuación se muestran las comparaciones en cuanto al factor de amplificación f de algunas disposiciones presentadas, así como de las variaciones en su forma clásica de las disposiciones Toggle Brace y Upper Brace. En la siguiente tabla se han considerado disipadores lineales, con un coeficiente de amortiguamiento C_0 , un peso de la estructura W , y el amortiguamiento se ha calculado de la siguiente manera:

$$\beta = \frac{C_0 f^2 g T}{4\pi W} \quad (4.10)$$

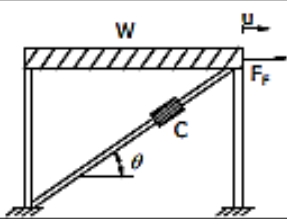
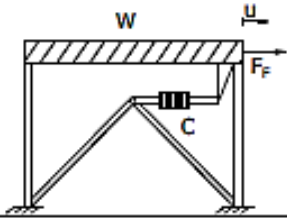
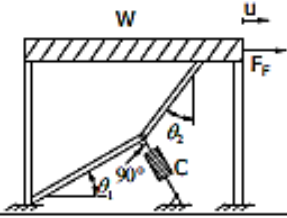
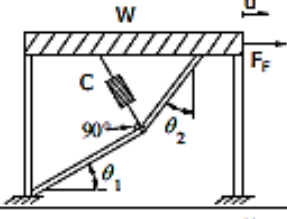
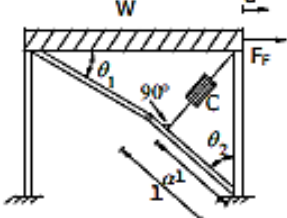
Diagonal		$f = \cos \theta$	$\theta = 37^\circ$ $f = 0.799$ $\beta = 0.032$
In-line		$f = 1.00$	$f = 1.00$ $\beta = 0.05$
Lower Toggle		$f = \frac{\sin \theta_2}{\cos(\theta_1 + \theta_2)}$	$\theta_1 = 31.9^\circ, \theta_2 = 43.2^\circ$ $f = 2.662$ $\beta = 0.344$
Upper Toggle		$f = \frac{\sin \theta_2}{\cos(\theta_1 + \theta_2)} + \sin \theta_1$	$\theta_1 = 31.9^\circ, \theta_2 = 43.2^\circ$ $f = 3.191$ $\beta = 0.509$
Reverse Toggle		$f = \frac{\alpha \cos \theta_1}{\cos(\theta_1 + \theta_2)} - \cos \theta_2$	$\theta_1 = 30^\circ, \theta_2 = 49^\circ, \alpha = 0.7$ $f = 2.521$ $\beta = 0.318$

Figura N° 4.16 Diversas disposiciones de disipadores viscosos, factores de amplificación y resultados para un pórtico de un solo nivel usando disipadores viscosos lineales. (Constantinou, 2007)

4.7. EFECTO DEL DISIPADOR DE FLUIDO VISCOSO SOBRE EL ESPECTRO DE RESPUESTA

Para poder mejorar el comportamiento sísmico de una estructura se puede optar por dos opciones

- Incrementando la rigidez y ductilidad de la estructura mediante elementos nuevos como placas de concreto, ensanchamiento de columnas, etc. Esto trae consecuencias como un aumento en la masa, en el periodo y en la fuerza sísmica.
- Una segunda opción es la de controlar la energía entrante a la estructura mediante disipadores fluido viscosos que disipan dicha energía transformándola en energía calorífica.

En las Figuras 4.17 y 4.18, se muestra, un espectro de desplazamiento y un espectro de aceleraciones de una cierta estructura. Supongamos que dicha estructura tiene un periodo fundamental " T_A ", el cual ha sido obtenido considerando solamente el amortiguamiento inherente de la estructura que es aproximadamente el 5% del amortiguamiento crítico; a este periodo se le asocia un desplazamiento espectral d_A (Punto "A").

Ahora supongamos que se desea disminuir el desplazamiento espectral de la estructura de " d_A " a " d_B " (Punto "B"). Para conseguir dicho objetivo se debe elegir una de las opciones mencionadas anteriormente. Si se añaden nuevos elementos y/o se aumentan las secciones de los elementos, se disminuirá el desplazamiento espectral, pero se incrementará la aceleración sobre la estructura (Punto "B").

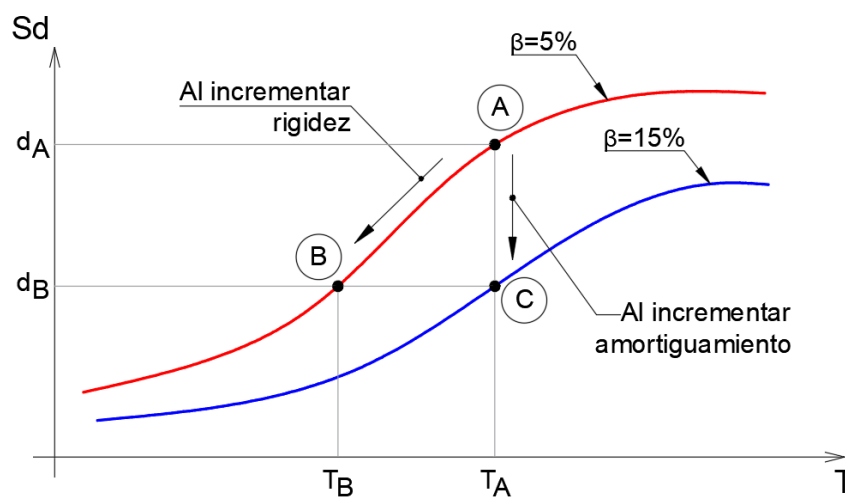


Figura N° 4.17 Espectro de desplazamiento para un incremento del amortiguamiento
(Elaboración propia)

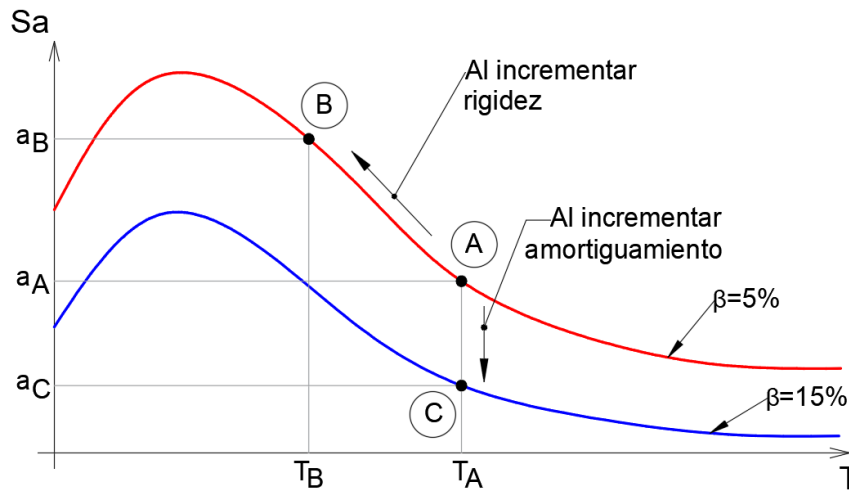


Figura N° 4.18 Espectro de desplazamiento para un incremento del amortiguamiento
(Elaboración propia)

Si se elige la segunda opción de incrementar la razón de amortiguamiento crítico de un 5% a un 15% por ejemplo, mediante adición de dispositivos de amortiguamiento viscoso, no sólo se disminuirá el desplazamiento espectral sino que además la aceleración sobre la estructura disminuirá de “ a_A ” a “ a_C ”.

4.8. RESPUESTA DE EDIFICIOS CON DISIPADORES FLUIDO VISCOSOS

El amortiguamiento efectivo en una estructura, resulta de la suma del amortiguamiento inherente de esta y del amortiguamiento añadido por los disipadores.

$$\beta_{ef} = \beta_0 + \beta_d \quad (4.10)$$

Donde β_0 es el amortiguamiento inherente de la estructura y β_d el amortiguamiento añadido por los disipadores fluidos viscosos.

En general el amortiguamiento añadido se puede calcular como:

$$\beta_d = \frac{\text{Energía disipada por los disipadores}}{4\pi (\text{Energía de deformación del sistema})} \quad (4.11)$$

Esta ecuación es usada por el FEMA356 para representar β_d .

$$\beta_d = \frac{\sum W_j}{4\pi W_k} \quad (4.12)$$

Donde:

$\sum W_j$: Es la energía disipada por el disipador j en un ciclo.

W_k : Es la energía de deformación elástica del pórtico.

Si consideramos un sistema de un solo grado de libertad equipado con disipadores fluidos viscosos, la energía disipada por el dispositivo es:

$$W_j = \oint F_D du \quad (4.13)$$

Del mismo modo la energía de deformación elástica del sistema:

$$W_k = ku^2/2 \quad (4.14)$$

Para el caso de disipadores lineales de varios grados de libertad y en disposición diagonal el FEMA 356 sugiere la siguiente expresión para el cálculo del amortiguamiento añadido por los disipadores lineales:

$$\beta_d = \frac{T \sum_j C_j \phi_{rj}^2 \cos^2 \theta_j}{4\pi \sum m_i \phi_i^2} \quad (4.15)$$

Para los disipadores no lineales se tiene:

$$\beta_d = \frac{\sum_i \lambda C_j \phi_{rj}^{1+\alpha} \cos^{1+\alpha} \theta_j}{2\pi A^{1-\alpha} \omega^{2-\alpha} \sum_i m_i \phi_i^2} \quad (4.16)$$

El amortiguamiento proporcionado por los disipadores puede calcularse estimando el trabajo que hacen los dispositivos en un ciclo de movimiento adoptando un modo de vibración.

Se muestran a continuación las consideraciones para la obtención de las formulas (4.15) y (4.16).

4.8.1. Disipadores de fluido viscoso lineales

Considerando un sistema de un solo grado de libertad equipado con disipadores de fluido viscoso elásticos a la que se le impone un desplazamiento sinusoidal como función tiempo-historia

$$u = u_0 \sin \Omega t \quad (4.17)$$

Donde u es el desplazamiento en el sistema incluyendo el disipador, u_0 es la amplitud del desplazamiento, y Ω es la frecuencia de excitación.

Considerando la forma simplificada de la ecuación (4.2) con α igual a 1:

$$F_D = C \dot{u} \quad (4.18)$$

Donde F_D es la fuerza en el disipador. Reemplazando la ecuación (4.18) y el desplazamiento de la ecuación (4.17) en (4.13) tenemos:

$$W_j = \oint C \dot{u} du = \oint C \dot{u}^2 dt$$

$$W_j = C u_0^2 \Omega \int_0^{2\pi/\omega} \cos(\Omega t) d(\Omega t)$$

$$W_j = \pi C u_0^2 \Omega \quad (4.19)$$

Esta relación concuerda con el área encerrada por el lazo histerético de un disipador.

Se puede expresar el amortiguamiento añadido por los disipadores como una fracción del amortiguamiento crítico de la estructura:

$$\beta_d = \frac{c}{c_{cr}} \quad (4.21)$$

Teniendo en cuenta:

$$c_{cr} = 2\sqrt{km} \quad (4.22)$$

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (4.23)$$

Reemplazando (4.21), (4.22) y (4.23) en (4.19) tenemos:

$$W_j = \pi \beta_d C_{cr} u_0^2 \Omega = 2\pi \beta_d \sqrt{km} u_0^2 \Omega$$

$$W_j = 2\pi \beta_d k u_0^2 \frac{\Omega}{\omega} \quad (4.24)$$

De la ecuación (4.14)

$$W_j = 4\pi \beta_d W_k \frac{\Omega}{\omega} \quad (4.25)$$

El coeficiente de amortiguamiento atribuido al amortiguador puede entonces expresarse como:

$$\beta_d = \frac{W_j \Omega}{4\pi W_k \omega} \quad (4.26)$$

Bajo excitaciones sísmicas, ω y Ω son esencialmente equivalentes y la ecuación (4.26) se reduce a:

$$\beta_d = \frac{W_j}{4\pi W_k} \quad (4.27)$$

Esta ecuación coincide con la presentada en la ecuación (4.12)

Luego de la ecuación (4.19) considerando que bajo excitaciones sísmicas, ω y Ω son esencialmente equivalentes ($\omega = \Omega$) tenemos:

$$W_j = \pi C u_0^2 \omega \quad (4.28)$$

Reemplazando (4.14) y (4.28) en (4.27) y simplificando resulta:

$$\beta_d = \frac{TC u_0^2}{4\pi m u} \quad (4.29)$$

Suponiendo que el disipador se instala en una disposición diagonal y con un ángulo de inclinación θ , tenemos:

$$\beta_d = \frac{TCu_r^2 \cos^2 \theta}{4\pi mu} \quad (4.30)$$

Donde u_r es el desplazamiento relativo del pórtico.

Extendiendo el desarrollo del sistema de un grado de libertad, a un sistema de múltiples grados de libertad, como se muestra en la Fig. N° 4.20.

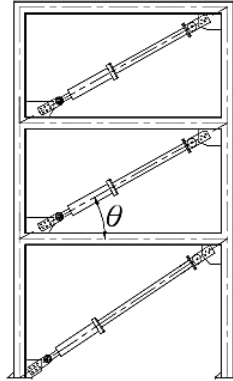


Figura N° 4.19 Pórtico de varios grados de libertad con disipadores viscosos (Jenn Shin - Huang)

La energía disipada por los amortiguadores a partir de la ecuación (4.28) puede ser expresada como:

$$\sum_j W_j = \sum_j \pi C_j u_j^2 \omega = \frac{2\pi^2}{T} \sum_j C_j u_j^2 \quad (4.31)$$

Donde:

u_j : Es el desplazamiento axial relativo en el disipador entre sus dos nodos.

Usando el método de energía de deformación modal y considerando una disposición diagonal tenemos:

$$u_j^2 = \phi_{rj}^2 \cos^2 \theta_j \quad (4.32)$$

Por tanto, la energía disipada por los amortiguadores puede escribirse como:

$$\sum_j W_j = \frac{2\pi^2}{T} \sum_j C_j \phi_{rj}^2 \cos^2 \theta_j \quad (4.33)$$

Donde:

ϕ_{rj} : Desplazamiento relativo horizontal en el amortiguador j correspondiente a la primera forma de modo

θ_j : Es el ángulo de inclinación del amortiguador j.

Evidencia experimental ha demostrado que si el coeficiente de amortiguamiento C se incrementa entonces los modos de vibración más altos de la estructura se verán suprimidos; como consecuencia de ello, solamente el primer modo del

sistema usualmente es considerado en el procedimiento simplificado de aplicaciones prácticas.

Por tanto expresaremos la energía de deformación elástica en función del primer modo.

Expresando matricialmente la ecuación (4.14) tenemos la energía de deformación elástica del pórtico:

$$W_k = \Phi_1^T [K] \Phi_1 / 2 = \Phi_1^T \omega^2 [m] \Phi_1 / 2 = \sum \omega^2 m_i \phi_i^2 / 2$$

$$W_k = \frac{2\pi^2}{T^2} \sum m_i \phi_i^2 \quad (4.34)$$

Donde:

[K]: Matriz de rigidez

[m]: Matriz de masas

Φ_1 : Primera forma de modo del sistema

ϕ_i : Es el desplazamiento de la primera forma de modo del entrepiso i

m_i : Es la masa del entrepiso i

Reemplazando las ecuaciones (4.33), (4.34) en (4.27); tenemos:

$$\beta_d = \frac{T \sum_j C_j \phi_{rj}^2 \cos^2 \theta_j}{4\pi \sum m_i \phi_i^2} \quad (4.35)$$

La ecuación 4.35 es la planteada por el FEMA 356, sin embargo de la demostración se logra observar que ésta ha sido desarrollada en base a una disposición diagonal de los disipadores como queda evidenciado en la ecuación (4.32), por tanto para un factor de amplificación general la ecuación (4.35) se puede escribir como:

$$\beta_d = \frac{T \sum_j C_j \phi_{rj}^2 f_j^2}{4\pi \sum m_i \phi_i^2} \quad (4.36)$$

Cabe recalcar que no existen procedimientos sustanciales sugeridos por códigos de diseño para la distribución de los valores de C en todo el edificio. En el diseño de los amortiguadores puede ser conveniente distribuir los valores de C iguales para cada piso, sin embargo, muchos resultados experimentales demuestran que la eficacia de los amortiguadores en los pisos superiores es menor que en los pisos inferiores; por lo tanto es recomendable que los valores de C se reduzcan conforme se va aumentando la altura y en proporción a la disminución de la cortante por piso.

4.8.2. Disipadores de fluido viscoso no lineales

Considerando un sistema de un solo grado de libertad equipado con disipadores de fluido viscoso elásticos a la que se le impone un desplazamiento sinusoidal, la velocidad en el sistema viene dado por:

$$\dot{u} = \omega u_0 \sin \omega t \quad (4.37)$$

La fuerza en el disipador en dispositivos no lineales es:

$$F_D = C\dot{u}^\alpha \quad (4.38)$$

Reemplazando las ecuaciones (4.37) y (4.38) en la ecuación (4.13), la energía disipada por el amortiguador no lineal en un ciclo debido al movimiento sinusoidal:

$$\begin{aligned} W_j &= \oint F_D du = \int_0^{2\pi/\omega} F_D \dot{u} dt = \int_0^{2\pi/\omega} C \dot{u}^{1+\alpha} |dt \\ W_j &= C(\omega u_0)^{1+\alpha} \int_0^{2\pi/\omega} |(\sin^{1+\alpha} \omega t)| dt \end{aligned} \quad (4.39)$$

Teniendo $\omega t = 2\theta$ y $dt = \frac{2}{\omega} d\theta$ la ecuación (4.39) se puede escribir como:

$$\begin{aligned} W_j &= C(\omega u_0)^{1+\alpha} \frac{2}{\omega} \int_0^\pi |(\sin^{1+\alpha} 2\theta)| d\theta \\ W_j &= 2^{2+\alpha} C \omega^\alpha u_0^{1+\alpha} \int_0^{\pi/2} 2(\sin^{1+\alpha} \theta)(\cos^{1+\alpha} \theta) d\theta \\ W_j &= 2^{2+\alpha} C \omega^\alpha u_0^{1+\alpha} \frac{\Gamma^2(1+\alpha/2)}{\Gamma(2+\alpha)} \end{aligned} \quad (4.40)$$

Donde Γ es la función gamma.

Siguiendo un procedimiento similar al usado para un grado de libertad con disipadores lineales viscosos, el coeficiente de amortiguamiento de un sistema de un grado de libertad con un amortiguador no lineal es:

$$\beta_d = \frac{\lambda C \omega^{\alpha-2} u_0^{\alpha-1}}{2\pi m} \quad (4.41)$$

En donde:

$$\lambda = 2^{2+\alpha} \frac{\Gamma^2(1+\alpha/2)}{\Gamma(2+\alpha)} \quad (4.42)$$

Por conveniencia en aplicaciones prácticas; los valores de λ son tabuladas del FEMA 274 basadas en la ecuación (4.42). Cabe indicar que el coeficiente de amortiguamiento determinada por la ecuación (4.41) depende de la amplitud del desplazamiento u_0 .

Tabla N°4.1 Valores del Parámetro Lambda (FEMA 274)

Coeficiente de velocidad α	Valores del parámetro lambda λ
0.25	3.7
0.50	3.5
0.75	3.3
1.00	3.1
1.25	3.0
1.50	2.9
1.75	2.8
2.00	2.7

Para sistemas con múltiples grados de libertad con amortiguadores no lineales, las ecuaciones (4.10) y (4.27) son usadas para representar el coeficiente de amortiguamiento efectivo de todo el sistema, y el coeficiente de amortiguamiento atribuido a los disipadores viscosos no lineales se muestra a continuación.

Considerando solamente el primer modo, la energía de deformación es:

$$W_k = \omega^2 \sum m_i u_i^2 / 2 \quad (4.43)$$

Suponiendo que todos los amortiguadores tienen el mismo coeficiente de velocidad α y reemplazando las ecuaciones (4.41), (4.42) y (4.43) en la (4.27), el coeficiente de amortiguamiento atribuido a los disipadores es:

$$\beta_d = \frac{\sum_i \lambda C_j u_{rj}^{1+\alpha} \cos^{1+\alpha} \theta_j}{2\pi\omega^{2-\alpha} \sum_i m_i \phi_i^2} \quad (4.44)$$

Donde u_{rj} es el desplazamiento relativo entre los nodos del disipador j en la dirección horizontal. Puesto que sólo se considera el primer modo, la respuesta de desplazamiento se puede expresar como:

$$u_i = A\phi_i \quad (4.45)$$

Donde ϕ_i es primer desplazamiento modal del grado de libertad " i ", y A es la amplitud. Finalmente, reemplazando las ecuaciones (4.44) y (4.45) en la ecuación (4.10):

$$\beta_{ef} = \beta_0 + \frac{\sum_i \lambda C_j \phi_{rj}^{1+\alpha} \cos^{1+\alpha} \theta_j}{2\pi A^{1-\alpha} \omega^{2-\alpha} \sum_i m_i \phi_i^2} \quad (4.46)$$

En la que similar al caso anterior, para un factor de amplificación que depende de la disposición del disipador tenemos:

$$\beta_{ef} = \beta_0 + \frac{\sum_i \lambda C_j \phi_{rj}^{1+\alpha} f_j^{1+\alpha}}{2\pi A^{1-\alpha} \omega^{2-\alpha} \sum_i m_i \phi_i^2} \quad (4.47)$$

4.9. RECOMENDACIONES DEL USO DE LOS DISIPADORES DE FLUIDO VISCOSO EN EDIFICACIONES

Las variables más importantes dentro de un proyecto de edificaciones con disipadores de fluido viscoso son:

a) En función del tipo de sistema estructural

La capacidad de disipar energía de estos dispositivos aumenta conforme aumenta el desplazamiento en su interior. Por ello es conveniente el uso de estos disipadores en edificaciones flexibles (Sistema de pórticos o duales) ya que estos permitirían un mayor desplazamiento relativo mayor en el interior del dispositivo, así mismo, la disposición Toggle Brace puede ser usada en edificaciones rígidas ya que mejoran su respuesta ante acciones sísmicas en comparación con las disposiciones diagonal y Chevron.

b) En función de la edad de la estructura

Estos dispositivos vienen siendo usados con fines de reforzamiento estructural en estructuras antiguas. Esta opción trae consigo la ventaja de mejorar el desempeño de la estructura sin añadir elementos como muros de concreto que rigidicen la estructura; adicionalmente son de fácil instalación ya que generalmente van adosados a los pórticos; adicional a esto controlan la excesiva vibración que pudiese ocasionar fallas en elementos no estructurales.

c) En función de la estética o arquitectura del proyecto

Estos sistemas al estar integrados a los pórticos fácilmente se pueden esconder en muros de drywall de esta manera se tiene un impacto mínimo en la integridad arquitectónica del edificio. A pesar de esto algunos arquitectos consideran como una mejora arquitectónica la exposición de los disipadores y además se tiene un aumento considerable del valor del proyecto.



Figura N° 4.20 Pórtico con disipadores escondidos en drywall (Maribel Burgos)

d) En función del mantenimiento o vida útil

En general, los dispositivos de fluido viscoso no requieren mantenimiento, incluso luego de un evento sísmico, se dice que estos dispositivos sobrepasan los 50 años sin necesidad de mantenimiento; esta afirmación cuenta con el respaldo de la industria militar, inclusive existen muchas edificaciones a nivel mundial que demuestran la veracidad de esta propiedad.

e) En función del costo y las condiciones del proyecto

El costo de análisis, diseño, fabricación e instalación está en función de diversos factores:

- Condiciones del suelo
- Tipo de estructura
- Desempeño deseado
- Número de disipadores
- Capacidad de cada disipador
- Refuerzo requerido de los elementos estructurales existentes
- Interrupción en la ocupación del edificio durante la construcción o reforzamiento

El proyectista encargado debe tener un entendimiento claro de las propiedades de este sistema y realizar un racional proceso de diseño teniendo muy en claro los objetivos de diseño establecidos.

La aplicación de estos sistemas son un valor agregado también desde el punto de vista comercial para aquellos edificios destinados a oficinas o departamentos ya que un edificio con disipadores de energía siempre será superior al de un edificio convencional.

f) En función de la importancia de la estructura

En estructuras importantes y esenciales el costo de añadir estos sistemas es relativamente bajo comparados con los gastos que se tendría que asumir en reparación estructural después de un evento sísmico además de los daños en los elementos no estructurales.

g) En función del tipo de dispositivo seleccionado

Los disipadores visco elásticos y de fluido viscoso inician el amortiguamiento desde sismos pequeños hasta severos además de cero mantenimiento en el caso de los disipadores de fluido viscoso; en cambio los disipadores histeréticos y de fricción requieren un suficiente movimiento relativo para empezar su acción de disipación además de que requieren un mantenimiento y/o reemplazo total después de un evento sísmico.

CAPITULO V. METODOLOGÍA DE DISEÑO

5.1. CÓDIGOS APLICABLES

Los dos códigos que tienen las disposiciones más amplias para la aplicación de dispositivos de disipación de energía son ASCE7-10, FEMA 356.

El ASCE 7-10 y el FEMA tienen disposiciones sobre requisitos generales, el modelado de dispositivos, procedimientos de análisis, requisitos de sistema detallados, diseño y construcción de revisión y pruebas requeridas de los dispositivos.

Así mismo, se tiene presente el uso de la norma peruana sismorresistente E030 para el cálculo de espectros y distorsiones reglamentarias.

5.2. DISTORSIÓN DE ENTREPISO

Nuestra norma técnica de edificaciones E030 establece límites para el desplazamiento relativo lateral de entrepiso (distorsión). Dichos límites se presentan en la siguiente tabla.

Tabla N° 5.1 Límites para la distorsión de entrepiso

LÍMITES PARA LA DISTORSIÓN DE ENTREPISO	
Material Predominante	(Δ_i/h_{ei})
Concreto Armado	0.007
Acero	0.01
Albañilería	0.005
Madera	0.01
Edificios de concreto armado con muros de ductibilidad limitada	0.005

En la siguiente tesis se solo se tomaran en cuenta edificios de concreto armado, por lo tanto la distorsión objetivo será menor a 0.007.

5.3. REDUCCIÓN DE LA RESPUESTA

El ASCE 7-10 Capítulo 18 indica que, se puede reducir la respuesta de la estructura ante una sollicitación sísmica, debido al incremento del amortiguamiento proporcionado por los disipadores. Esa reducción viene dada por:

$$V_{min} = \frac{V}{B_{v+1}} \quad (5.1)$$

Donde V es la fuerza cortante basal que se obtiene del análisis sin la incorporación de los disipadores y B es el factor de reducción de respuesta en función del amortiguamiento equivalente. El valor mínimo para el cortante es:

$$V_{min} = 0.75V \quad (5.2)$$

Este factor B en un análisis espectral se puede interpretar como una reducción en el espectro de pseudoaceleraciones de desplazamientos y de fuerza cortante.

Es sabido que el amortiguamiento equivalente se expresa como la sumatoria entre el amortiguamiento inherente de la estructura, y el amortiguamiento viscoso, cada uno de estos factores se expresan en fórmulas expuestas en el capítulo 18 del ASCE 7-10.

A cada valor de " β " le corresponde un factor de reducción " B " que es el factor para reducir la respuesta de la estructura sin disipadores.

Se puede obtener un valor aproximado del factor de reducción " B ", empleado en el método estático lineal. Si la máxima Distorsión obtenida del análisis sin disipadores es mayor que la Distorsión objetivo, se determina el cociente:

$$B = \frac{\text{Deriva Máxima}}{\text{Deriva Objetivo}} \quad (5.3)$$

Donde B es el factor de reducción de la respuesta sísmica para llegar a la Distorsión objetivo, esta aproximación puede ser efectiva en para estimar la Distorsión objetivo en edificios en los que se incorpore disipadores lineales; sin embargo, para edificios con disipadores no lineales esta aproximación no es buena.

Con este factor B se puede determinar el amortiguamiento efectivo β_{eff} que desarrollará la estructura para alcanzar la Distorsión objetivo y se calcula mediante la fórmula de Newmark:

$$B = \frac{2.31 - 0.41 \ln(5)}{2.31 - 0.41 \ln(\beta_{eff})} \quad (5.4)$$

Nótese que esta ecuación brinda resultados iguales a los presentados en la Tabla N° 5.2.

Tabla N° 5.2 Factor de reducción de la respuesta sísmica en función del amortiguamiento equivalente (ASCE 7-10, Capítulo 18)

Amortiguamiento efectivo β	Coficiente de amortiguamiento
≤ 2	0.8
5	1.0
10	1.2
20	1.5
30	1.8
40	2.1
50	2.4
60	2.7
70	3.0
80	3.3
90	3.6
≥ 100	4.0

5.4. METODOLOGÍA GENERAL DE DISEÑO

El diseño de estructuras con disipadores de fluido viscoso, es un proceso iterativo en la que se busca obtener una respuesta óptima de la estructura, la cual se debe buscar modelando y analizando para diversos arreglos; este proceso se realiza de manera analítica mediante el uso de potentes programas de cálculo estructural como el SAP2000 o ETABS.

5.4.1. Análisis Tiempo – Historia de la edificación sin disipadores de energía

Se realiza un análisis Tiempo – Historia de la edificación sin la incorporación de los disipadores de energía, la cual puede ser una edificación nueva o una edificación existente (evaluación).

Se determinan los periodos naturales así como sus modos y Distorsiones correspondientes, empleando la norma sismorresistente vigente con el objetivo de verificar la respuesta de la estructura sin disipadores.

Para el caso de una edificación existente se procede a realizar una evaluación estructural, para ello es necesario la recopilación de datos como son:

- Recopilación de planos que en muchos casos estos existen, para ello se deberá proceder con el levantamiento estructural, es decir, realizar la medición de ejes, dimensiones de columnas, muros, vigas que servirán para la realización del modelo matemático.
- Ensayos de laboratorio a fin de hallar las propiedades de los materiales.

- Ensayos de laboratorio a fin de hallar las propiedades de los materiales.
- Escaneo de elementos estructurales a fin de encontrar el diámetro de las varillas de acero utilizadas.
- Medición de vibraciones ambientales.

5.4.2. Distorsión objetivo

Del análisis de la estructura sin disipadores se obtiene la distorsión máxima y se debe establecer una distorsión objetivo, que puede establecerse con la ayuda de la norma E-0.30.

Una forma de estimar el amortiguamiento es haciendo uso de la ecuación (5.3), para determinar así el factor de reducción de la respuesta sísmica, y con ello obtener un amortiguamiento objetivo mediante la ecuación (5.4), o mediante la Tabla N° 5.10.

Otra forma es asumiendo un amortiguamiento viscoso añadido por los dispositivos, es recomendable iniciar las iteraciones con amortiguamiento viscosos que varían entre 15% - 25%.

5.4.3. Determinación de los parámetros de los disipadores

• Coeficiente de amortiguamiento

En el caso de los disipadores fluido viscosos, se debe suponer un coeficiente de amortiguamiento y un exponente de velocidad propio de cada disipador.

El Código FEMA presenta:

Para disipadores lineales y:

$$\beta_d = \frac{T \sum_j C_j \phi_{rj}^2 \cos^2 \theta_j}{4\pi \sum m_i \phi_i^2} \quad (5.5)$$

Para disipadores no lineales.

$$\beta_d = \frac{\sum_i \lambda C_j \phi_{rj}^{1+\alpha} \cos^{1+\alpha} \theta_j}{2\pi A^{1-\alpha} \omega^{2-\alpha} \sum_i m_i \phi_i^2} \quad (5.6)$$

Cabe indicar que estas dos ecuaciones de desarrollaron en la sección 4.8; la utilización de estas ecuaciones sirve solamente para iniciar con el proceso de iteración ya que el punto de partida para la deducción de estas ecuaciones provienen de excitaciones armónicas; además están consideradas solamente para el uso de disipadores instalados en diagonal.

- **Rigidez del brazo metálico “K”**

En el caso de que los amortiguadores estén adosados a la estructura por medio de brazos metálicos (diagonales), la rigidez axial del sistema brazo-disipador puede hallarse mediante la fórmula:

$$K = \frac{EA}{L} \quad (5.7)$$

Donde:

E: Coeficiente de elasticidad del material

A: Área de la sección del brazo

L: Longitud del brazo metálico

5.4.4. Análisis Tiempo – Historia con disipadores (FNA).

- **Análisis no lineal rápido (FNA)**

De acuerdo al doctor Wilson: ***“La respuesta de estructuras reales al quedarse sujetas a una gran excitación dinámica, muchas veces implica un comportamiento no lineal que incluye los efectos de grandes desplazamientos y/o propiedades de materiales lineales.”***

El problema más complicado en el análisis no lineal es el asociado a grandes deformaciones, ya que esto requiere una gran cantidad de esfuerzo de cómputo y tiempo.

Sin embargo para estructuras con un número limitado de elementos no lineales como pueden ser aisladores de base, disipadores de energía, pueden ser tratados mediante el FNA (Fast Non Linear Analysis). Este método resulta muy adecuado para los análisis tiempo – historia ya que se usan vectores dependientes de carga Ritz ortogonales de rigidez y masa del sistema estructural elástico para reducir el tamaño del sistema no lineal.

Como condición para aplicar este tipo de análisis, los modelos realizados en el programa deben cumplir con lo siguiente:

- La estructura debe ser lineal y elástica.
- Tener un número determinado de elementos no-lineales.
- El comportamiento no lineal estará asignado solo a los elementos tipo “Link”.

La eficiencia del método se debe a la separación del vector de fuerza no-lineal $R_{NL}(t)$ de la matriz elástica de rigidez y las ecuaciones amortiguadas del movimiento, por lo que la ecuación de equilibrio dinámico puede ser expresada de la siguiente manera:

$$M\ddot{u}(t) + C\dot{u}(t) + Ku(t) + R_{NL}(t) = R(t) \quad (5.8)$$

Donde M , C y K son las matrices de masa, amortiguamiento y rigidez respectivamente. Los vectores dependientes del tiempo son $\ddot{u}(t)$, $\dot{u}(t)$, $u(t)$ y $R(t)$ que son la aceleración, la velocidad, el desplazamiento y la carga externa aplicada en el punto nodal respectivamente y $R_{NL}(t)$ es el vector de fuerza nodal global de la suma de las fuerzas en los elementos no lineales.

De acuerdo a Wilson, se pueden agregar al modelo matemático “elementos elásticos efectivos” en reemplazo de los elementos lineales, estos elementos son de rigidez cualquiera $K_e u(t)$, agregando este término a ambos lados de la ecuación (5.8) se tiene:

$$M\ddot{u}(t) + C\dot{u}(t) + (K + K_e)u(t) = R(t) - R_{NL}(t) + K_e u(t) \quad (5.9)$$

Por lo tanto las ecuaciones exactas del equilibrio dinámico son:

$$M\ddot{u}(t) + C\dot{u}(t) + \bar{K}u(t) = \bar{R}(t) \quad (5.10)$$

En resumen los Vectores Ritz de rigidez y masa ortogonal, dependientes de la carga, condensan las relaciones de equilibrio dentro del sistema estructural elástico. Para cada incremento de tiempo, ecuaciones modales desacopladas son resueltas de manera exacta, mientras que las fuerzas dentro de los GDL no-lineales, definidos en $R_{NL}(t)$, son resueltas de manera iterativa por un proceso de convergencia para satisfacer el equilibrio.

• Análisis Tiempo - Historia

Para realizar un análisis tiempo – historia, el primer paso a dar es la selección de registros sísmicos; estos registros deben cumplir ciertas características antes de ser usados: Se deben elegir registros de zonas con características sismológicas comunes, similares condiciones de suelo, etc.

Una vez seleccionado los registros adecuados, es necesario escalar dichos registros de manera que se ajusten a la intensidad de los terremotos esperados para el emplazamiento específico del proyecto en estudio (Oyarso, C. 2009).

Cabe señalar que en la comunidad científica no existe un completo acuerdo en cómo escalar estos registros, esto queda demostrado al comparar diferentes métodos propuestos en las diferentes normativas, como las normas europeas, las directrices norteamericanas y la norma neozelandesa.

La presente tesis hará uso de los lineamientos del código ASCE/SEI 41-06, la cual recomienda el uso de al menos tres registros reales, representativos, y se adoptará para el diseño los valores máximos del parámetro de interés (fuerza axial, corte, momento flector y deformaciones), obtenidas de aplicar cada uno de ellos. Si se utilizan siete o más registros, se recomienda usar la respuesta estructural promedio para obtener los parámetros de diseño.

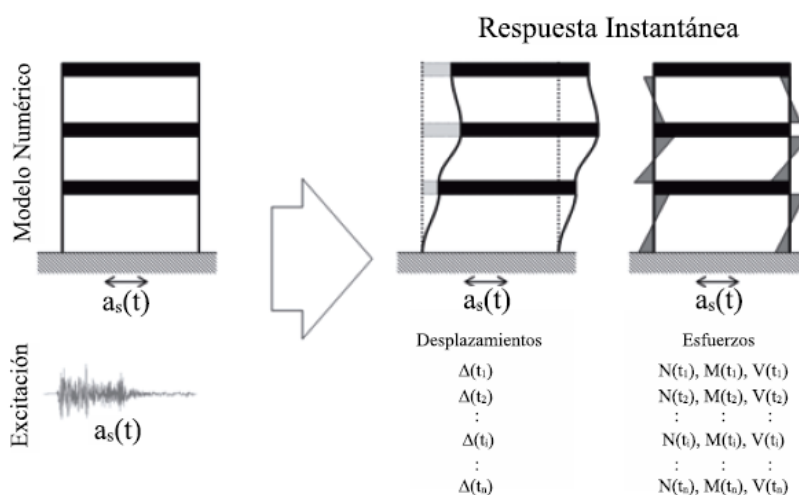


Figura N° 5.1 Representación esquemática de un análisis tiempo-historia (Oyarso 2009)

5.4.5. Respuesta de la estructura con sistema de amortiguamiento.

Una vez realizado el análisis se evalúa el nivel de respuesta deseado, si este no es alcanzado se realiza otra iteración cambiando los valores de C y α , la cantidad de disipadores así como su ubicación hasta alcanzar la respuesta deseada.

En teoría, existen muchas soluciones para alcanzar el nivel de respuesta deseado pero solo una de estas es la óptima la cual no siempre es posible encontrar, sin embargo, en la mayoría de diseños estructurales, el objetivo es un buen diseño final, es decir, que cumpla con los requerimientos planteados, que sea razonable y económico (Hart y Wong, 2000).

Además de ello se debe evaluar el balance energético del conjunto a fin de apreciar la participación de los disipadores en la disipación de energía total; además de ello se puede evaluar la efectividad y disposición de los disipadores.

- **Verificación del amortiguamiento objetivo**

Una vez alcanzado el desplazamiento objetivo, también se debe verificar si se logra alcanzar el amortiguamiento objetivo, por tanto se opta por someter a la estructura a una prueba de vibración libre y para ello se utilizará una función pulso.

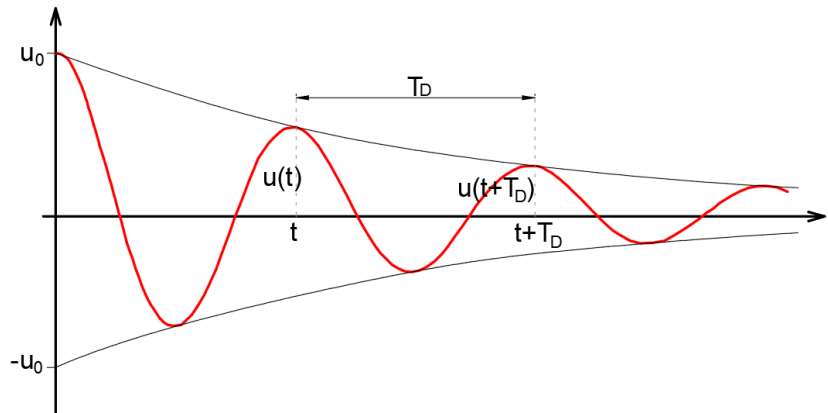


Figura N° 5.2 Vibración libre amortiguada. Amplitudes sucesivas (Elaboración propia)

$$\ln \left(\frac{u(t)}{u(t+nT_D)} \right) \cong \frac{2n\pi\beta}{\sqrt{1-\beta^2}} \quad (5.9)$$

5.4.6. Diseño estructural.

Como se vio en la sección 5.4, el incremento de amortiguamiento permite una reducción de la demanda para los elementos que no forman parte del sistema de amortiguamiento, esta demanda puede ser reducida hasta en un 25% es decir que puede reducirse el espectro de la norma de hasta un 25% con fines de diseño, por tanto se podrán diseñar los elementos no que forman parte del sistema de amortiguamiento con un espectro reducido.

Sin embargo, se puede realizar el diseño de los elementos considerando los esfuerzos máximos del análisis tiempo historia con los dispositivos añadidos, ya que en dicho análisis se considera el amortiguamiento añadido.

En la Fig. N° 5.3 se observa la reducción del espectro de la norma según es ASCE 7-10.

Si se encuentra un valor del factor B de 1.75 ($\beta \approx 28\%$), se debería reducir espectro por dicho factor, sin embargo, la reducción máxima debe ser del 75% como se indica en el ASCE 7-10.

En la siguiente figura se muestra la reducción del espectro de diseño para una estructura aporticada.

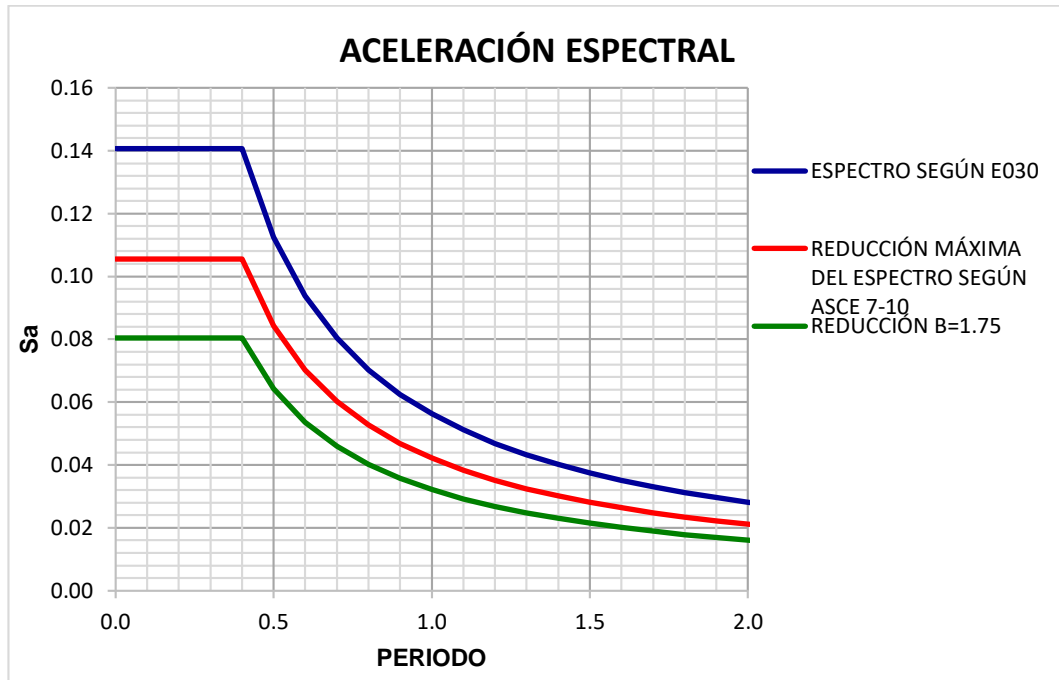


Figura N° 5.3 Reducción del espectro según ASCE 7-10

a) Diseño de dispositivos de amortiguamiento y conexiones metálicas.

Para el caso del sistema de amortiguamiento estos serán diseñados para el sismo máximo probable.

Con las fuerzas de diseño obtenidas se procede a agrupar los dispositivos de acuerdo a la magnitud de la fuerza que reciben.

Finalmente se procede al diseño de los disipadores a partir de cuadros provistos por el fabricante, los cuales se muestran a continuación.

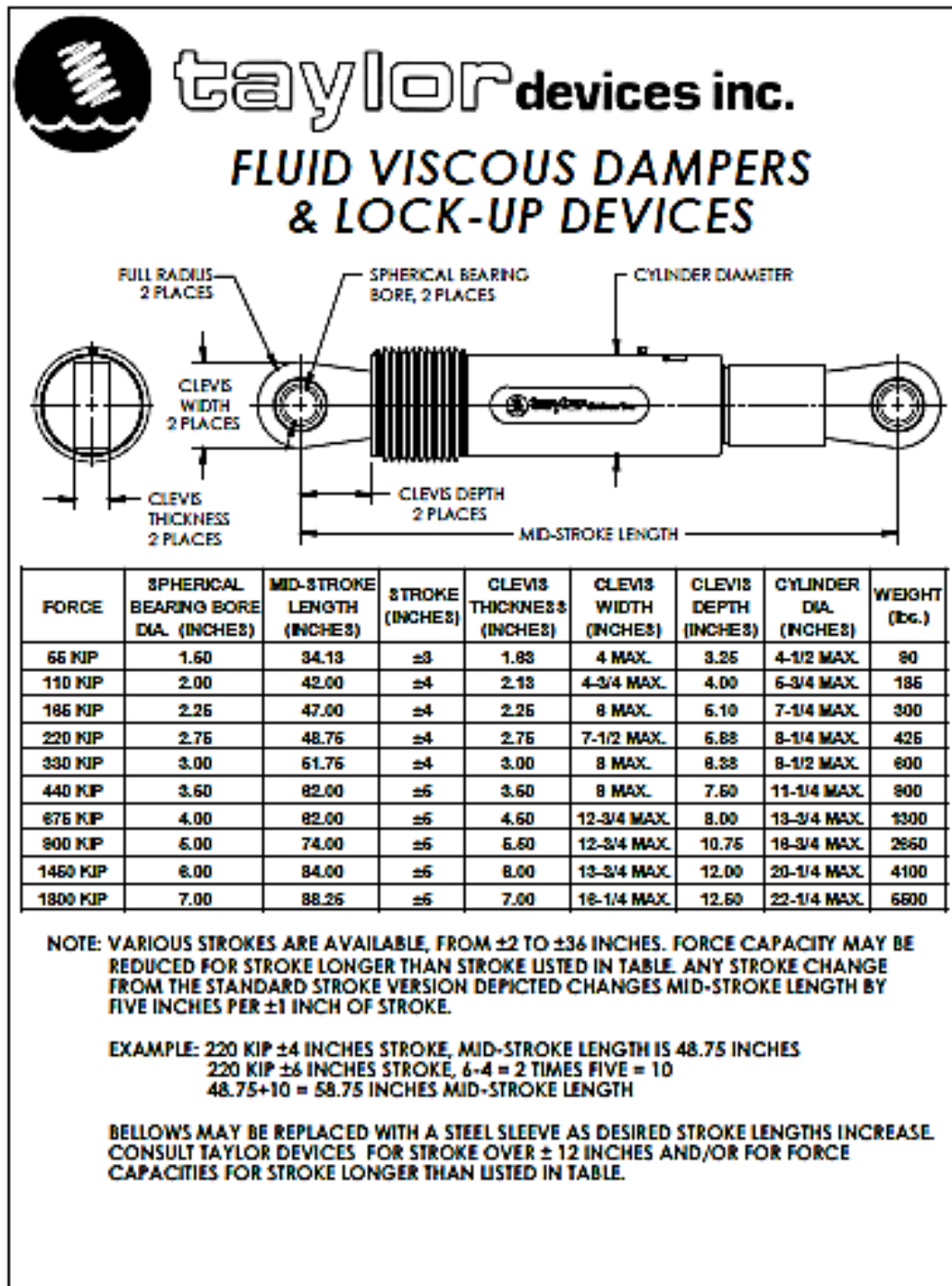


Figura N° 5.4 Propiedades de los disipadores (Taylor Devices)

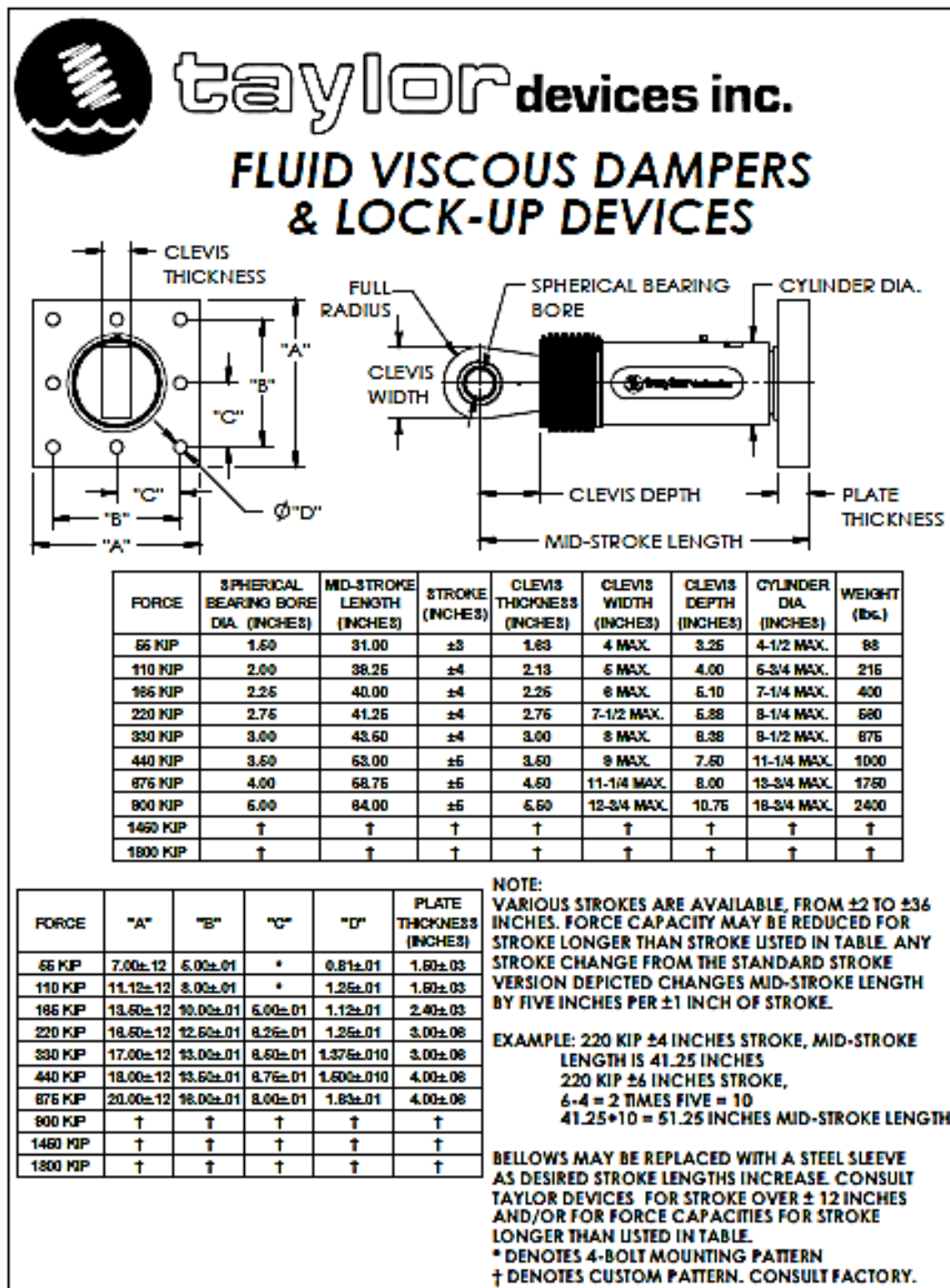


Figura N° 5.5 Propiedades de los disipadores (Taylor Devices)

5.4.7. Esquema de la metodología

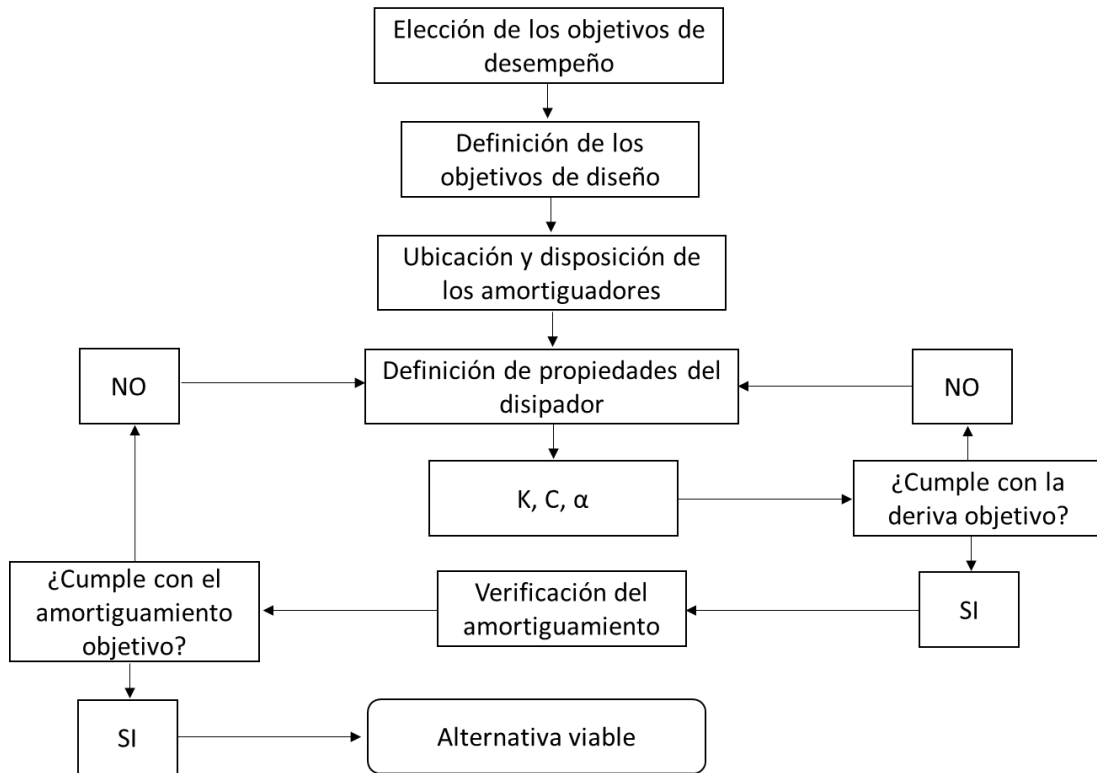


Figura N° 5.6 Esquema de la metodología de diseño con disipadores (Guevara y Torres 2012)

CAPITULO VI. EVALUACIÓN DE LA EFECTIVIDAD DE LOS DISIPADORES FLUIDO VISCOSOS

Para la evaluación de la efectividad de los disipadores fluido viscosos DFV en función de su disposición se ha empleado una edificación aporricada de 4 niveles.

6.1. DESCRIPCIÓN DE LA ESTRUCTURA

Se consideró un edificio regular destinado al uso de oficinas de 04 niveles.

Las características más importantes de la edificación se describen en la tabla siguiente:

Tabla N° 6.1 Características del edificio considerado

CARACTERÍSTICAS DEL EDIFICIO		
Ubicación	Cercado de Lima	
Uso	Edificio de Oficinas	
Niveles	4 Niveles	
	1° Piso	H=3.50 m.
	Piso Típico	H=2.7 m.
Sistema estructural	Pórticos de concreto armado	
f'c (kg/cm²)	210	
Fy (kg/cm²)	4200	
Columnas	35 x 35 cm	
Vigas	25 x 45 cm	
Losas Macizas	e = 15 cm	

La dimensión total en planta en el eje X es de 15 m y en el eje Y de 20m. Los pórticos en ambos sentidos se encuentran espaciados cada 5m.

Para el análisis sísmico y de gravedad, el edificio se modeló con elementos con deformaciones por flexión, fuerza cortante y carga axial.

Para cada nudo se consideraron 6 grados de libertad estáticos y para el conjunto tres grados de libertad dinámicos correspondientes a dos traslaciones horizontales y a una rotación plana asumida como un diafragma rígido en cada nivel.

Se utilizaron brazos rígidos para modelar la unión entre las columnas y las vigas.

Se utilizó el programa ETABS 2016 para la elaboración del modelo matemático.

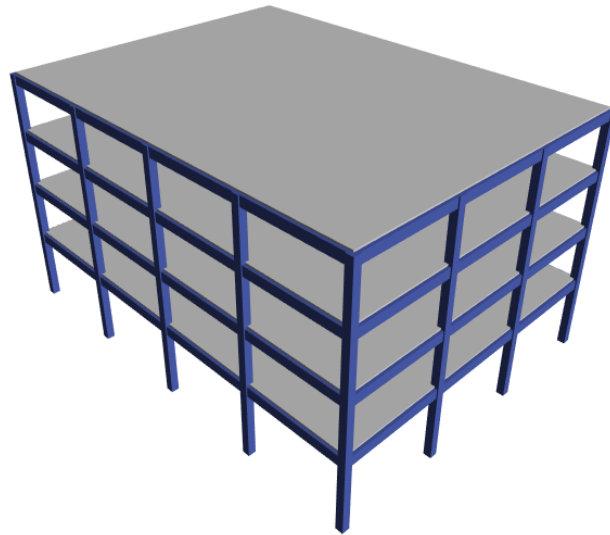


Figura N° 6.1 Vista tridimensional del modelo matemático del edificio

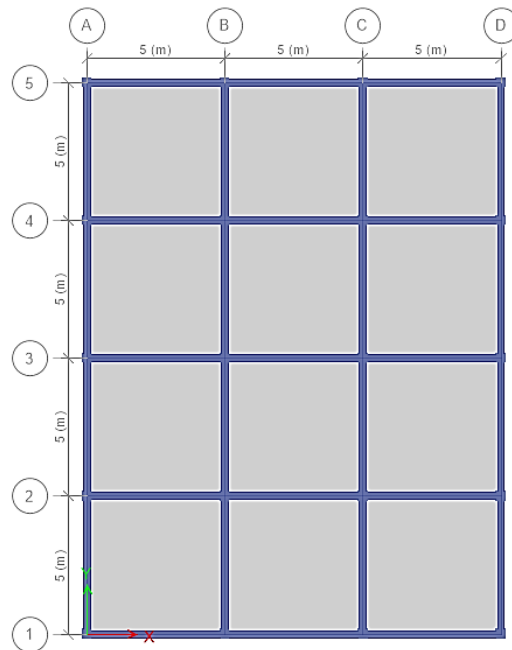


Figura N° 6.2 Vista de la planta típica del modelo considerado

6.2. ANÁLISIS DEL EDIFICIO SIN DISIPADORES

6.2.1. Análisis Modal espectral.

El análisis sísmico modal espectral, se realizó según la norma NTE E-030 (2003), con el procedimiento de superposición modal espectral, con combinación cuadrática completa (CQC). Se ha considerado 5% de amortiguamiento de la estructura.

Tabla N° 6.2 Parámetros sísmicos del edificio considerado.

PARÁMETROS SÍSMICOS	
ZONIFICACIÓN SÍSMICA	ZONA 4, $Z = 0.45$
CATEGORÍA DE EDIFICACIÓN	CATEGORÍA "C", $U = 1.00$
PARÁMETROS DEL SUELO	TIPO S1, $T_p = 0.40$ s, $S = 1.0$
SISTEMA ESTRUCTURAL	PÓRTICOS DE CONCRETO ARMADO
CONFIGURACIÓN ESTRUCTURAL	REGULAR
COEFICIENTE DE REDUCCIÓN	$R = 8$
LIMITE DISTORSIÓN LATERAL	$\Delta_i / h_i \times 0.75R \leq 0.007, C^\circ A^\circ$

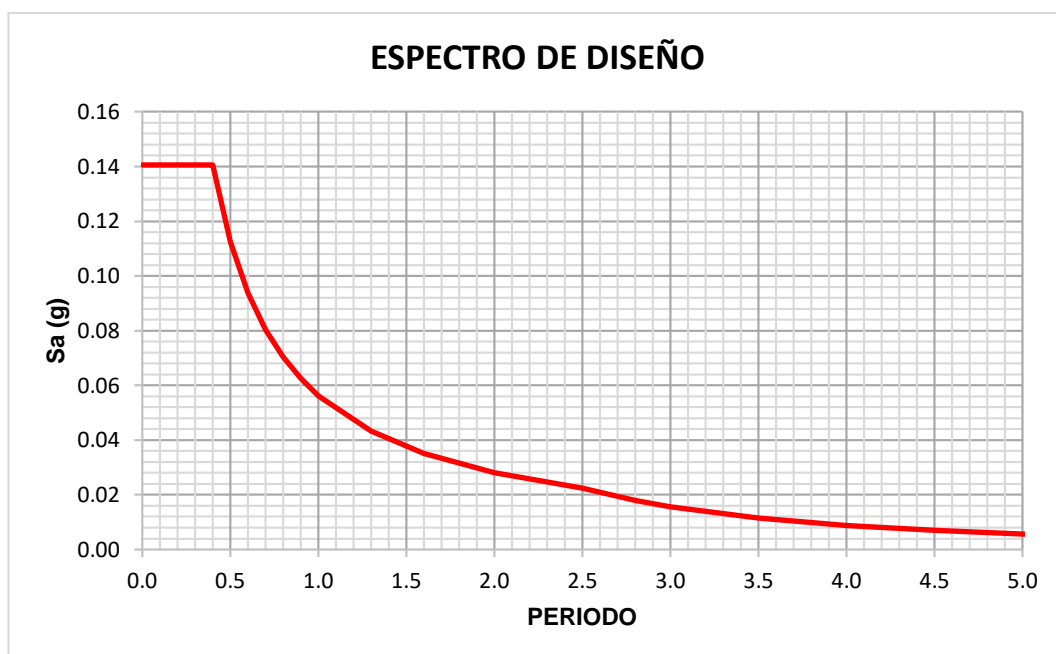


Figura N° 6.3 Espectro de diseño de acuerdo a la norma E-030

Cálculo de Distorsiones.

Tabla N°6.3 Distorsiones resultantes del análisis sin disipadores

NIVEL	DIRECCIÓN X		DIRECCIÓN Y	
	DERIVA	DERIVA INELÁSTICA	DERIVA	DERIVA INELÁSTICA
PISO 4	0.000483	0.002898	0.000444	0.002664
PISO 3	0.000899	0.005394	0.000835	0.00501
PISO 2	0.00127	0.00762	0.001185	0.00711
PISO 1	0.001608	0.009648	0.001527	0.009162

Del análisis modal se ha obtenido el período fundamental $T = 0.646$ Seg.

6.2.2. Análisis Tiempo - Historia.

En la presente tesis, se realizó un análisis lineal dinámico con propiedades no lineales de los disipadores (Fast Nonlinear Analysis FNA).

Para el análisis Tiempo-Historia se han seleccionado tres registros sísmicos sintéticos los cuales han sido debidamente escalados al espectro de diseño de la norma E-030 (CISMID - UNI).

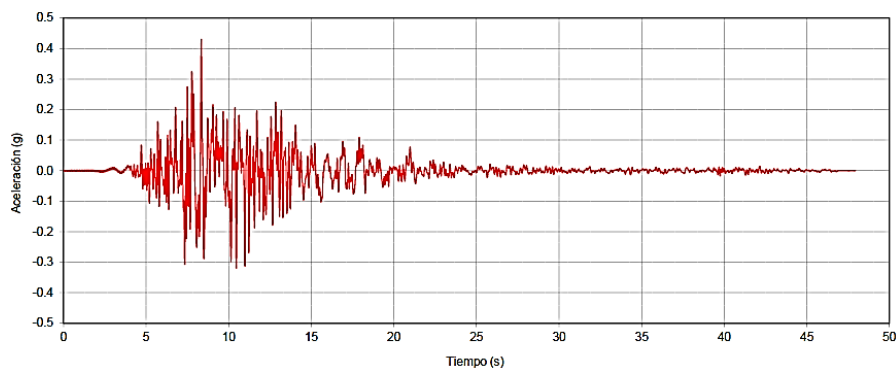


Figura N° 6.4 Registro de aceleraciones – Sismo 1995 Japón Kobe aceleración máxima 0.43g, suelo S1 (CISMID UNI)

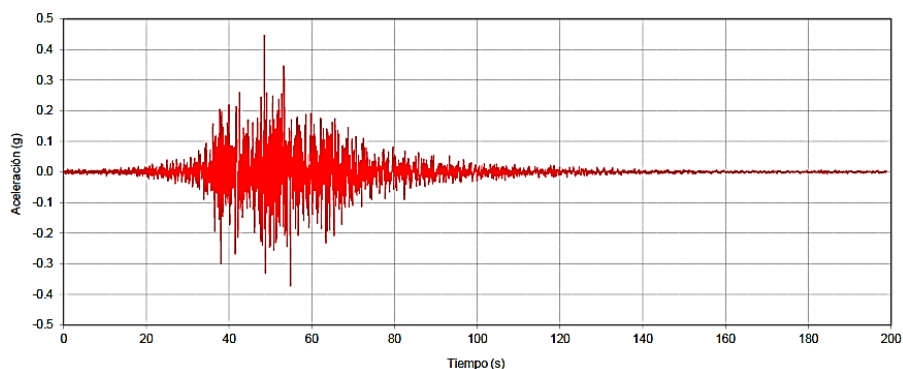


Figura N° 6.5 Registro de aceleraciones – Sismo 2001 Arequipa-Moquegua aceleración máxima 0.45g, suelo S1 (CISMID UNI)

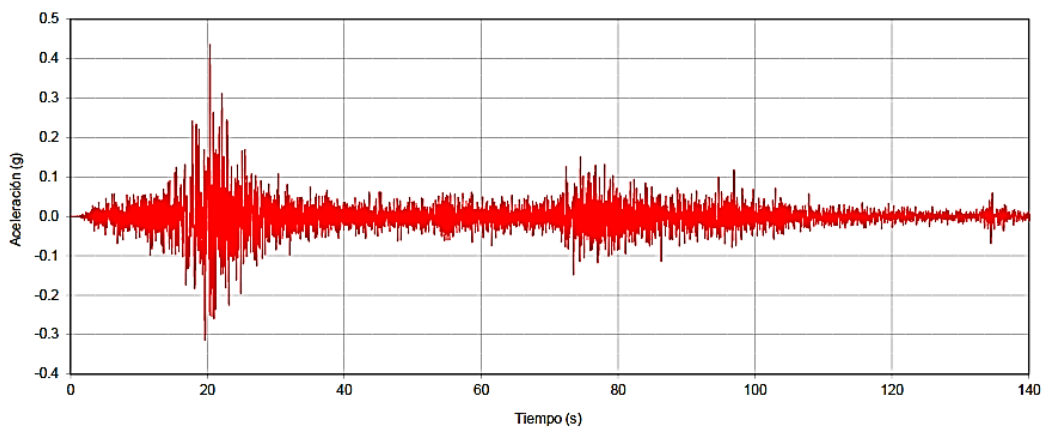


Figura N° 6.6 Registro de aceleraciones – Sismo 2007 Pisco PCN aceleración máxima 0.43g, suelo S1 (CISMID UNI)

Cálculo de distorsiones de entrepiso.

Dirección X – X

Tabla N° 6.4 Distorsiones obtenidas del análisis tiempo-historia sin disipadores en la dirección X-X

NIVEL	AREQUIPA		PISCO		KOBE	
	N08E	N82W	N08E	N82W	N08E	N82W
PISO 4	0.0041	0.0037	0.0031	0.0034	0.0031	0.0039
PISO 3	0.0070	0.0067	0.0057	0.0066	0.0058	0.0071
PISO 2	0.0092	0.0089	0.0083	0.0094	0.0089	0.0090
PISO 1	0.0114	0.0120	0.0107	0.0115	0.0116	0.0116

Dirección Y – Y

Tabla N°6.5 Distorsiones obtenidas del análisis tiempo-historia sin disipadores en la dirección Y-Y

NIVEL	AREQUIPA		PISCO		KOBE	
	N08E	N82W	N08E	N82W	N08E	N82W
PISO 4	0.0035	0.0039	0.0034	0.0030	0.0038	0.0029
PISO 3	0.0064	0.0067	0.0064	0.0055	0.0071	0.0057
PISO 2	0.0086	0.0089	0.0091	0.0080	0.0091	0.0088
PISO 1	0.0119	0.0113	0.0114	0.0104	0.0113	0.0118

6.3. ANÁLISIS DEL EDIFICIO CON DISIPADORES

Se ha tomado como base la disposición diagonal ya que es considerada la disposición más conocida y estudiada más ampliamente. A partir de estos resultados se analizarán las distintas disposiciones que se vieron en la sección 4.6.

Se han considerado las siguientes configuraciones:

- Diagonal (Base)
- Chevron Simpe (1 disipador)
- Chevron Doble (2 Disipadores)
- Toggle Brace Upper Damper (02 casos)
- Toggle Brace Lower Damper (02 casos)

Para las disposiciones Upper y Lower se han planteado dos casos en las que la geometría de instalación se ha modificado planteándose así dos factores de amplificación distintos en cada caso.

Cabe señalar que solamente se han considerado disipadores viscosos no lineales a lo largo de este capítulo.

Para estimar la efectividad de los disipadores se han considerado dos casos, el primero consiste en fijar un objetivo de desempeño es decir una misma distorsión para todas las disposiciones y en el segundo caso se ha fijado un único valor de C para cada disposición.

6.3.1. Análisis para un mismo nivel de daño

a) Distorsión objetivo

En este caso se fijara una distorsión igual para todas las disposiciones consideradas las cuales serán menores a 0.007 la cual está estipulada en la norma sismorresistente E030.

Como punto de partida se trabaja con la disposición diagonal y se ajusta a dicha distorsión las demás disposiciones.

b) Ubicación de disipadores

Se ha logrado obtener después de algunas iteraciones 4 dispositivos por nivel en la que se presentan fuerzas en los disipadores razonables, a continuación de muestra la ubicación de los disipadores para las diferentes disposiciones planteadas.

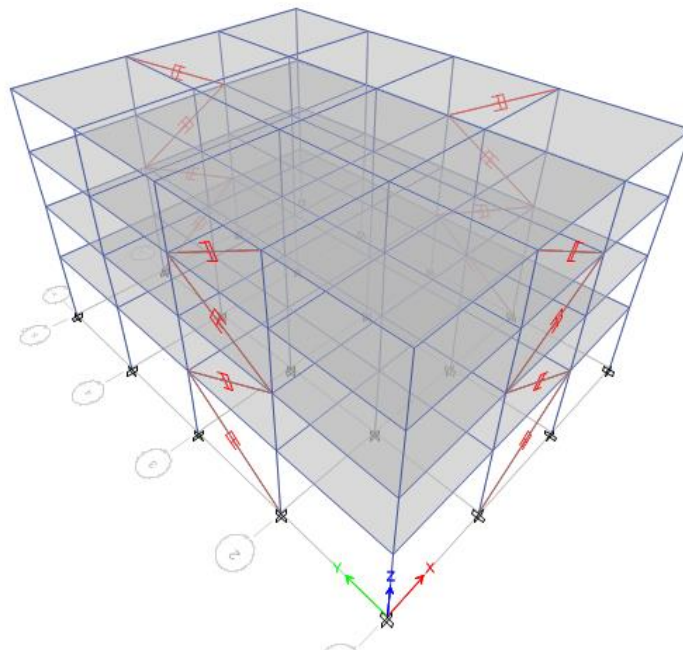


Figura N° 6.7 Vista tridimensional de la disposición diagonal

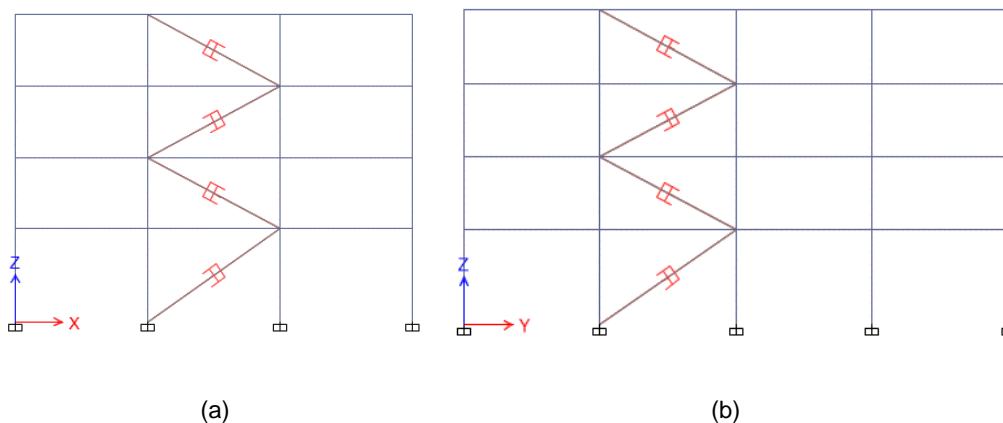


Figura N° 6.8 Ubicación de disipadores diagonales (a) Eje X – X (Ejes 1 y 5), (b) Eje Y – Y (Ejes A y D)

c) Estimación de parámetros del sistema de amortiguamiento

A continuación se presenta el procedimiento que se empleó para el cálculo de los parámetros del sistema de amortiguamiento para la disposición diagonal, el cual se ha tomado como base; cabe resaltar que el mismo procedimiento se ha seguido para las demás disposiciones.

• Rigidez del brazo metálico

Se ha considerado una sección HSS6.625x0.500 y se ha obtenido el valor de su rigidez utilizando la ecuación 5.7, se ha realizado el cálculo para el primer nivel y los pisos típicos:

Primer Piso

- ✓ $E = 29000 \text{ Ksi} = 2.04\text{E}+07 \text{ t/m}^2$
- ✓ $L = 6.103 \text{ m}$
- ✓ $A = 9.00 \text{ in}^2 = 0.0058 \text{ m}^2$

$$K = 19393.99 \text{ t/m}^2$$

Piso Típico

- ✓ $E = 29000 \text{ Ksi} = 2.04\text{E}+07 \text{ t/m}^2$
- ✓ $L = 5.682 \text{ m}$
- ✓ $A = 9.00 \text{ in}^2 = 0.0058 \text{ m}^2$

$$K = 20830.52 \text{ t/m}^2$$

• **Coefficiente de amortiguamiento C**

Para la primera estimación del coeficiente de amortiguamiento se ha considerado el valor de 0.5 para el exponente de velocidad y un amortiguamiento viscoso de 15%. Se hará uso de la ecuación 4.46, en la cual se despeja el coeficiente de amortiguamiento C, y las formas modales se normalizan a la unidad; el procedimiento se detalla a continuación:

CALCULO DEL COEFICIENTE DE AMORTIGUAMIENTO EN DISIPADORES NO LINEALES $\alpha < 1$

DIRECCION X - X

T= 0.646 seg
 $\alpha = 0.5$

$\beta_{visc} = 15\%$
 $\beta mD = 1.35$

$$\beta_{visc.} = \frac{\sum_j \lambda C_j \phi_{rj}^{1+\alpha} \cos^{1+\alpha} \theta_j}{2\pi A^{1-\alpha} \omega^{2-\alpha} \sum_i m_i \phi_i^2}$$

Nº de dis. por nivel= 2

NIVEL	FORMA MODAL ϕ_i	ϕ_i^2	ϕ_{rj}	MASA (t)	COS θ	$\Sigma \phi_i^2 \times m_i$	$\Sigma (\phi_{rj})^{1+\alpha} \times \cos^{1+\alpha} \theta_j$
1	0.444	0.197	0.444	24.8707	0.8192	4.90	0.219
2	0.714	0.510	0.271	24.6309	0.8799	12.56	0.116
3	0.902	0.814	0.188	24.6309	0.8799	20.06	0.067
4	1	1.000	0.098	19.6151	0.8799	19.62	0.025
	3.060	2.521				57.13	0.428

$$A = \frac{g \times \Gamma_i \times S_a \times T_1}{4 \times \beta mD \times \pi^2}$$

$$\lambda = \frac{2^{2+\alpha} \Gamma^2 (1 + \alpha/2)}{\Gamma(2 + \alpha)}$$

$\Gamma_i = 1.233442$
A= 0.058666 m
 $A^{1-\alpha} = 0.242211$

$\lambda = 3.49608$
 $\omega^{2-\alpha} = 30.3334$

$\Sigma C = 264.50165 \text{ t-(s/m)}^{(1/0.5)}$

C_x = 132 t-(s/m)^(1/0.5)

El valor obtenido del coeficiente de amortiguamiento para la dirección X – X es de C=132 t-(s/m)^(1/0.5). A continuación se realiza el cálculo del coeficiente de amortiguamiento para la dirección Y – Y.

CALCULO DEL COEFICIENTE DE AMORTIGUAMIENTO EN DISIPADORES NO LINEALES $\alpha < 1$

DIRECCION Y - Y

T= 0.639 seg
 $\alpha = 0.5$

$\beta_{visc} = 15\%$
 $\beta_{mD} = 1.35$

$$\beta_{visc.} = \frac{\sum_j \lambda C_j \phi_{rj}^{1+\alpha} \cos^{1+\alpha} \theta_j}{2\pi A^{1-\alpha} \omega^{2-\alpha} \sum_i m_i \phi_i^2}$$

Nº de dis. por nivel= 2

NIVEL	FORMA MODAL ϕ_i	ϕ_i^2	ϕ_{rj}	MASA (t)	$\cos\theta$	$\Sigma \phi_i^2 x_{mi}$	$\Sigma (\phi_{rj})^{1+\alpha} x_{cos}^{1+\alpha} \theta_j$
1	0.449	0.202	0.449	24.8707	0.8192	5.01	0.223
2	0.718	0.516	0.269	24.6309	0.8799	12.70	0.115
3	0.904	0.818	0.186	24.6309	0.8799	20.14	0.066
4	1.000	1.000	0.096	19.6151	0.8799	19.62	0.024
	3.071	2.535				57.47	0.429

$$A = \frac{g \times \Gamma_i \times S_a \times T^1}{4 \times \beta_{mD} \times \pi^2}$$

$$\lambda = \frac{2^{2+\alpha} \Gamma^2 (1 + \alpha/2)}{\Gamma(2 + \alpha)}$$

$\Gamma_i = 1.230906$
A= 0.057911 m
 $A^{1-\alpha} = 0.240647$

$\lambda = 3.49608$
 $\omega^{2-\alpha} = 30.8332$

$\Sigma C = 267.94195 \text{ t-(s/m)}^{(1/0.5)}$

Cx = 134 $\text{t-(s/m)}^{(1/0.5)}$

Finalmente de los resultados para ambas direcciones, se ha iniciado la iteración con un valor de $C=135 \text{ t-(s/m)}^{(1/0.5)}$ y se ha comparado la respuesta para valores de $C=150 \text{ t-(s/m)}^{(1/0.5)}$ y $C=120 \text{ t-(s/m)}^{(1/0.5)}$.

Tabla Nº 6.6 Distorsiones y amortiguamiento obtenidas del análisis para distintos valores de C

	DISTORSIÓN MÁXIMA		
	C=120	C=135	C=150
KOBE	0.00695	0.00665	0.00637
KOBE B	0.00703	0.00673	0.00645
AREQUIPA	0.00616	0.00602	0.00586
AREQUIPA B	0.00611	0.00599	0.00583
PISCO	0.00679	0.00655	0.00635
PISCO B	0.00681	0.00658	0.00636
$\beta_{viscoso}$	16.90%	16.32%	15.73%

De la tabla Nº6.6 se observa que para la estimación se obtienen valores cercanos al amortiguamiento objetivo de 15%, a partir de ahí se han ajustado los valores de C hasta alcanzar un valor óptimo de $C=135 \text{ t-(s/m)}^{(1/0.5)}$ con un amortiguamiento viscoso de 16.32% y con una máxima distorsión de 0.00673 inferior al objetivo de 0.007.

d) Factores de amplificación

A continuación se detalla los parámetros geométricos de cada disposición para encontrar el respectivo factor de amplificación "f":

Tabla N° 6.7 Parámetros geométricos principales considerados.

PARÁMETROS GEOMÉTRICOS							
	NIVEL	θ1	θ2	θ3	θ4	L1/D	f
DIAGONAL	2°- 4°		-	-	-	-	0.88
	1°		-	-	-	-	0.82
CHEVRON	2°- 4°	0	-	-	-	-	1
	1°	0	-	-	-	-	1
CHEVRON DOBLE	2°- 4°	0	-	-	-	-	2
	1°	0	-	-	-	-	2
UPPER TOGGLE 1	2°- 4°	18	39.24	-	68.95	0.8	1.67
	1°	18	27.84	-	54.27	0.8	1.35
UPPER TOGGLE 2	2°- 4°	22	47.06	-	72.05	0.8	2.27
	1°	27	40.45	-	64.71	0.8	2.24
LOWER TOGGLE 1	2°- 4°	22	51.64	36.76	-	0.7	2.38
	1°	29	47.08	41.19	-	0.7	2.86
LOWER TOGGLE 2	2°- 4°	20	48.71	34.98	-	0.7	1.69
	1°	26	43.33	39.61	-	0.7	1.77

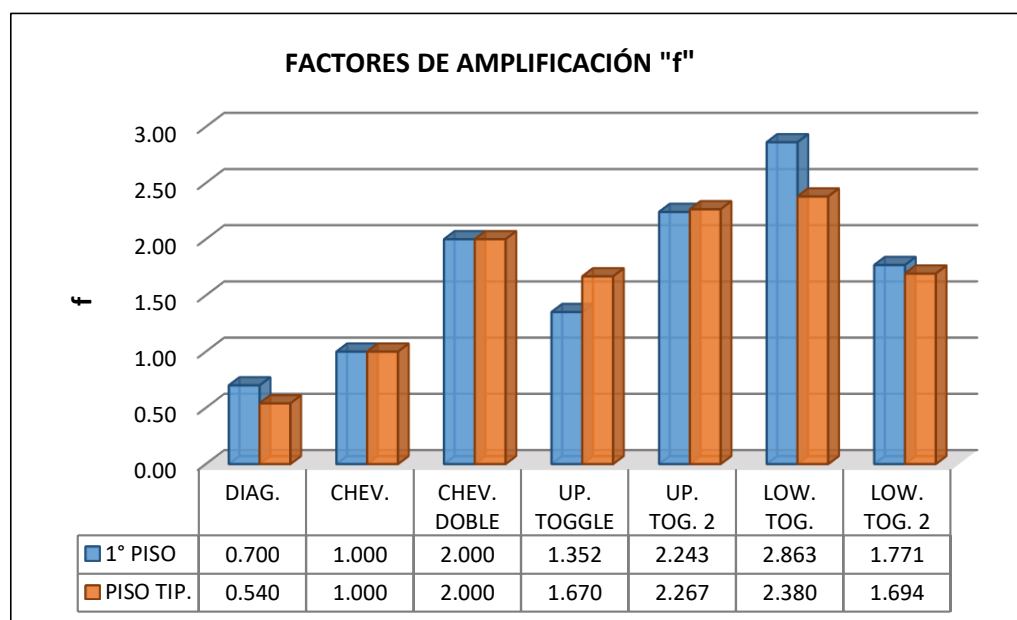


Figura N° 6.9 Gráfica con los valores de amplificación "f" para cada disposición

A continuación se presentan todas las disposiciones consideradas en los modelos matemáticos:

- **Disposición Chevron Simple**

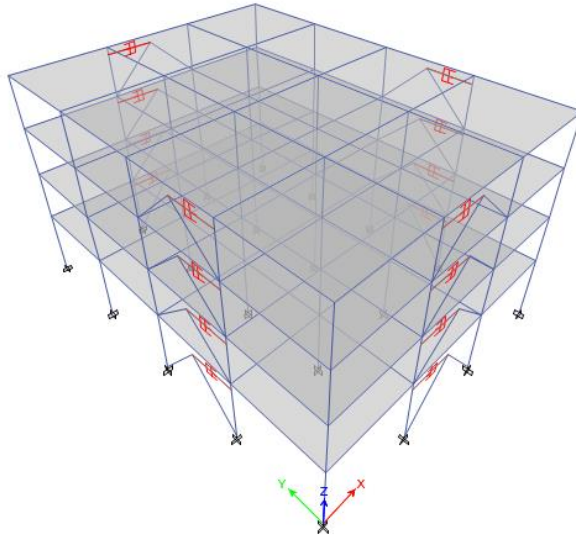


Figura N° 6.10 Vista tridimensional de la disposición Chevron simple

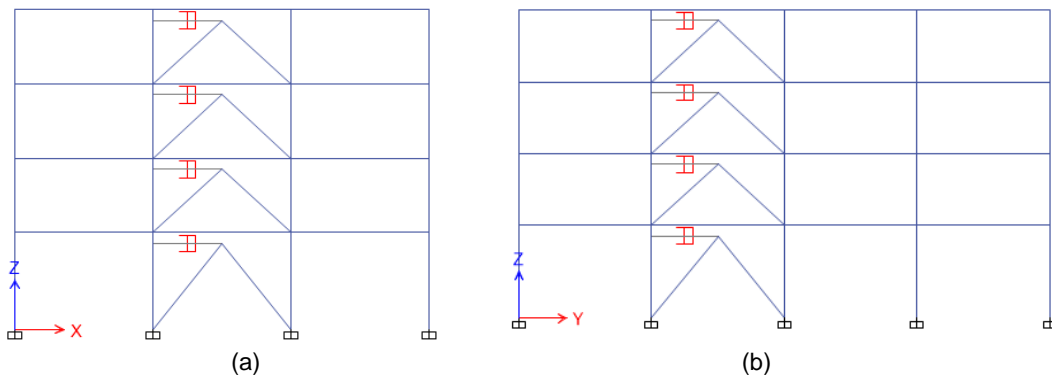


Figura N° 6.11 Ubicación de disipadores en arreglo chevron simple (a) En el eje X – X (Ejes 1 y 5), (b) En el eje Y – Y (Ejes A y D)

- **Disposición Chevron Doble**

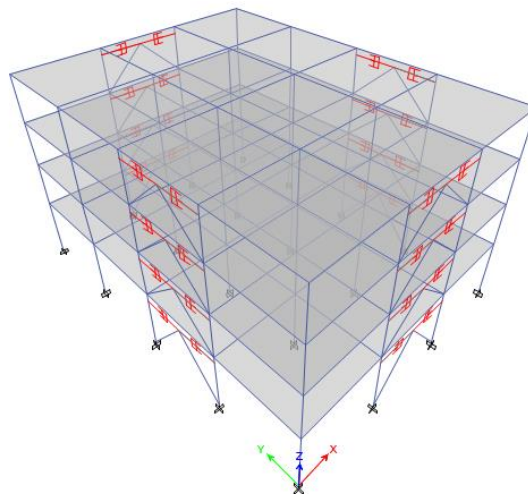


Figura N° 6.12 Vista tridimensional de la disposición Chevron Doble

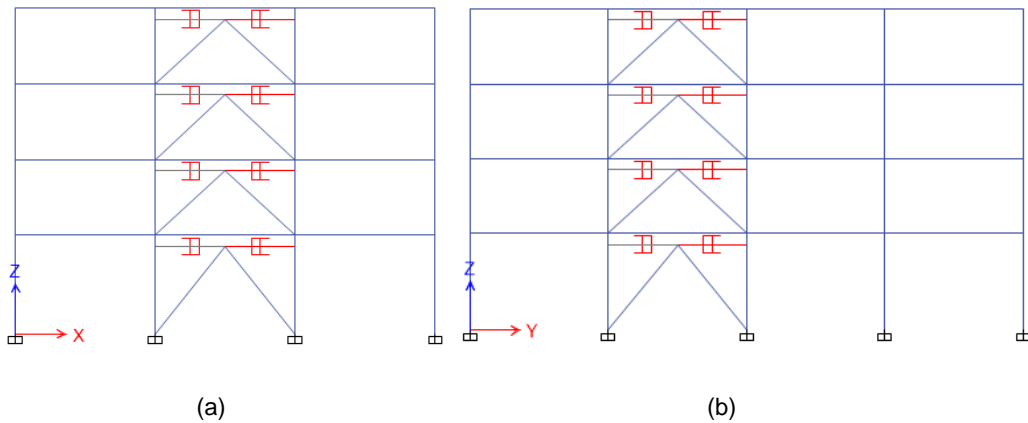


Figura N° 6.13 Ubicación de disipadores en arreglo chevron doble (a) En el eje X – X (Ejes 1 y 5), (b) En el eje Y – Y (Ejes A y D)

• **Disposición Toggle Brace Upper Damper 1**

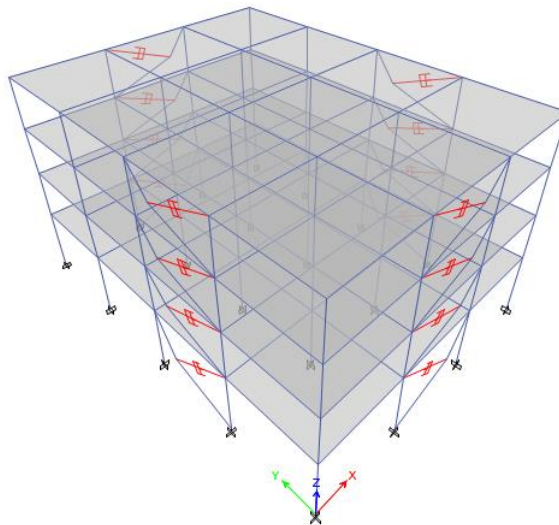


Figura N° 6.14 Vista tridimensional de la disposición Toggle Brace Upper 1

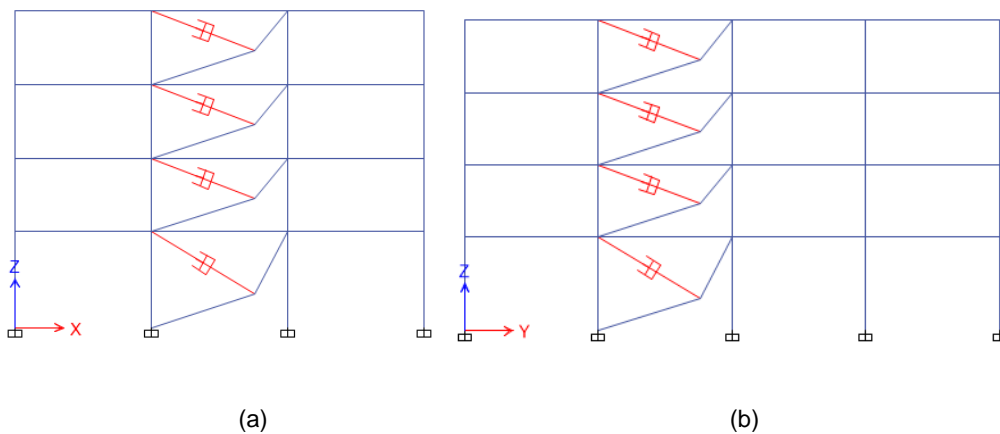


Figura N° 6.15 Ubicación de disipadores en arreglo Toggle Brace Upper 1. (a) En el eje X – X (Ejes 1 y 5), (b) En el eje Y – Y (Ejes A y D)

- **Disposición Toggle Brace Upper Damper 2**

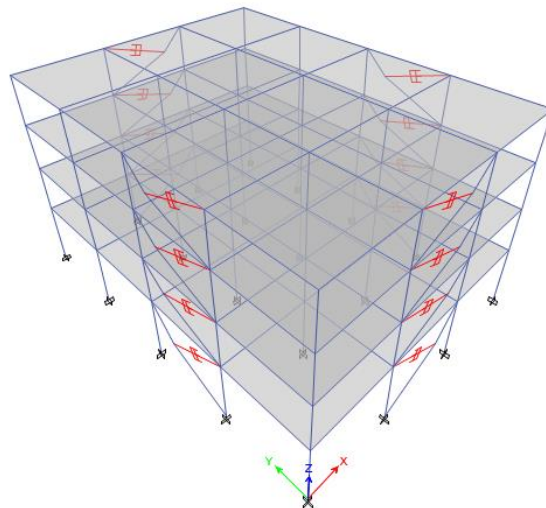


Figura N° 6.16 Vista tridimensional de la disposición Toggle Brace Upper 2

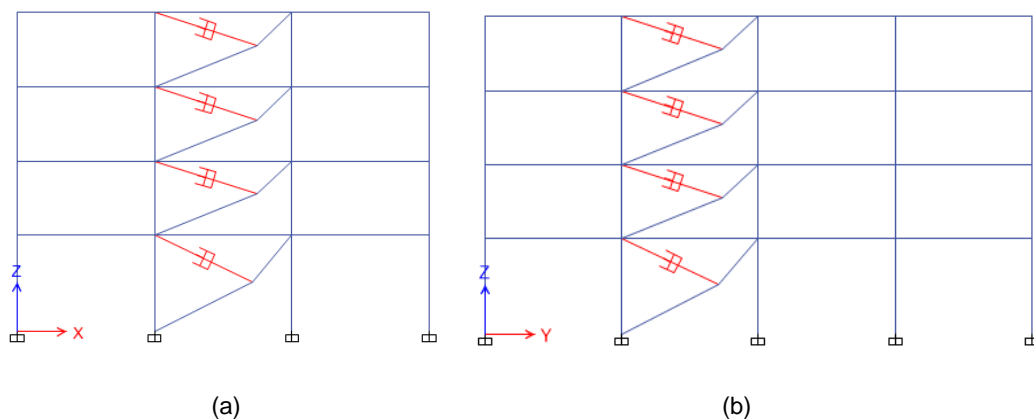


Figura N° 6.17 Ubicación de disipadores en arreglo Toggle Brace Upper 2 (a) En el eje X – X (Ejes 1 y 5), (b) En el eje Y – Y (Ejes A y D)

- **Disposición Toggle Brace Lower Damper 1**

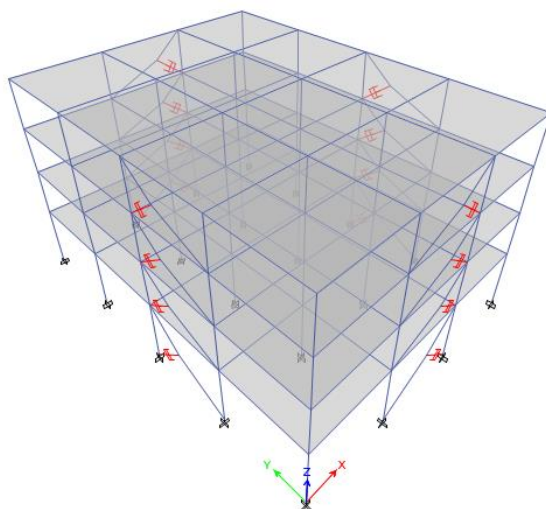


Figura N° 6.18 Vista tridimensional de la disposición Toggle Brace Lower 1

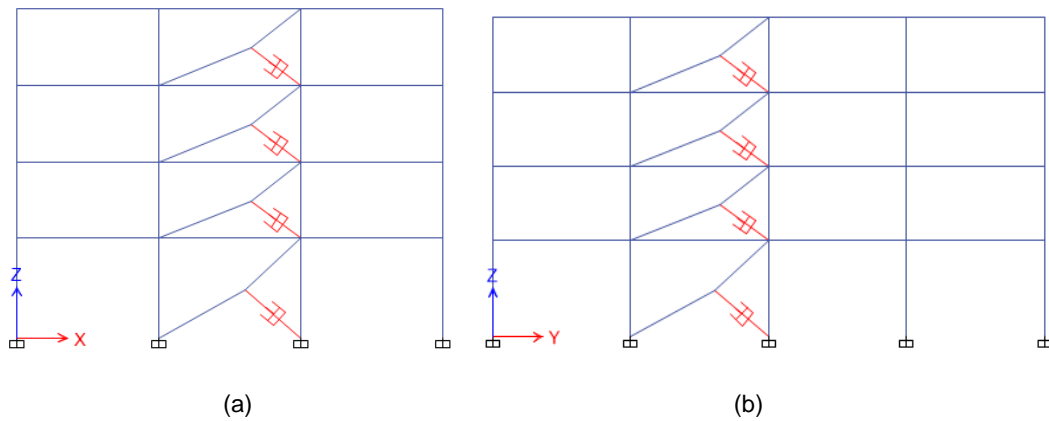


Figura N° 6.19 Ubicación de disipadores en arreglo Toggle Brace Lower 1 (a) En el eje X – X (Ejes 1 y 5), (b) En el eje Y – Y (Ejes A y D)

• **Disposición Toggle Brace Lower Damper 2**

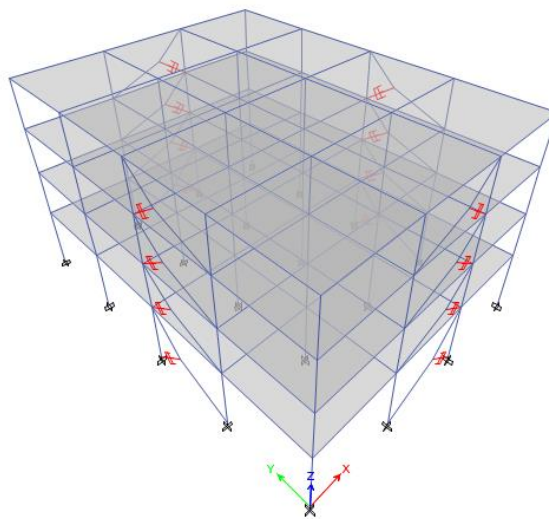


Figura N° 6.20 Vista tridimensional de la disposición Toggle Brace Lower 2

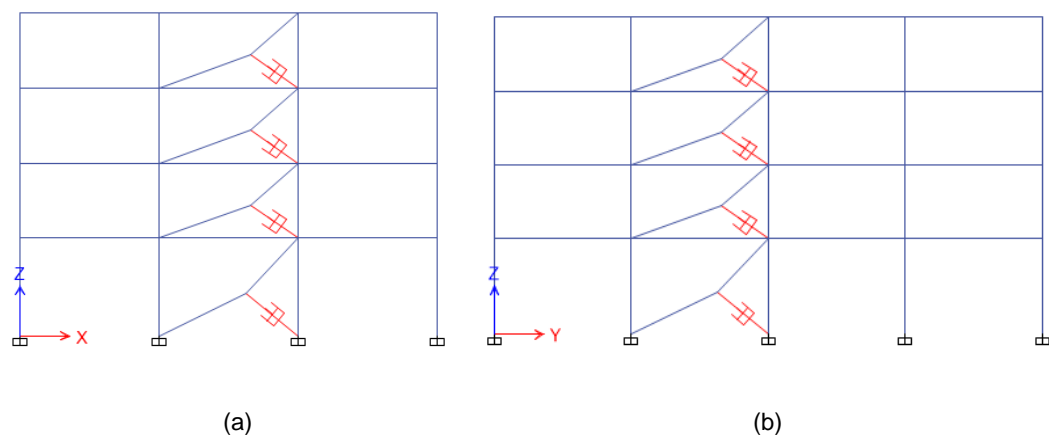


Figura N° 6.21 Ubicación de disipadores en arreglo Toggle Brace Lower 2. (a) En el eje X – X (Ejes 1 y 5), (b) En el eje Y – Y (Ejes A y D)

a. Resultados obtenidos.

A continuación se presentan los resultados obtenidos para cada disposición de los disipadores.

- **Coefficientes de amortiguamiento:**

Para un mismo nivel de daño, se han obtenido diferentes valores de “C” para cada disposición, a continuación se muestra un resumen de resultados de dichos valores.

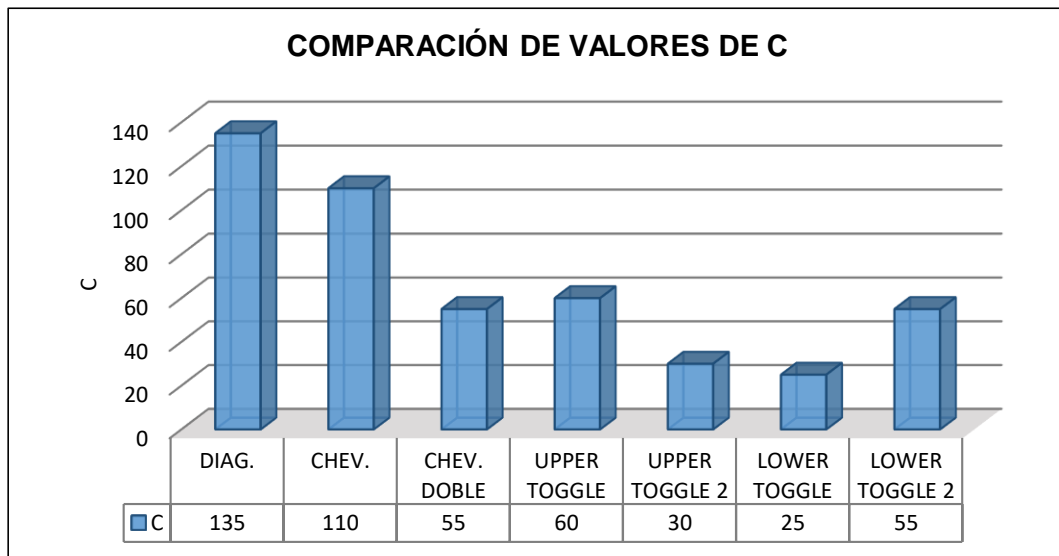


Figura N° 6.22 Valores del factor de amortiguamiento obtenidos para cada disposición

Se observa que las disposiciones más eficientes son las Upper Toggle y Lower Toggle en las que el valor de C se ha reducido en casi un 80% con respecto al coeficiente C obtenido para la disposición diagonal.

Cabe resaltar la eficiencia de la disposición Chevron Doble, sin embargo se debe tener en cuenta que se cuenta también con el doble de dispositivos de disipación de energía.

Esta reducción del coeficiente C influye directamente en la fuerza a la que el dispositivo está sometido, dicha afirmación se corrobora a continuación. Además se logra observar que los dispositivos con un factor de amplificación mayor son los que presentan menores valores para el coeficiente de amortiguamiento.

- **Fuerza máxima en el disipador:**

De la Fig. 6.23 se observa la relación directa que existe entre el coeficiente de amortiguamiento C y la fuerza en el dispositivo.

Se obtuvo la menor fuerza en las disposiciones Upper 2 y Lower Toggle 1, confirmando de esta manera la eficiencia de estas disposiciones.

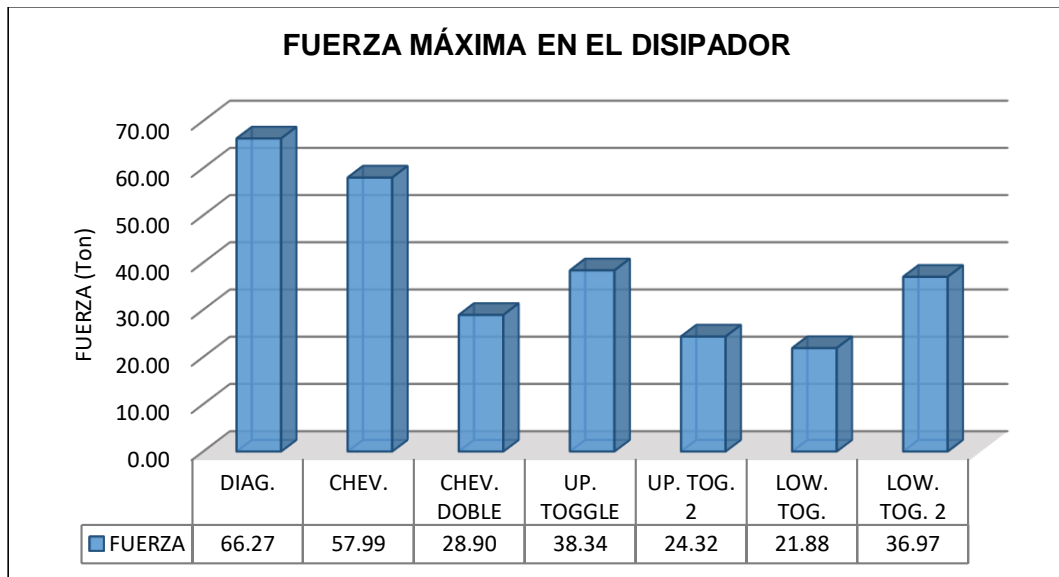


Figura N° 6.23 Fuerza máxima en el disipador en función de su disposición

• **Porcentaje de disipación de energía:**

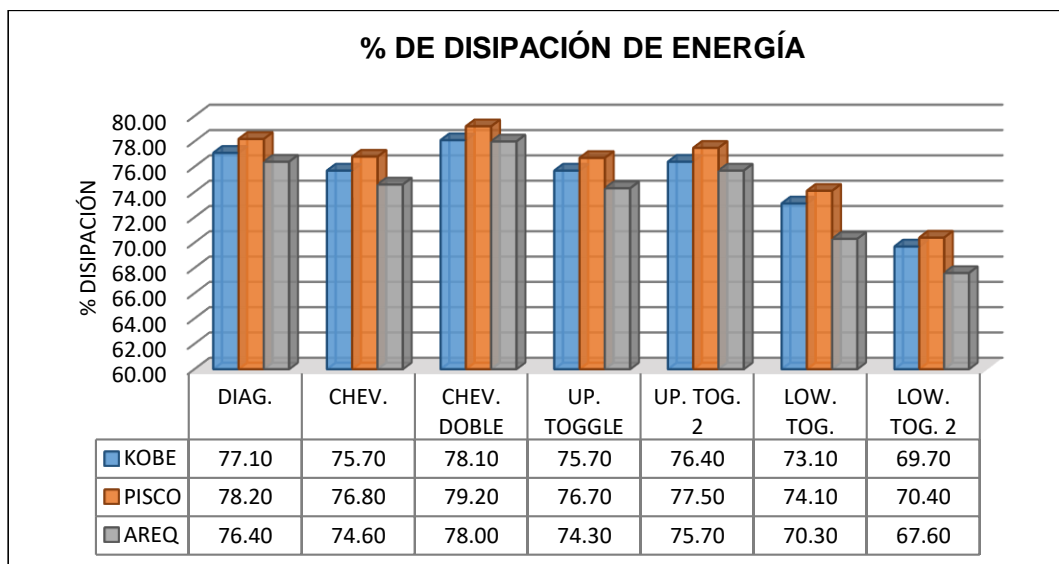


Figura N° 6.24 Porcentaje de disipación de energía en función de su disposición

Se observa que los dispositivos tienen un gran porcentaje de disipación de energía.

La menor participación en la disipación de energía le pertenece a las disposiciones Lower Toggle 2.

• **Amortiguamiento viscoso:**

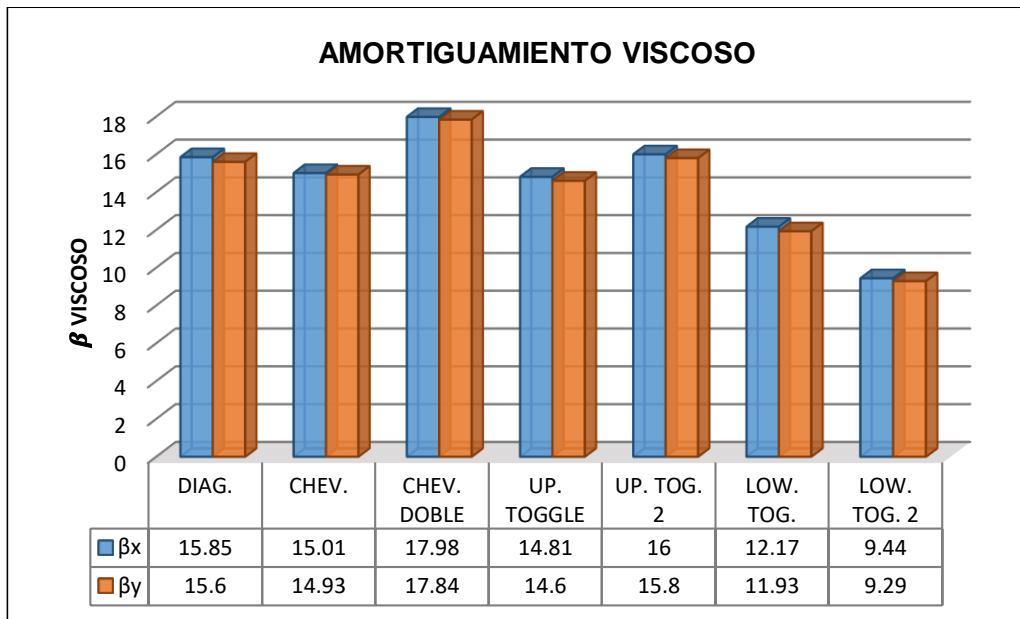


Figura N°6.25 Amortiguamiento viscoso en función de su disposición

Se observa que el mayor amortiguamiento se presenta en la disposición Chevron Doble con un valor de 17.98% en la dirección X – X y un valor de 17.84% en la dirección Y – Y. Estos valores apenas superan a la disposición Upper Toggle 2 y diagonal.

La disposición Lower Toggle es la menos eficiente en función del amortiguamiento añadido a la estructura.

6.3.2. Para un mismo coeficiente de amortiguamiento.

En este caso se ha desarrollado un valor de C de tal manera que se tenga un drift aproximado de 0.007 en la disposición diagonal y dicho valor de C se ha mantenido para todas las disposiciones evaluadas en el caso anterior.

Al igual que en el apartado anterior, se ha tomado como base a la disposición diagonal, en el cual después de algunas iteraciones y para una distorsión aproximada de 0.007 se obtuvo un valor de $C=135 \text{ t-(s/m)}^{(1/0.5)}$.

a) Resultados obtenidos.

A continuación se presentan los resultados obtenidos para cada disposición de los disipadores.

• **Distorsiones Obtenidas para un mismo $C=135 \text{ t-(s/m)}^{(1/0.5)}$:**

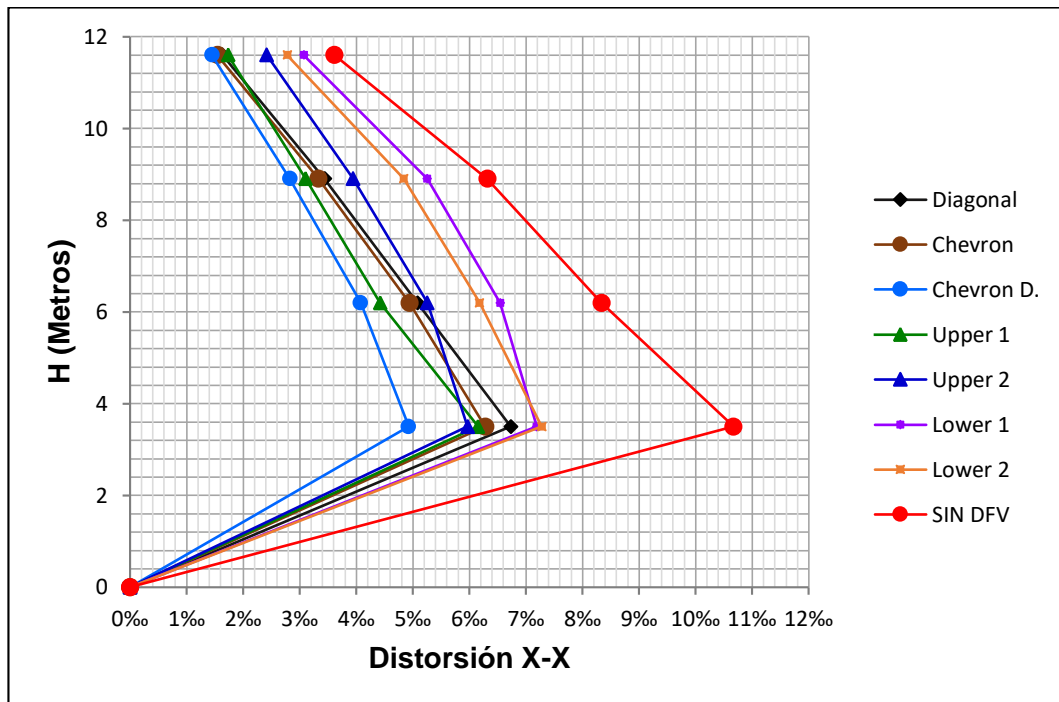


Figura N° 6.26 Distorsión en la dirección X – X para un mismo valor de C

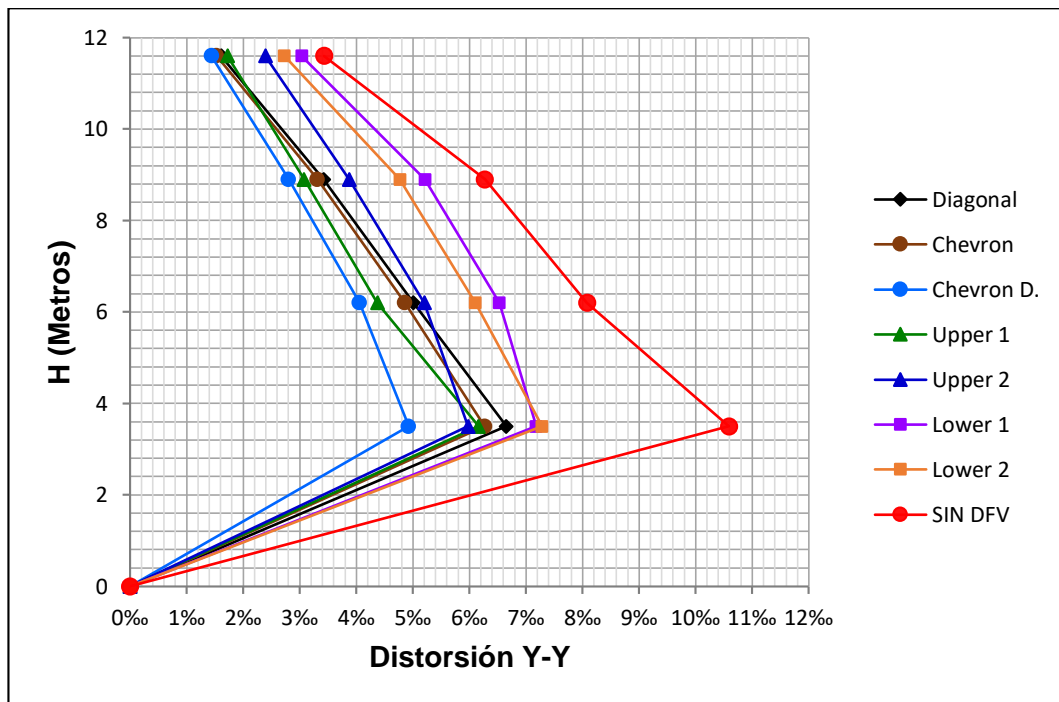


Figura N° 6.27 Distorsión en la dirección Y – Y para un mismo valor de C

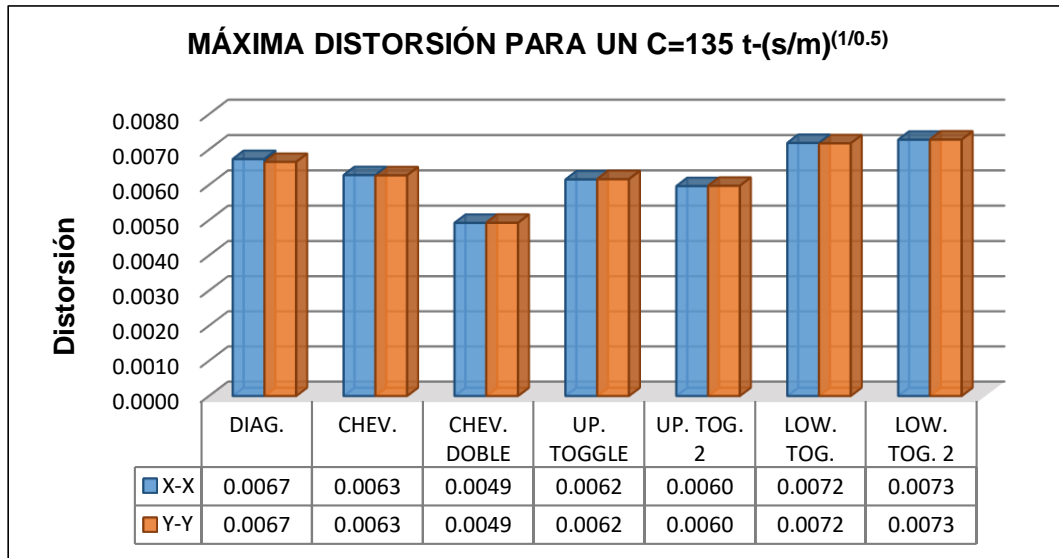


Figura N° 6.278 Máxima Distorsión para un mismo valor de C

De las figuras 6.26, 6.27 y 6.28, podemos notar que incluso para un mismo valor de C la disposición Upper Toggle 2 es la que brinda mejores resultados con respecto a las otras disposiciones.

- **Fuerza máxima en el disipador:**

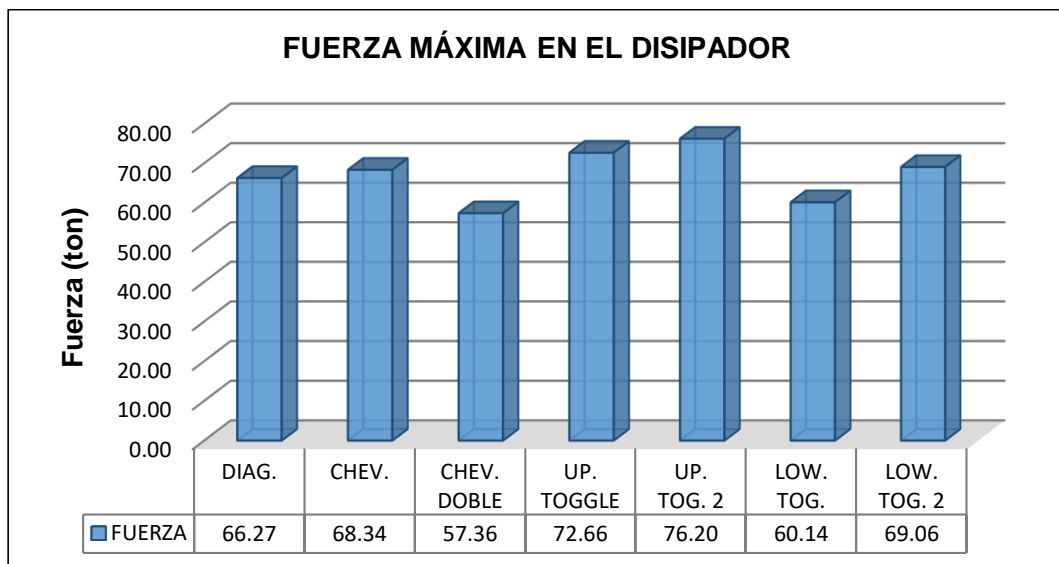


Figura N° 6.29 Fuerza máxima para un mismo valor de C

De las Fig. 6.29 se puede notar que la mayor fuerza obtenida en el dispositivo está presente en la disposición Upper Toggle 2, sin embargo vale indicar que la diferencia con la menor fuerza que en este caso es la de la disposición Chevron Doble y Diagonal no es muy significativa ya que la diferencia está en el orden de 10 toneladas.

• **Amortiguamiento viscoso:**

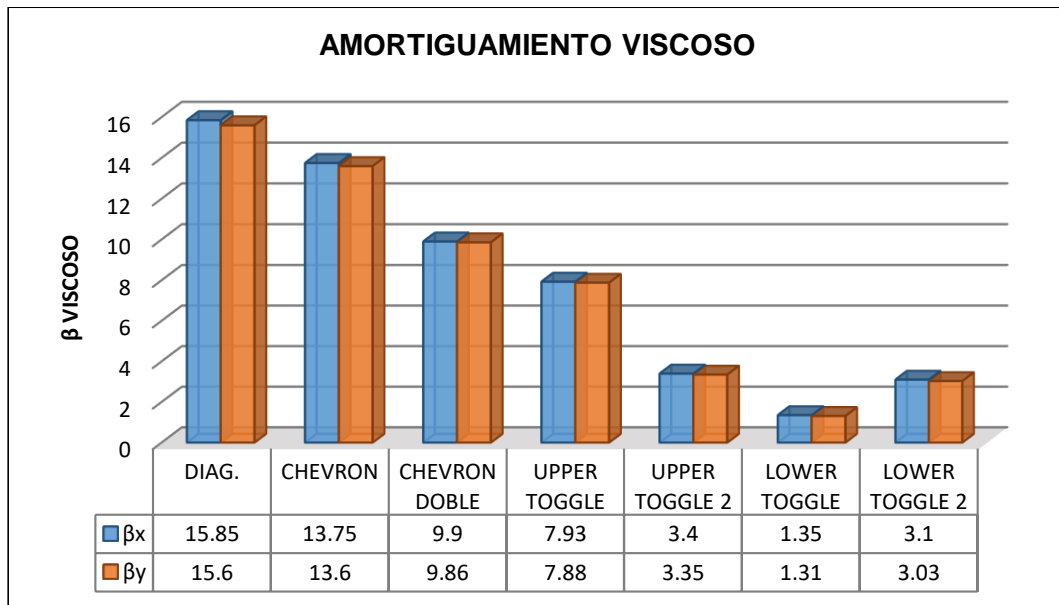


Figura N° 6.30 Amortiguamiento viscoso para un mismo valor de C

De la Fig. 6.30 se observa que el amortiguamiento obtenido en las disposiciones Diagonal, Chevron, Chevron Doble y Upper Toggle son muy similares, mientras que las disposiciones Upper Togle 2 y Lower Toggle son las que arrojan menores resultados en términos de amortiguamiento viscoso. La disposición Upper Toggle 2 presenta un resultado intermedio del orden del 10%.

• **Porcentaje de disipación de energía:**

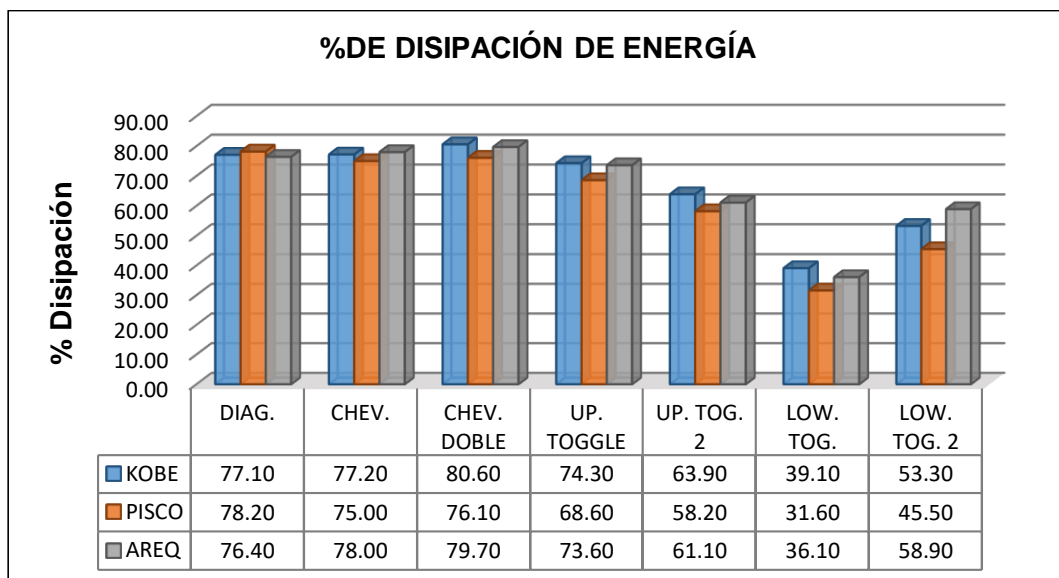


Figura N° 6.31 Porcentaje de disipación de energía para un mismo valor de C

De la Fig. 6.31 se observa que los dispositivos de amortiguamiento en las disposiciones Chevron y Upper Toggle disipan más del 70% de la energía de entrada en la mayoría de los casos, resultando estas más eficientes en dicho aspecto.

La disposición Lower Toggle resultó la menos eficiente.

CAPITULO VII. APLICACIÓN DE LA DISPOSICIÓN UPPER TOGGLE BRACE

A modo de aplicación de la disposición más efectiva de los disipadores viscosos, se ha elegido el Edificio Universal del Ministerio de Economía y Finanzas, al cual se le ha realizado una evaluación estructural de acuerdo al Reglamento Nacional de Edificaciones del Perú, Normas Técnicas de Edificaciones E-020, E-030, E-050, E-060.

Así mismo vale indicar que el proyecto de reforzamiento estructural del Edificio Universal se ha llevado a cabo por la empresa Córdova Ingenieros S.A.C y se han planteado dispositivos viscosos en disposición Chevron Doble. Dichos resultados se compararán con la propuesta de reforzamiento mediante disipadores viscosos en disposición Upper Togle Brace.

7.1. EVALUACIÓN EDIFICIO UNIVERSAL

El Edificio Universal tiene ocho pisos, un mezzanine y un sótano, el uso actual es el de oficinas administrativas, el sótano ocupa toda el área de terreno y está destinado a estacionamientos y almacenes.

El sistema estructural está conformado por un sistema de muros estructurales de concreto armado y pórticos de concreto armado, también se encuentran muros de albañilería en diversas partes del edificio. En el sótano se tiene muros de contención de concreto armado y losas mazicas armadas en dos sentidos de 0.25m de espesor, las losas de los pisos superiores son aligerados de 0.25m de espesor y están orientadas en un solo sentido.

Vale indicar que el plano más antiguo encontrado de este edificio data del año 1960, lo cual indica que esta es una edificación antigua con más de 50 años.

7.1.1. Ubicación

El área en estudio se encuentra ubicada en el distrito del Cercado de Lima, en el Jr. Junín N° 319, Provincia y Departamento de Lima, el edificio se encuentra en las coordenadas UTM: (279172E, 8667505S).

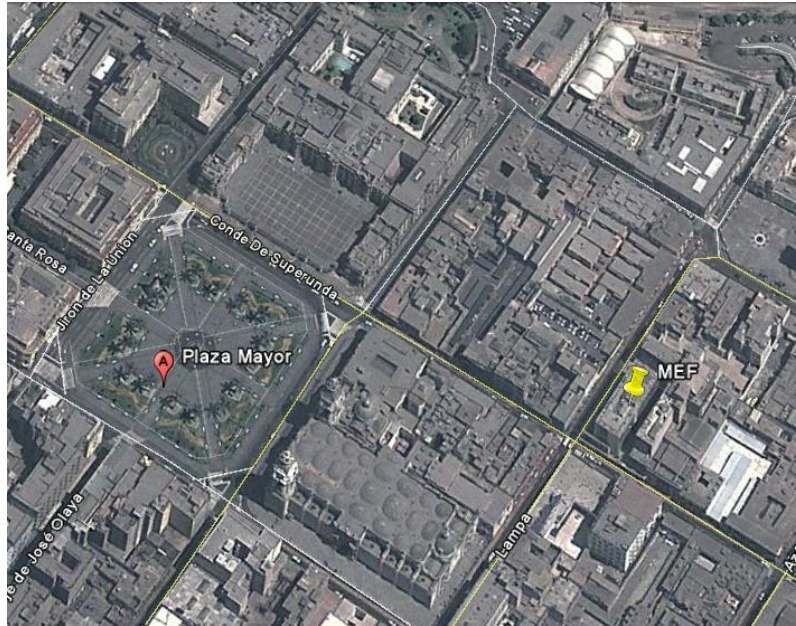


Figura N° 7.1 Vista Satelital de la ubicación del Edificio Universal



(a)

(b)

Figura N° 7.1 Fotografías Edificio Universal. (a) Vista desde el Jr. Junín. (b) Vista desde la Av. Lampa

7.1.2. Recopilación de información

a. Levantamiento de la edificación

Para la elaboración del modelo matemático fue necesario realizar un levantamiento estructural ya que no se contaban con planos estructurales.



Figura N° 7.2 Levantamiento de información

b. Inspección de fisuras y grietas

En el edificio se detectaron fisuras y grietas en la estructura sobre todo en los muros de albañilería, debido principalmente a que dichos elementos están conectados a la estructura principal del edificio. Siendo el caso que dicha conexión no es favorable debido a la diferencia de módulos de elasticidad entre ambos materiales, lo cual generarían fisuras y grietas en la albañilería debido a un sismo severo, motivo por el cual no se considera el aporte adicional de rigidez de la albañilería para el diseño del reforzamiento y la presente evaluación.



Figura N° 7.3 Presencia de grietas en conexión de muros de albañilería

c. Propiedades de los materiales

Del estudio de evaluación estructural del edificio proporcionado por la empresa Córdova Ingenieros SAC se tiene:

Para el concreto:

Una resistencia a la compresión: **180Kg/cm²**

Para el acero:

Fluencia del acero de refuerzo: **2800 Kg/cm²**

d. Escaneo del acero de refuerzo

Debido a la falta de información del acero existente en las columnas, se procedió a realizar el escaneo del acero de refuerzo utilizando un equipo Ferroskan de Hilti, el cual proporcionó sin dificultad el acero de refuerzo de las columnas del sótano, siendo el caso que lo encontrado fue lo siguiente:

Columnas de (0.40m x 1.20m): 12 Ø 1", cuantía: 1.275 %

Estribos: Ø 3/8", 1@0.05m, 10@0.10m, R@0.15m



Figura N° 7.4 Escaneo del acero de refuerzo en el edificio Universal

7.1.3. Análisis estructural

El análisis a llevar a cabo en el presente estudio será un análisis estructural tridimensional, considerando un modelo matemático tridimensional de tres grados de libertad, dos grados de libertad asociados a dos componentes ortogonales de

traslación horizontal y una rotación. El análisis sísmico de las estructuras se ha desarrollado utilizando el método de análisis modal espectral, de acuerdo a lo establecido en la norma técnica E.030. Para resolver el modelo matemático, se ha utilizado el programa ETABS.

Para el análisis, las estructuras fueron modeladas con elementos finitos tipo Shell, la cual representa tanto las losas y muros así como los elementos de barras Frame que representan vigas y columnas. La malla posee tanto las propiedades del material empleado como los espesores de los muros y losas.

Para los elementos se tomaron en cuenta deformaciones por flexión, fuerza cortante, torsión y carga axial.

a. Estados de carga considerados

Se ha considerado los siguientes estados de carga:

CM (Carga Muerta)

CV (Carga Viva)

THXX (Tiempo historia en la dirección X-X)

THYY (Tiempo historia en la dirección Y-Y)

SPX (Carga sísmica espectral en la dirección X)

SPY (Carga sísmica espectral en la dirección Y)

b. Combinaciones de carga

Se han considerado las siguientes combinaciones de carga:

1.4 CM + 1.7 CV

1.25 CM + 1.25 CV \pm SP_{x,y}

0.90 CM \pm SP_{x,y}

Donde:

CM: Carga Muerta

CV: Carga Viva

SP_{x,y}: Carga de sismo en las direcciones x e y

7.1.4. Análisis del Edificio Universal sin disipadores.

El punto de partida para desarrollar el cálculo de un edificio utilizando disipadores de energía es estimar la respuesta de la estructura sin la presencia de los dispositivos disipadores de energía. A continuación se presentan el modelo matemático del Edificio Universal:

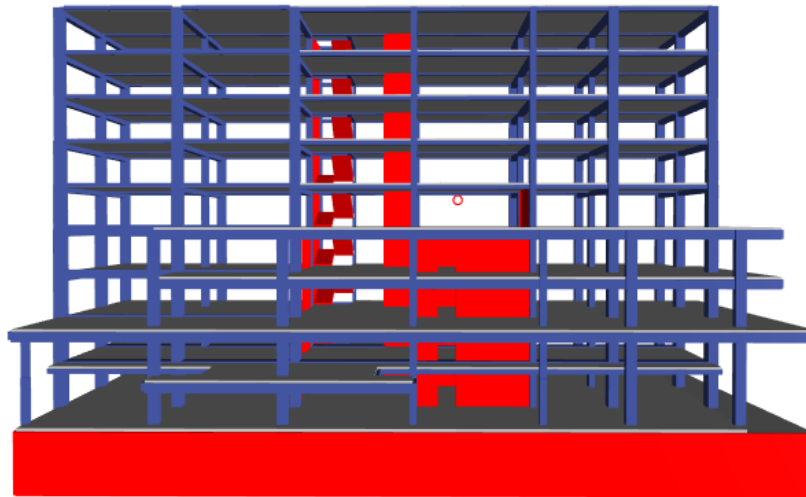


Figura N° 7.5 Vista frontal del modelo matemático tridimensional, desde la Av. Lampa

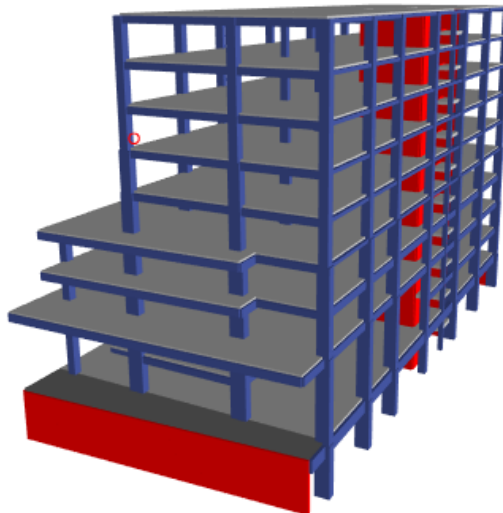


Figura N° 7.6 Vista lateral del modelo matemático tridimensional, desde el Jr. Junín

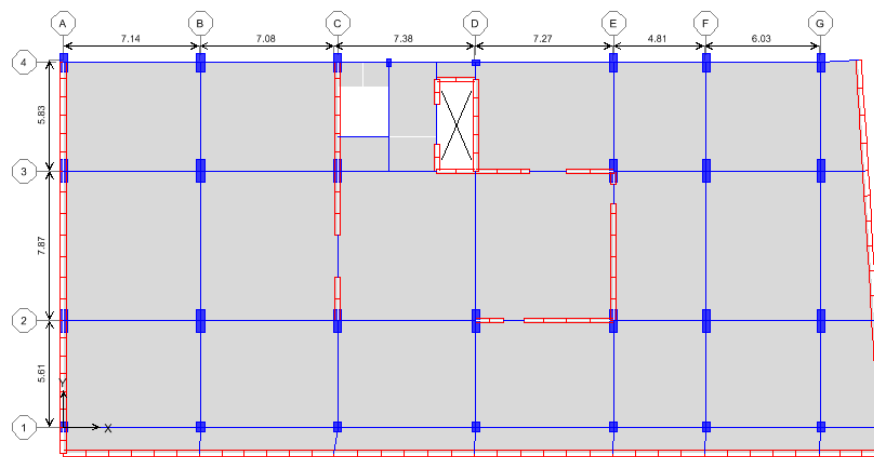


Figura N° 7.7 Planta estructural Sótano

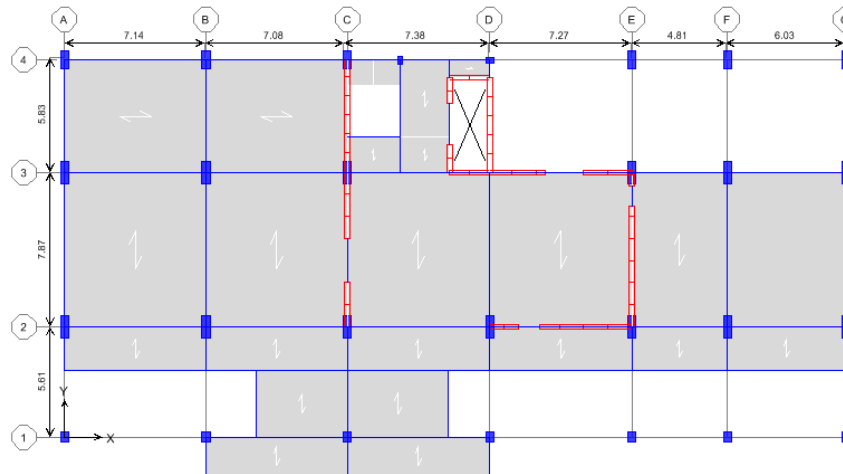


Figura N° 7.8 Planta estructural Mezanine

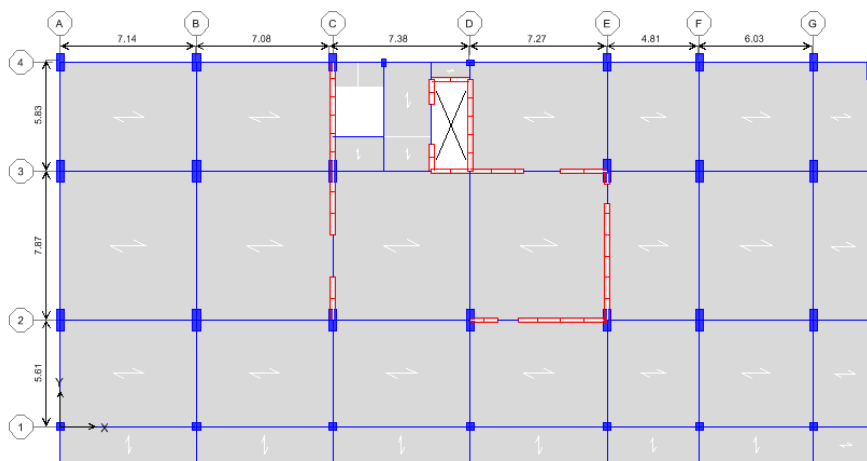


Figura N° 7.9 Planta estructural 1er. Piso

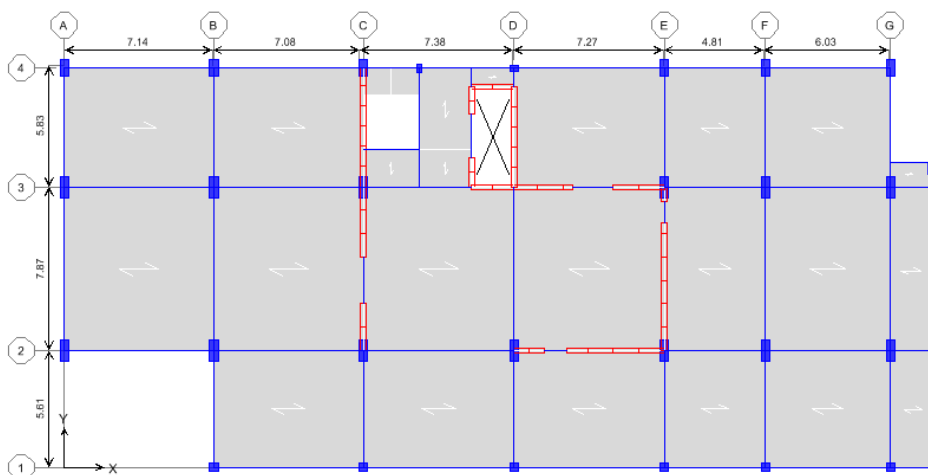


Figura N° 7.10 Planta estructural típica del 2do. y 3er. Piso

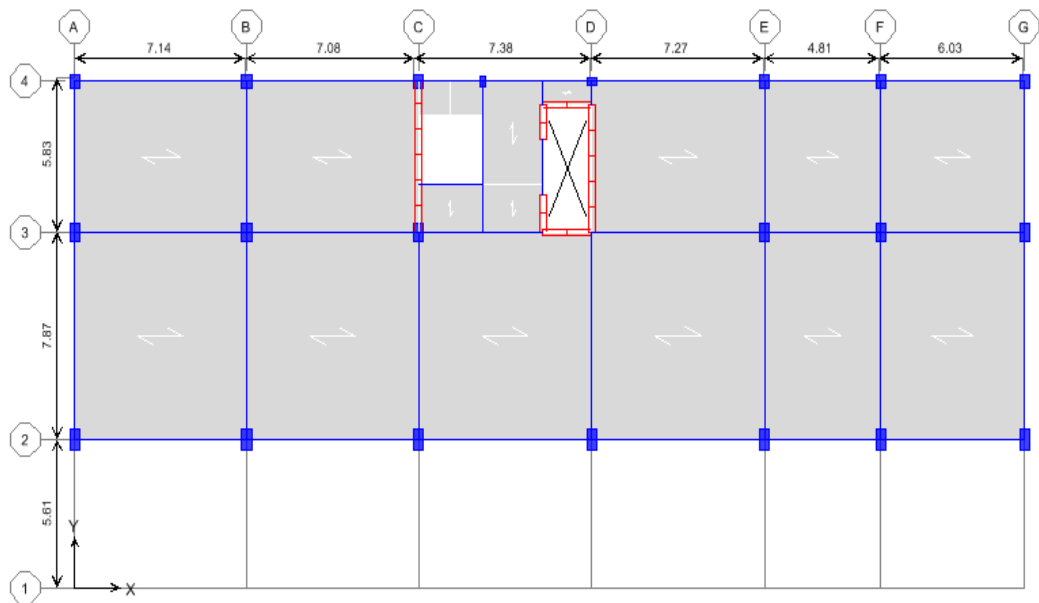


Figura N° 7.11 Planta estructural típica del 4to. al 8vo. Piso

Para la elaboración del modelo matemático y los planos estructurales del presente proyecto, se ha tomado como referencia las mediciones realizadas en campo, y los planos del e1 al e6 del proyecto de reforzamiento estructural realizado por la empresa GALLEGOS + RIOS + CASABONNE + UCCELLI + ICOCHEA + ARANGO en el mes de marzo del año 1,980 para la CIA. De Seguros “LA UNIVERSAL”.

a. Secciones agrietadas:

Por tratarse de una edificación que tiene más de 50 años y que ha soportado sismos moderados en su vida útil, se utilizó la recomendación del FEMA 356, de utilizar secciones agrietadas, tomando como inercia efectiva en columnas el 70% de la inercia bruta y en el 50% en las vigas.

Columnas	70% I_g
Vigas	50% I_g

b. Cargas actuantes:

• **Carga muerta:**

El programa ETABS calcula internamente el peso de la estructura modelada. Se ha considerado una carga adicional de 0.10 t/m² y 0.25 t/m² en el estado de carga muerta a fin de considerar el peso de los acabados y la tabiquería respectivamente. La carga de albañilería se ha colocado donde verdaderamente

se ubican estos elementos y la carga distribuida por área en las zonas de oficinas administrativas y baños.

- **Carga viva:**

La carga viva considerada en el análisis estructural de los modelos matemáticos son de dos tipos de sobrecarga, la primera es la sobrecarga en las oficinas de 250 kg/m² y la segunda es en los pasadizos y escaleras de 400 kg/m², de acuerdo a la Norma Técnica E-020 del Reglamento Nacional de Edificaciones del Perú. En los voladizos se ha considerado una carga viva de 100 kg/m². La sobrecarga considerada en la azotea es de 250 kg/m² ya que está siendo utilizada como oficinas y en algunos ambientes como almacenes.

- **Carga de sismo:**

La evaluación y reforzamiento del edificio Universal se realizó cuando estaba en vigencia la norma sísmica E030 anterior, por lo cual para poder realizar comparaciones con la disposición Chevron original se ha tomado en cuenta la norma sísmica E030 anterior cuyos parámetros sísmicos se muestran:

Tabla N° 7.1 Parámetros sísmicos utilizados

PARÁMETROS SÍSMICOS	
Zonificación sísmica	Zona 3, $z = 0.40$
Categoría de edificación	Categoría "B", $U = 1.30$
Parámetros del suelo	Tipo S1, $T_p = 0.40$ s, $S = 1.0$
Sistema estructural	Muros estructurales
Configuración estructural	Irregular
Coeficiente de reducción	$R = 4.5$
Límite distorsión lateral	$\Delta_i / h_i \times 0.75r \leq 0.007, C^\circ A^\circ$

c. Análisis Modal espectral.

El análisis sísmico modal espectral, se realizó según la norma NTE E-030 (2003), con el procedimiento de superposición modal espectral, con combinación cuadrática completa (CQC). Se ha considerado 5% de amortiguamiento de la estructura.

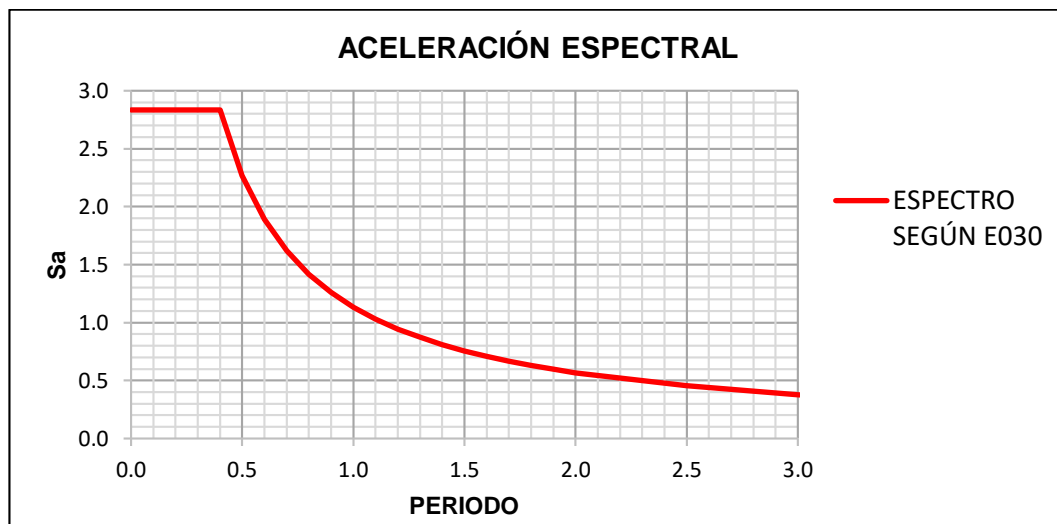


Figura N° 7.12 Espectro de diseño de acuerdo a la norma E-030

d. Análisis Tiempo - Historia.

Para el análisis Tiempo-Historia no lineal se han seleccionado tres registros sísmicos sintéticos los cuales han sido debidamente escalados al espectro de diseño de la norma E-030 (CISMID - UNI).

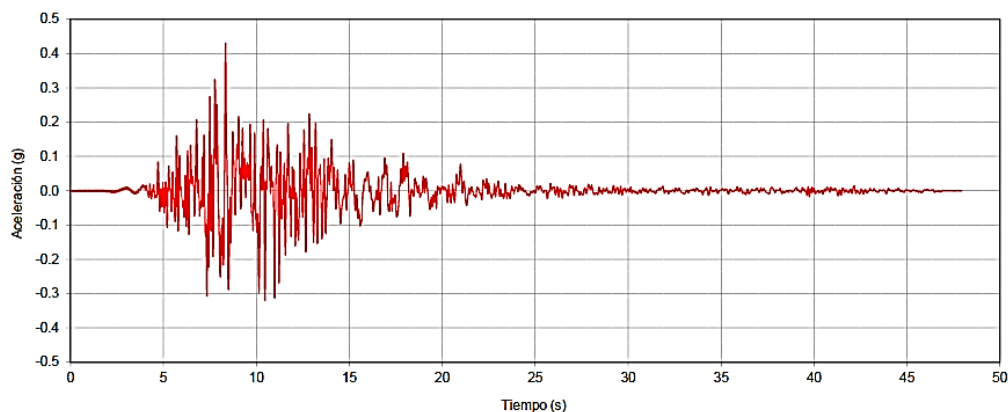


Figura N° 7.13 Registro de aceleraciones – Sismo 1995 Japón Kobe aceleración máxima 0.43g, suelo S1 (CISMID UNI)

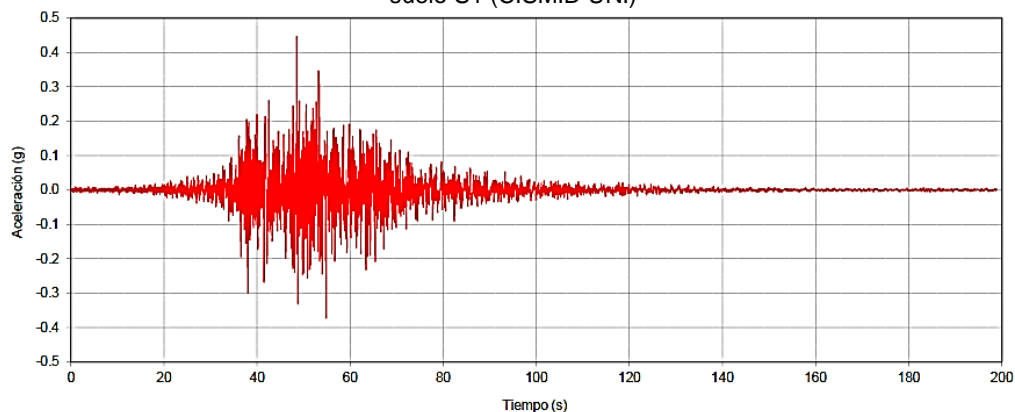


Figura N° 7.14 Registro de aceleraciones – Sismo 2001 Arequipa-Moquegua aceleración máxima 0.45g, suelo S1 (CISMID UNI)

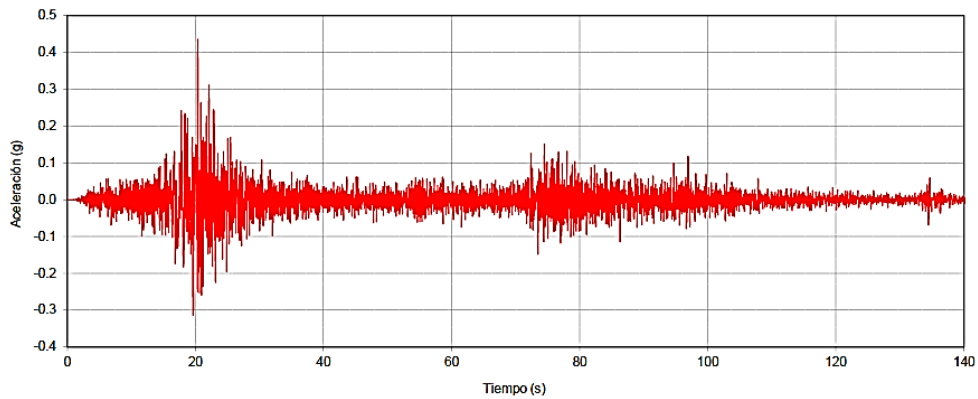
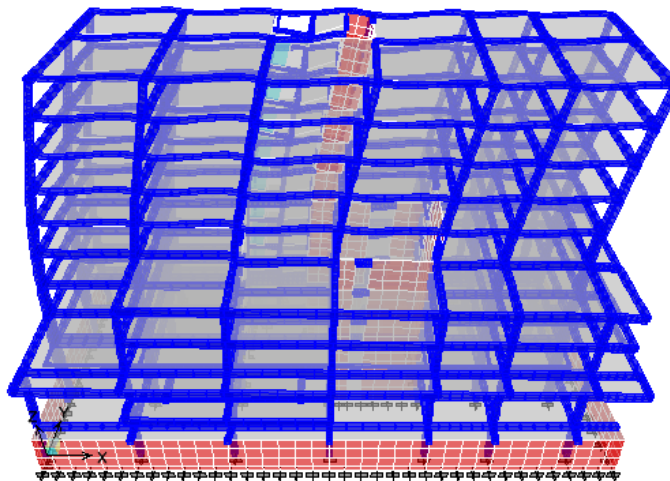


Figura N° 7.15 Registro de aceleraciones – Sismo 2007 Pisco PCN aceleración máxima 0.43g, suelo S1 (CISMID UNI)

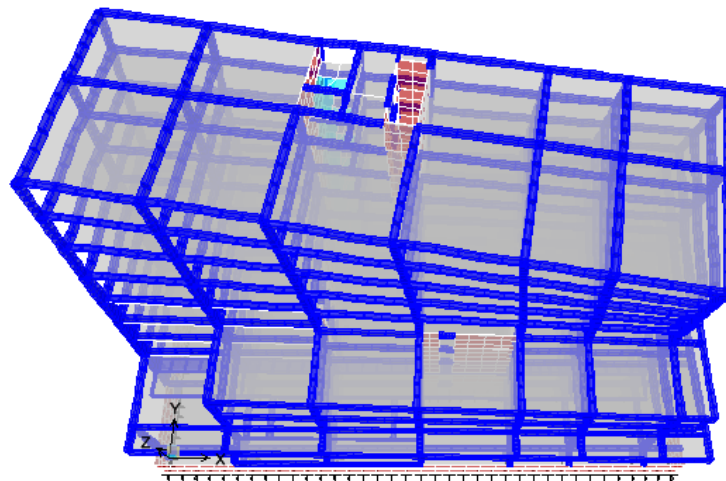
e. Resultados obtenidos.

- **Periodos y formas de modo del modelo**



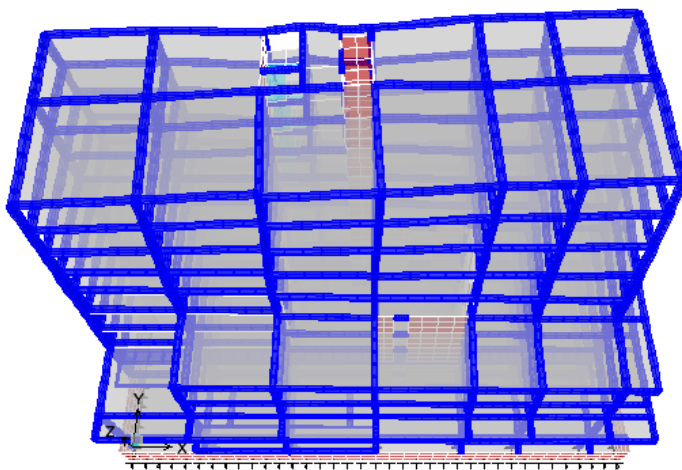
MODO 1: $T_1 = 1.429$ seg.

Figura N° 7.16 Forma de modo 1



MODO 2: $T_2 = 1.221$ seg.

Figura N° 7.17 Forma de modo 2



MODO 3: T3 = 0.715 seg.

Figura N° 7.18 Forma de modo 3

Se observa que el primer modo de vibración tienen forma traslacional y el segundo y tercer modo tienen forma rotacional.

- **Máximas distorsiones.**

Las máximas distorsiones de la edificación en su estado actual según el análisis tiempo historia y espectral son las siguientes:

Dirección X – X

Tabla N° 7.2 Máximas distorsiones en la dirección X – X (Pórticos no reforzados)

NIVEL	AREQ	AREQB	KOBE	KOBEB	PISCO	PISCOB	MAX TH	ESPECTRAL
8	0.0158	0.0162	0.0178	0.0174	0.0157	0.0186	0.0186	0.0166
7	0.0160	0.0160	0.0182	0.0176	0.0154	0.0185	0.0185	0.0167
6	0.0151	0.0150	0.0172	0.0162	0.0142	0.0168	0.0172	0.0155
5	0.0139	0.0128	0.0140	0.0135	0.0124	0.0135	0.0140	0.0133
4	0.0110	0.0102	0.0098	0.0102	0.0100	0.0103	0.0110	0.0106
3	0.0056	0.0060	0.0059	0.0064	0.0060	0.0058	0.0064	0.0063
2	0.0047	0.0052	0.0056	0.0055	0.0054	0.0051	0.0056	0.0056
1	0.0042	0.0044	0.0052	0.0046	0.0048	0.0044	0.0052	0.0050
MEZANINE	0.0030	0.0028	0.0033	0.0027	0.0029	0.0027	0.0033	0.0031

Dirección Y – Y

Tabla N° 7.3 Máximas distorsiones en la dirección Y – Y (Pórticos no reforzados)

NIVEL	AREQ	AREQB	KOBE	KOBEB	PISCO	PISCOB	MAX TH	ESPECTRAL
8	0.0110	0.0139	0.0113	0.0165	0.0121	0.0119	0.0165	0.0162
7	0.0121	0.0150	0.0125	0.0181	0.0134	0.0129	0.0181	0.0180
6	0.0121	0.0142	0.0122	0.0166	0.0128	0.0123	0.0166	0.0182
5	0.0096	0.0107	0.0095	0.0114	0.0107	0.0095	0.0114	0.0148
4	0.0064	0.0060	0.0061	0.0067	0.0061	0.0057	0.0067	0.0099
3	0.0062	0.0062	0.0065	0.0061	0.0057	0.0057	0.0065	0.0078
2	0.0052	0.0058	0.0056	0.0055	0.0051	0.0051	0.0058	0.0071
1	0.0045	0.0050	0.0047	0.0049	0.0045	0.0045	0.0050	0.0060
MEZANINE	0.0031	0.0035	0.0033	0.0035	0.0030	0.0029	0.0035	0.0042

Del análisis de los resultados se concluye que la estructura del Edificio Universal no cumple con los requisitos de rigidez establecidos en la Norma de Diseño Sismorresistente NTE E.030, pues presentan desplazamientos muy por encima del límite reglamentario.

Antes de la colocación de los disipadores de energía, se ha procedido a reforzar algunos elementos estructurales en las zonas de colocación de disipadores.

Dirección X – X

Tabla N° 7.4 Máximas distorsiones en la dirección X – X (Pórticos reforzados)

NIVEL	AREQ	AREQB	KOBE	KOBEB	PISCO	PISCOB	MAX TH	ESPECTRAL
8	0.0147	0.0166	0.0171	0.0166	0.0143	0.0180	0.0180	0.0155
7	0.0148	0.0165	0.0169	0.0164	0.0140	0.0178	0.0178	0.0154
6	0.0145	0.0150	0.0152	0.0147	0.0131	0.0160	0.0160	0.0145
5	0.0133	0.0123	0.0125	0.0130	0.0120	0.0127	0.0133	0.0128
4	0.0103	0.0099	0.0095	0.0104	0.0096	0.0100	0.0104	0.0102
3	0.0060	0.0062	0.0067	0.0067	0.0061	0.0059	0.0067	0.0064
2	0.0050	0.0052	0.0063	0.0057	0.0054	0.0051	0.0063	0.0056
1	0.0042	0.0047	0.0058	0.0047	0.0048	0.0045	0.0058	0.0049
MEZANINE	0.0028	0.0028	0.0035	0.0026	0.0028	0.0026	0.004	0.0029

Dirección Y – Y

Tabla N° 7.5 Máximas distorsiones en la dirección Y – Y (Pórticos reforzados)

NIVEL	AREQ	AREQB	KOBE	KOBEB	PISCO	PISCOB	MAX TH	ESPECTRAL
8	0.0089	0.0096	0.0088	0.0119	0.0100	0.0113	0.0119	0.0122
7	0.0099	0.0100	0.0090	0.0128	0.0108	0.0122	0.0128	0.0133
6	0.0096	0.0094	0.0092	0.0116	0.0101	0.0121	0.0121	0.0133
5	0.0078	0.0079	0.0078	0.0082	0.0086	0.0103	0.0103	0.0112
4	0.0080	0.0066	0.0071	0.0072	0.0064	0.0079	0.0080	0.0086
3	0.0071	0.0064	0.0068	0.0070	0.0058	0.0079	0.0079	0.0066
2	0.0057	0.0057	0.0058	0.0060	0.0047	0.0068	0.0068	0.0057
1	0.0046	0.0049	0.0048	0.0052	0.0036	0.0059	0.0059	0.0048
MEZANINE	0.0032	0.0035	0.0035	0.0034	0.0026	0.0037	0.004	0.0035

Las máximas distorsiones inelásticas en la dirección X e Y se presentan para los registros sintéticos de PISCO y KOBE de 0.018 y 0.0128 respectivamente.

Las distorsiones críticas se presentan a partir del 4to nivel, esto se debe a que a partir de dicho nivel las placas no son continuas tal como se observa en las Figuras N° 7.11 y 7.12.

7.1.5. Análisis del Edificio Universal con disipadores.

En base a los resultados obtenidos en el Capítulo 5, se ha planteado la aplicación de disipadores en disipación Upper Togle el cual resultado más eficiente.

a. Parámetros geométricos considerados.

Para la aplicación de esta disposición se ha tenido en cuenta la geometría de los pórticos del Edificio Universal.

Tabla N° 7.6 Parámetros Geométricos considerados.

PARÁMETROS GEOMÉTRICOS							
	TRAMO	θ_1	θ_2	θ_3	θ_4	L1/D	f
Piso 4 al 8							
EJE 2 Y 4	B-C y D-E	15	53.12	-	77.92	0.8	1.95
	FG	20	55.14	-	76.8	0.8	2.73
EJE A Y G	2-3	14	56.06	-	79.11	0.8	2.01
Piso 2 y 3							
EJE 1	B-C	15	51.99	-	77.43	0.8	1.91
	F-G	20	53.89	-	76.2	0.8	2.59

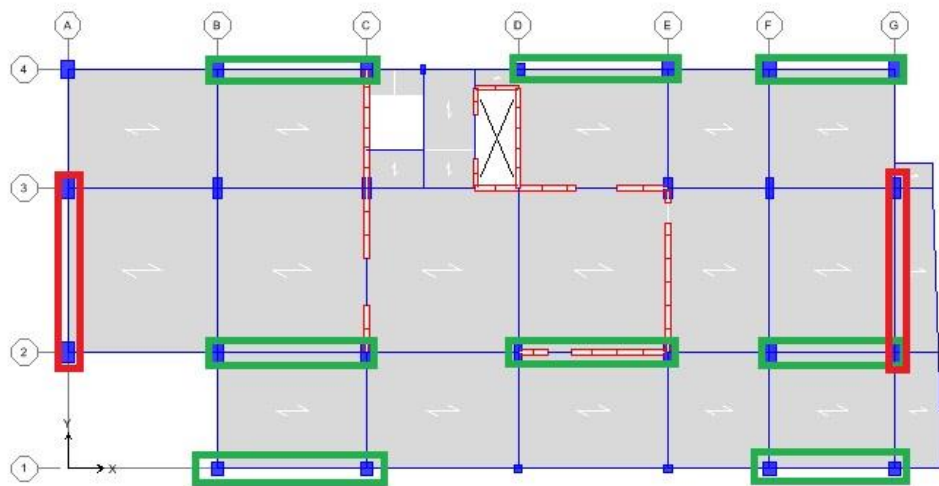
De la Tabla N° 7.6, notamos que el factor de amplificación presenta valores del orden 2, en teoría esto indica que se obtendría resultados similares a los que se obtendrían utilizando una disposición Chevron Doble.

b. Ubicación de dispositivos de amortiguamiento.

Se ha considerado colocarlos en los pórticos exteriores, como mínimo en dos ejes en cada dirección.

De esta forma, se consigue alejar los amortiguadores del centro de masa y así puedan trabajar en la zona de máximas velocidades (zona de mayor efectividad de los dispositivos fluido viscoso).

Del mismo modo se ha considerado colocar los dispositivos a partir del cuarto piso ya que es a partir de ahí que se presentan Distorsiones superiores a las reglamentarias. En el Eje 1 se han colocado los dispositivos en los pisos 2 y 3.



VERDE = DISIPADORES EN LA DIRECCION X-X

ROJO = DISIPADORES EN LA DIRECCION Y-Y

Figura N° 7.19 Ubicación de los disipadores en el Edificio Universal

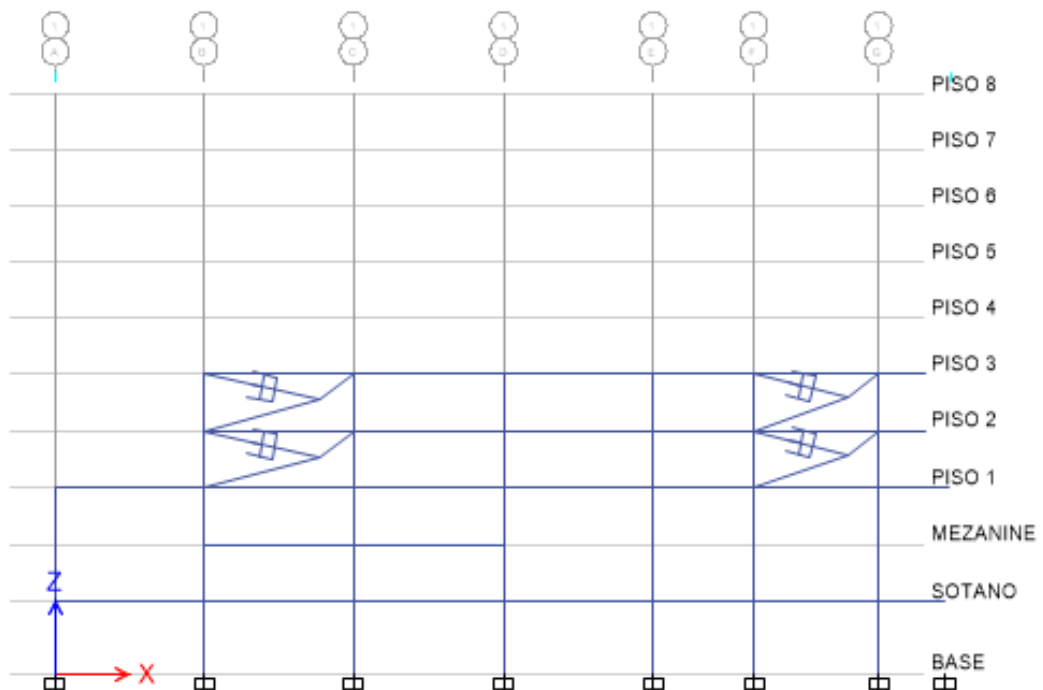


Figura N° 7.20 Ubicación de disipadores en el EJE 1

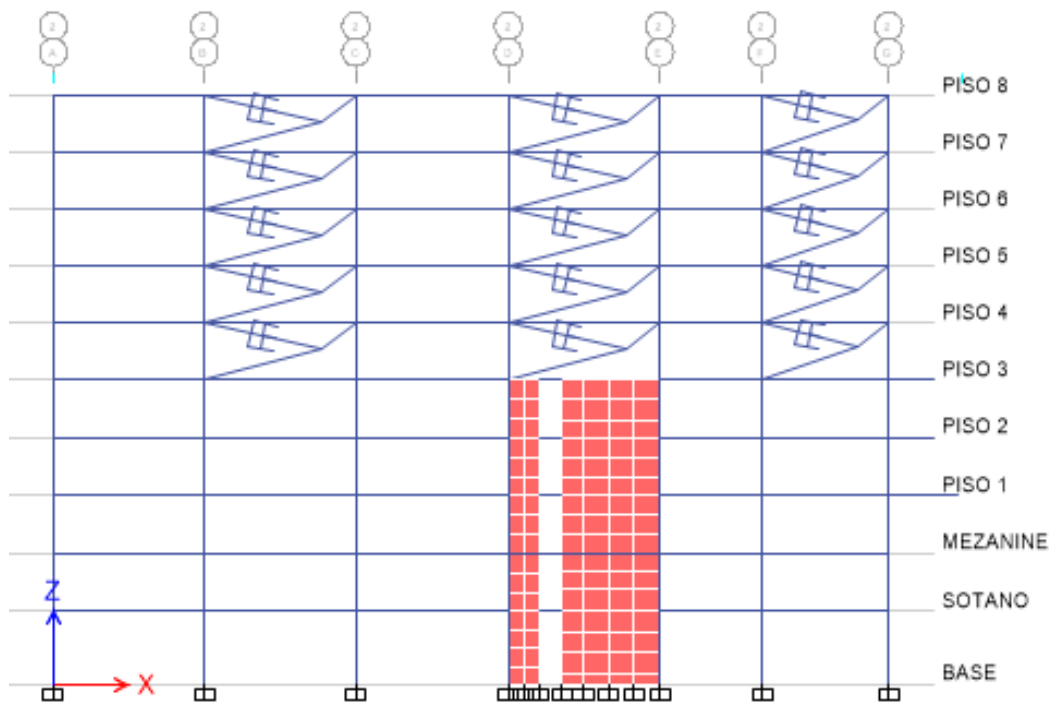


Figura N° 7.21 Ubicación de disipadores en el EJE 2

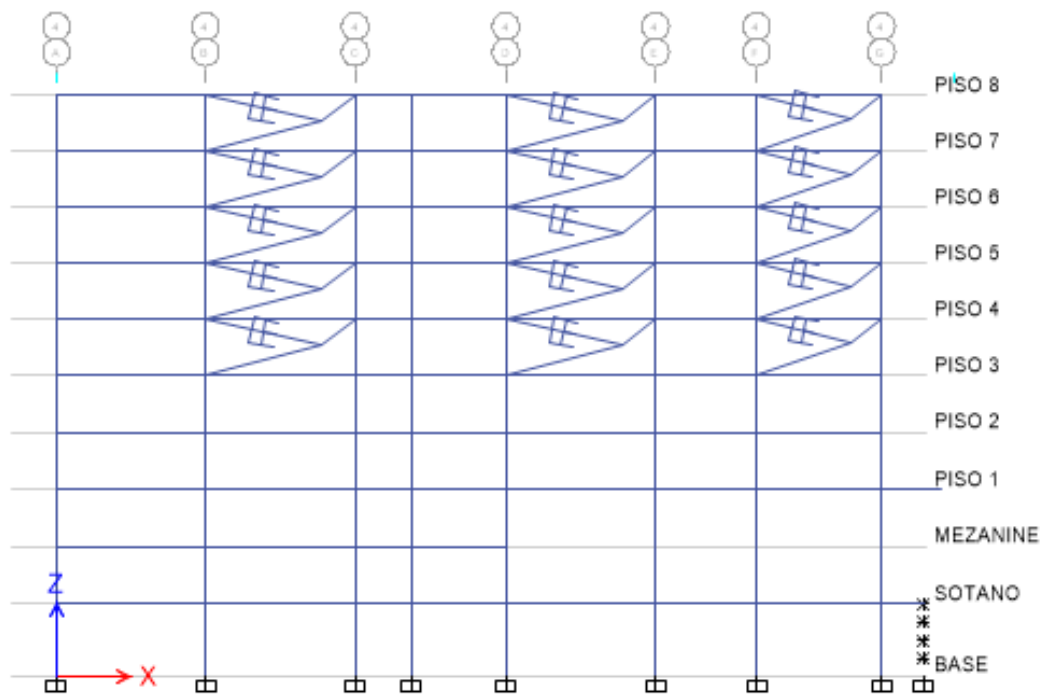


Figura N° 7.22 Ubicación de disipadores en el EJE 4

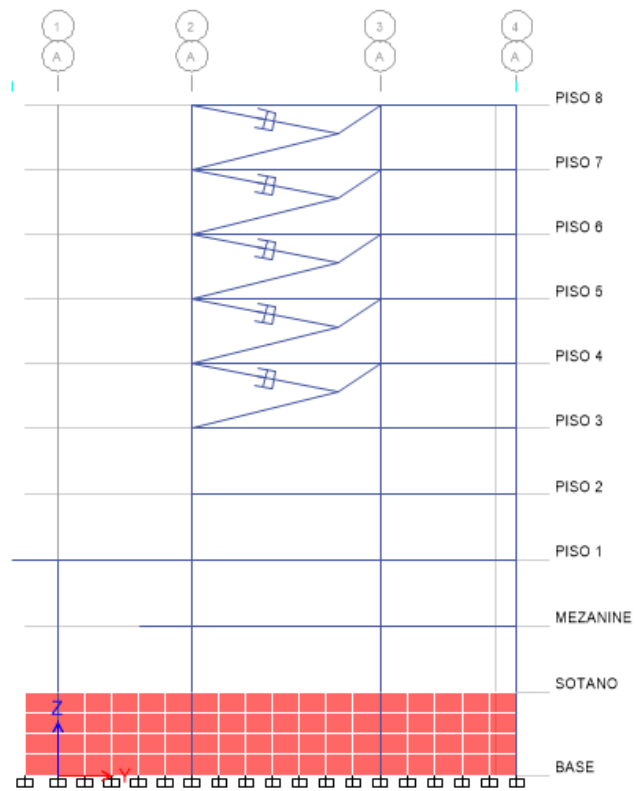


Figura N° 7.23 Ubicación de disipadores en el EJE A

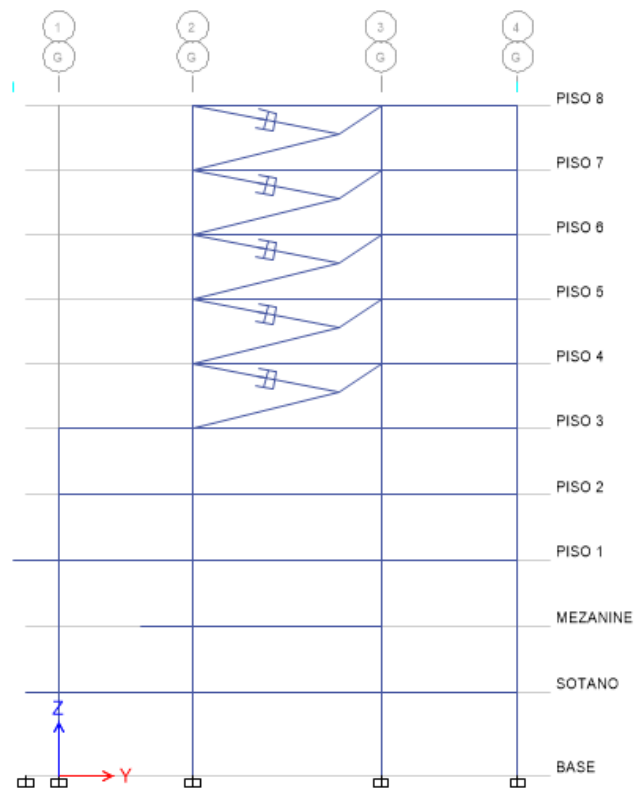


Figura N° 7.24 Ubicación de disipadores en el EJE G

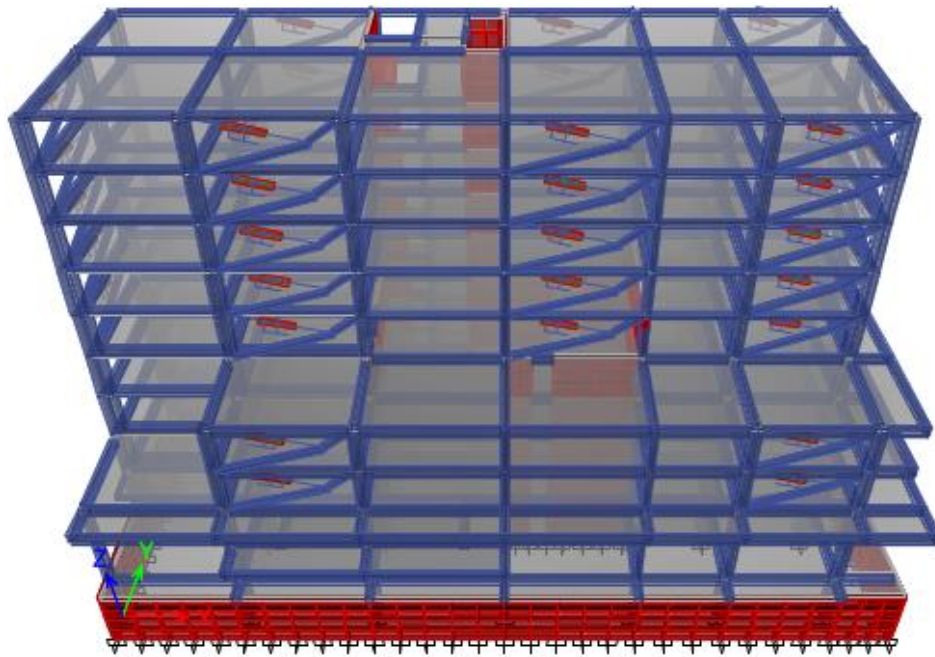


Figura N° 7.25 Vista tridimensional del modelo matemático del Edificio Universal con Disipadores

c. Estimación de parámetros del sistema de amortiguamiento.

• Coeficiente de amortiguamiento C

El valor de C, se ha ido optimizando iterativamente hasta lograr un amortiguamiento adecuado y una distorsión de entrepiso menor o igual a la admisible. De esta manera se obtuvieron los siguientes valores de C:

En la dirección X – X:

$$C = 150 (t - \text{seg}/m)^{1/\alpha}$$

En la dirección Y – Y:

$$C = 350 (t - \text{seg}/m)^{1/\alpha}$$

• Exponente de velocidad α

Se han considerado dispositivos no lineales por tanto se han tomado valores del exponente de velocidad menores a la unidad:

En la dirección X – X:

$$\alpha = 0.6$$

En la dirección Y – Y:

$$\alpha = 0.6$$

- **Cálculo de la rigidez axial**

El valor de K, se ha ido optimizando iterativamente utilizando la Ec. 4.7 hasta lograr una rigidez axial adecuada. De esta manera se obtuvieron los siguientes valores de K:

Dirección X – X**Pisos 4 al 7**

- **Entre ejes B - C y D - E**

- ✓ $E = 29000 \text{ Ksi} = 2.04\text{E}+07 \text{ t/m}^2$
- ✓ $L = 5.729 \text{ m}$
- ✓ $A = 10.3 \text{ in}^2 = 0.0066 \text{ m}^2$

$$K = 23644.64 \text{ ton/m}^2$$

- **Entre ejes F - G**

- ✓ $E = 29000 \text{ Ksi} = 2.04\text{E}+07 \text{ t/m}^2$
- ✓ $L = 4.64 \text{ m}$
- ✓ $A = 10.3 \text{ in}^2 = 0.0066 \text{ m}^2$

$$K = 29195.011 \text{ t/m}^2$$

Pisos 2 y 3

- **Entre ejes B - C y D - E**

- ✓ $E = 29000 \text{ Ksi} = 2.04\text{E}+07 \text{ t/m}^2$
- ✓ $L = 5.74 \text{ m}$
- ✓ $A = 9 \text{ in}^2 = 0.0058 \text{ m}^2$

$$K = 20621.49 \text{ t/m}^2$$

- **Entre ejes F - G**

- ✓ $E = 29000 \text{ Ksi} = 2.04\text{E}+07 \text{ t/m}^2$
- ✓ $L = 4.64 \text{ m}$
- ✓ $A = 9 \text{ in}^2 = \text{m}^2$

$$K = 25510.204 \text{ t/m}^2$$

Dirección Y – Y**Pisos 4 al 7**

- **Entre ejes 2 – 3**

- ✓ $E = 29000 \text{ Ksi} = 2.04\text{E}+07 \text{ t/m}^2$
- ✓ $L = 6.22 \text{ m}$
- ✓ $A = 17.2 \text{ in}^2 = 0.0111 \text{ m}^2$

$$K = 6368.67 \text{ t/m}^2$$

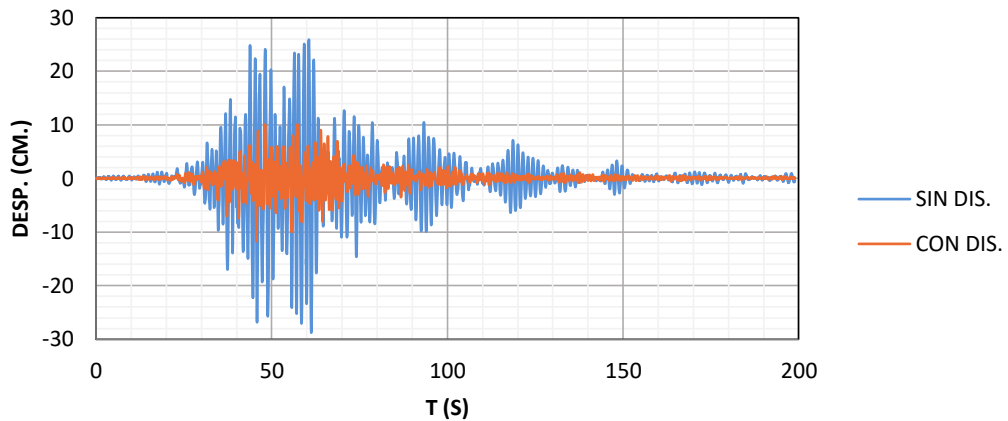
d. Resultados obtenidos.

- **Máximos desplazamientos**

Se muestran los siguientes gráficos, en la que se compara el desplazamiento con disipadores y sin disipadores:

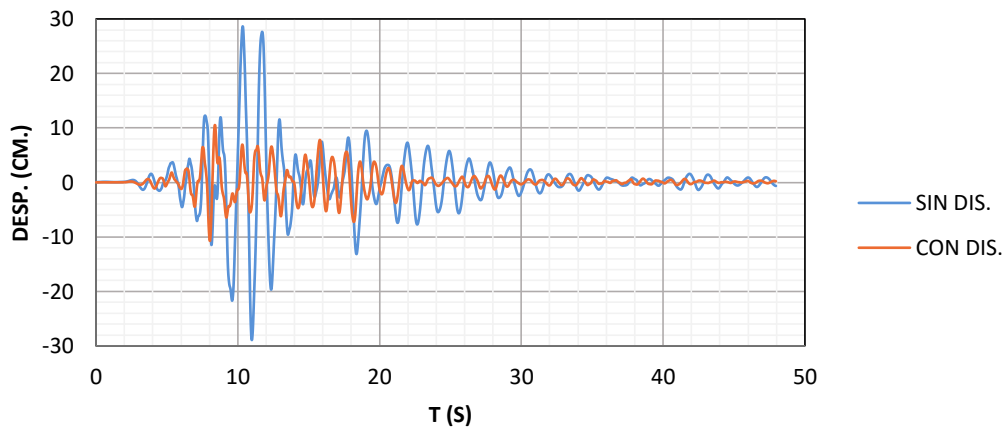
Dirección X – X

DESPLAZAMIENTO X-X AREQ.



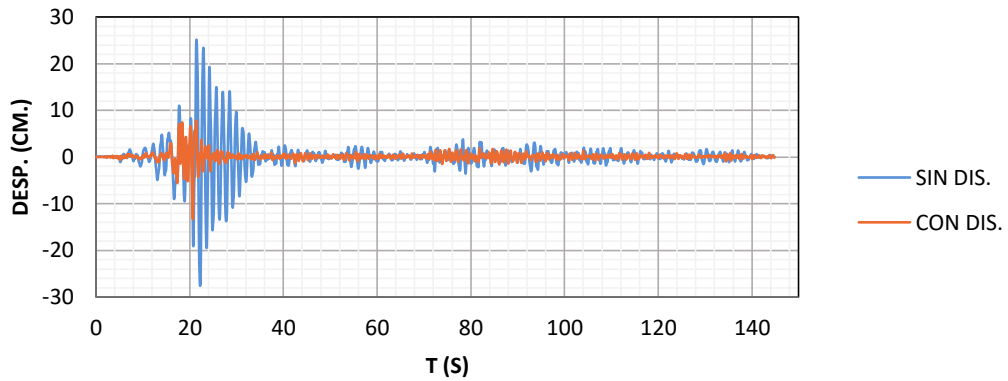
(a)

DESPLAZAMIENTO X-X KOBE



(b)

DESPLAZAMIENTO X-X PISCO

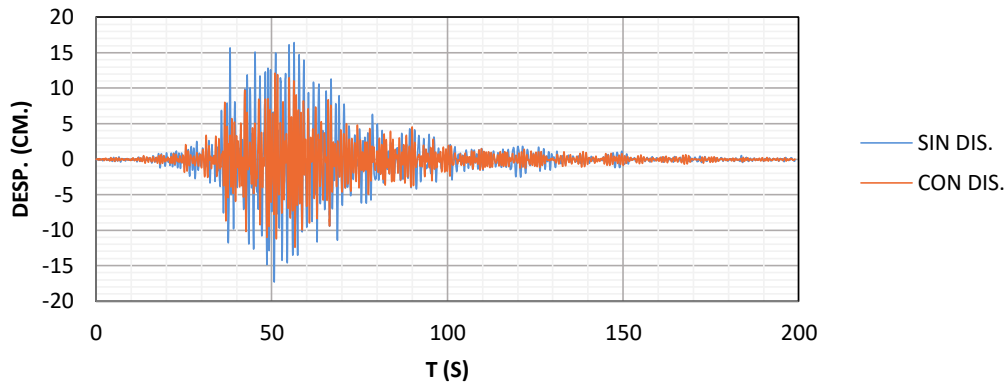


(c)

Figura N° 7.26 Historia de desplazamientos en la dirección X-X. (a) Sismo Arequipa, (b) Sismo de Kobe, (c) Sismo de pisco

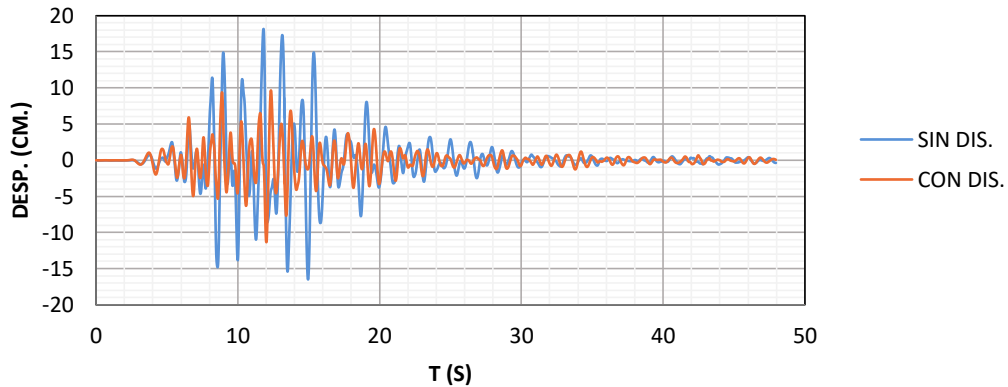
Dirección Y – Y

DESPLAZAMIENTO Y-Y AREQ.



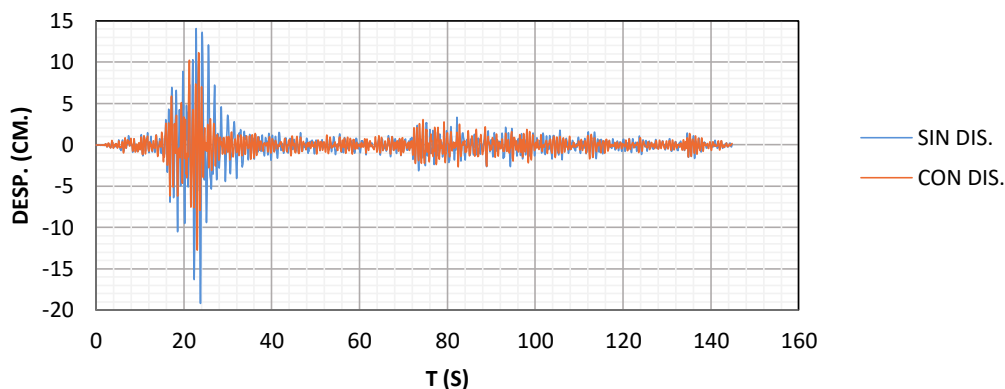
(a)

DESPLAZAMIENTO Y-Y KOBE



(b)

DESPLAZAMIENTO Y-Y PISCO



(c)

Figura N° 7.27 Historia de desplazamientos en la dirección Y-Y. (a) Sismo Arequipa, (b) Sismo de Kobe, (c) Sismo de pisco

• Máximas distorsiones

Se muestran los resultados obtenidos en las siguientes tablas:

Dirección X – X

Tabla N° 7.7 Distorsiones máximas en la dirección X – X.

NIVEL	AREQ	AREQB	KOBE	KOBEB	PISCO	PISCOB	MAX TH
8	0.0042	0.0044	0.0040	0.0040	0.0035	0.0051	0.0051
7	0.0047	0.0048	0.0047	0.0045	0.0039	0.0056	0.0056
6	0.0051	0.0051	0.0051	0.0049	0.0042	0.0061	0.0061
5	0.0053	0.0050	0.0050	0.0050	0.0043	0.0060	0.0060
4	0.0047	0.0044	0.0041	0.0045	0.0041	0.0054	0.0054
3	0.0033	0.0035	0.0033	0.0035	0.0035	0.0042	0.0042
2	0.0031	0.0032	0.0030	0.0031	0.0032	0.0041	0.0041
1	0.0027	0.0029	0.0027	0.0028	0.0029	0.0038	0.0038
MEZANINE	0.0019	0.0018	0.0018	0.0016	0.0018	0.0023	0.0023

Dirección Y – Y

Tabla N° 7.8 Distorsiones máximas en la dirección Y – Y.

NIVEL	AREQ	AREQB	KOBE	KOBEB	PISCO	PISCOB	MAX TH
8	0.0054	0.0052	0.0055	0.0054	0.0050	0.0049	0.0055
7	0.0056	0.0058	0.0057	0.0063	0.0060	0.0048	0.0063
6	0.0062	0.0061	0.0063	0.0069	0.0068	0.0054	0.0069
5	0.0059	0.0056	0.0062	0.0068	0.0066	0.0054	0.0068
4	0.0056	0.0046	0.0055	0.0055	0.0049	0.0047	0.0056
3	0.0050	0.0044	0.0054	0.0054	0.0055	0.0041	0.0055
2	0.0044	0.0040	0.0048	0.0049	0.0048	0.0036	0.0049
1	0.0039	0.0034	0.0043	0.0044	0.0044	0.0033	0.0044
MEZANINE	0.0029	0.0024	0.0028	0.0027	0.0026	0.0023	0.0029

Las tablas N° 7.7 y 7.8, se han graficado como se muestra en las Figuras N° 7.29 y 7.30. Se puede apreciar que las Distorsiones excesivas que se tenían a partir del cuarto piso han sido debidamente controladas y llevadas a Distorsiones menores a la permisible.

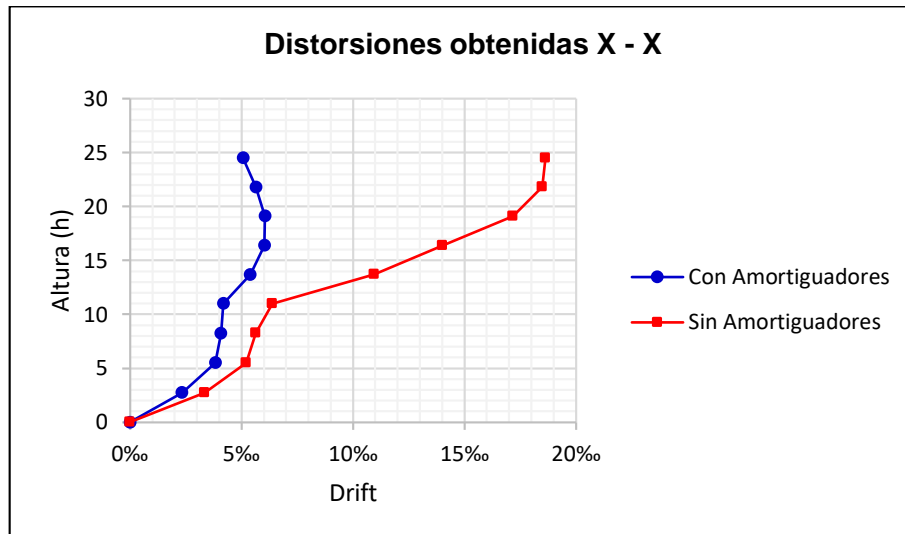


Figura N° 7.28 Comparación de Distorsiones X-X

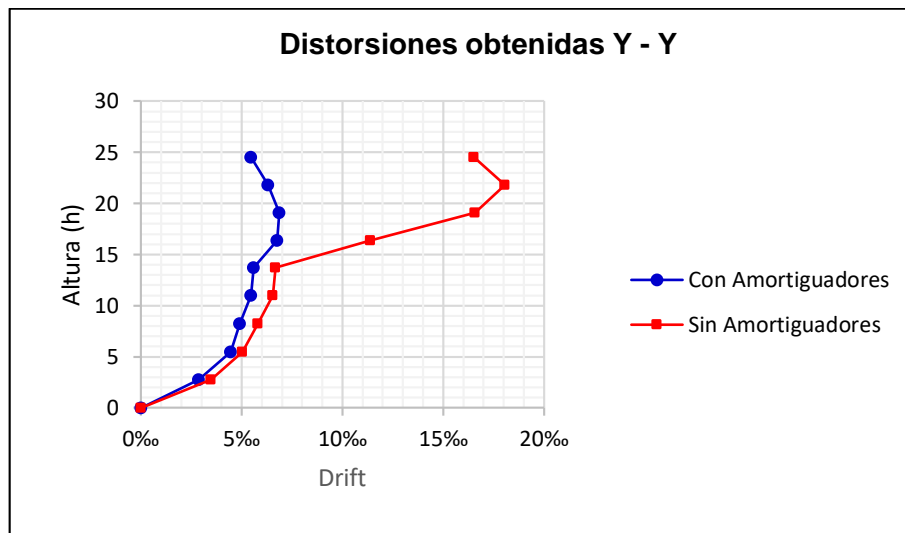


Figura N° 7.29 Comparación de Distorsiones Y-Y

A continuación se muestran las tablas N° 7.9 y N° 7.10 en la que se presenta la reducción de la distorsión como porcentajes, se observa que en los pisos superiores se logra reducir la Distorsiones en más del 70% para la dirección X-X y en más del 65% para la dirección Y-Y.

Dirección X – X

Tabla N° 7.9 Comparación de reducción de Distorsiones en términos de porcentaje (X-X)

NIVEL	UPPER	SIN DISIPADORES	% REDUCCION
PISO 8	0.0051	0.019	72.79
PISO 7	0.0056	0.019	69.50
PISO 6	0.0061	0.017	64.70
PISO 5	0.0060	0.014	56.93
PISO 4	0.0054	0.011	50.68
PISO 3	0.0042	0.006	34.26
PISO 2	0.0041	0.006	27.54
PISO 1	0.0038	0.005	26.51
MEZANINE	0.0023	0.003	30.10

Dirección Y – Y

Tabla N° 7.10 Comparación de reducción de Distorsiones en términos de porcentaje (Y-Y)

NIVEL	UPPER	SIN DISIPADORES	% REDUCCION
PISO 8	0.0055	0.0165	66.93
PISO 7	0.0063	0.0181	65.06
PISO 6	0.0069	0.0166	58.57
PISO 5	0.0068	0.0114	40.68
PISO 4	0.0056	0.0067	16.10
PISO 3	0.0055	0.0065	16.66
PISO 2	0.0049	0.0058	15.45
PISO 1	0.0044	0.0050	11.83
MEZANINE	0.0029	0.0035	17.36

• Cálculo del amortiguamiento viscoso

Se ha considerado una función pulso para poder estimar el amortiguamiento añadido por los dispositivos viscosos; para ello se recomienda considerar una carga de duración corta menor al 10% del período de la estructura.

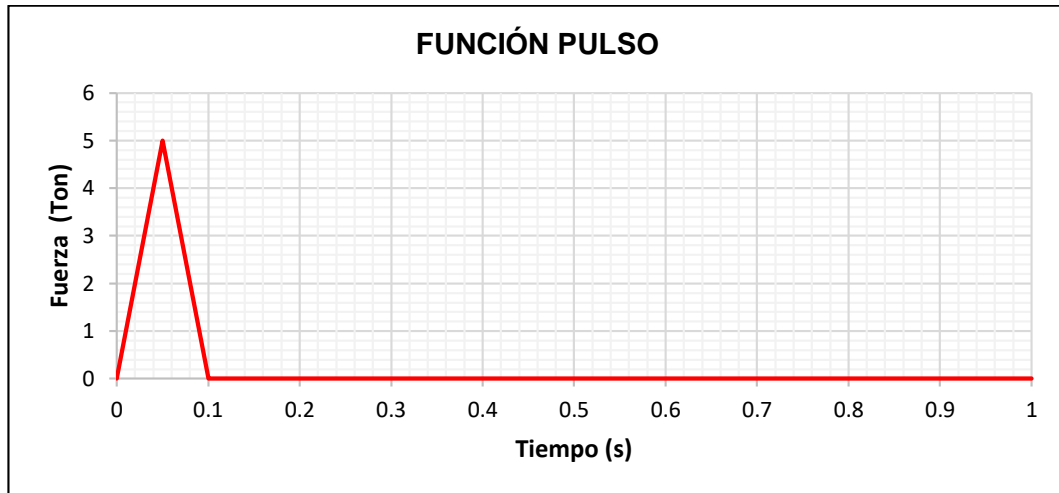


Figura N° 7.30 Función pulso

Dirección X – X

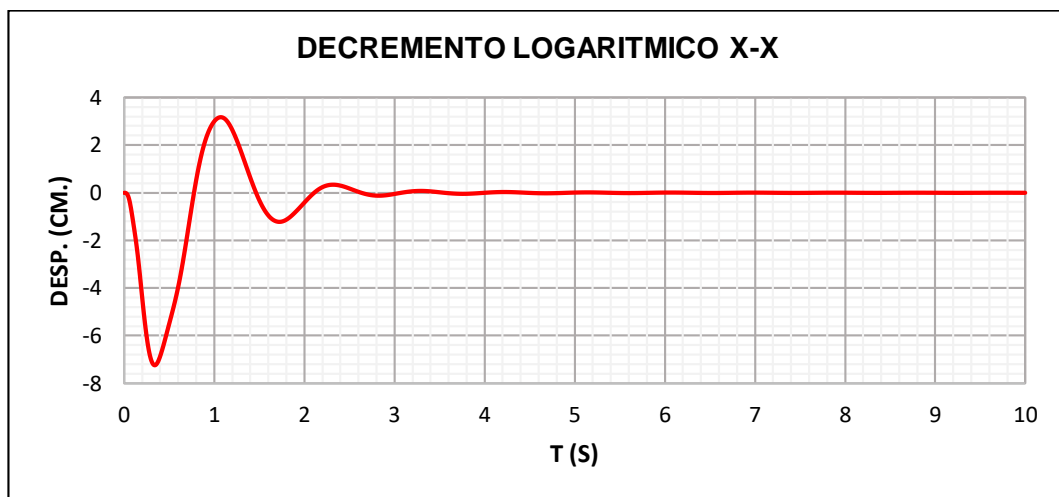


Figura N° 7.31 Decremento del desplazamiento en X-X

$$\ln\left(\frac{7.235742}{0.042348}\right) \cong \frac{6\pi\beta}{\sqrt{1-\beta^2}}$$

$$\beta = \beta_{eff} = 26.31\%$$

$$\beta_{visc} = 21.31\%$$

Para la dirección X – X se ha obtenido un amortiguamiento viscoso de 21.31% el cual muestra una gran influencia de los dispositivos en el comportamiento de la estructura.

Dirección Y – Y

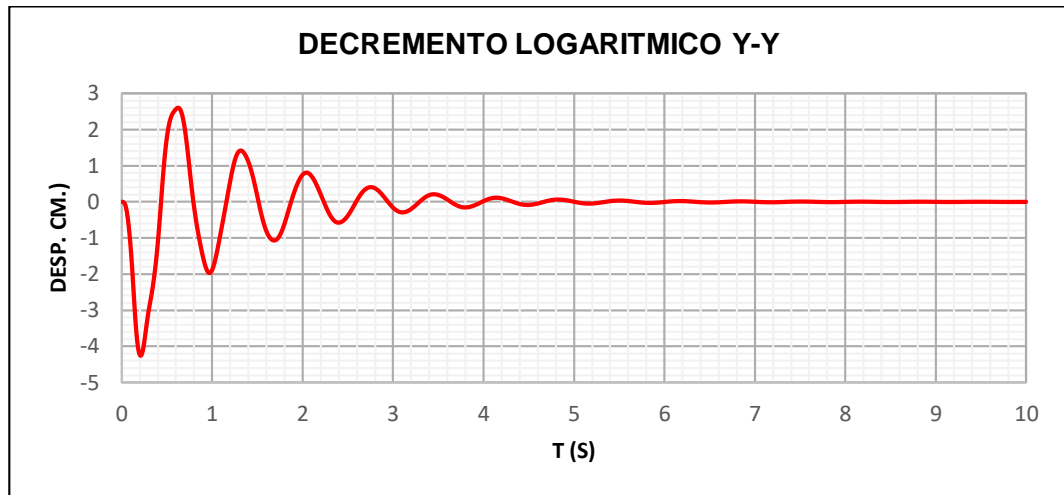


Figura N° 7.32 Decremento del desplazamiento en Y-Y

$$\ln \left(\frac{4.252436}{0.574559} \right) \cong \frac{6\pi\beta}{\sqrt{1-\beta^2}}$$

$$\beta = \beta_{eff} = 10.56\%$$

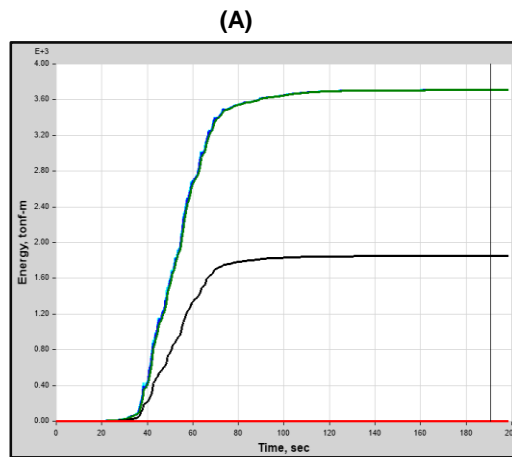
$$\beta_{visc} = 5.36\%$$

Para la dirección Y – Y se ha obtenido un amortiguamiento viscoso de 5.36% el cual muestra una menor influencia en el aporte del amortiguamiento que la dirección X – X.

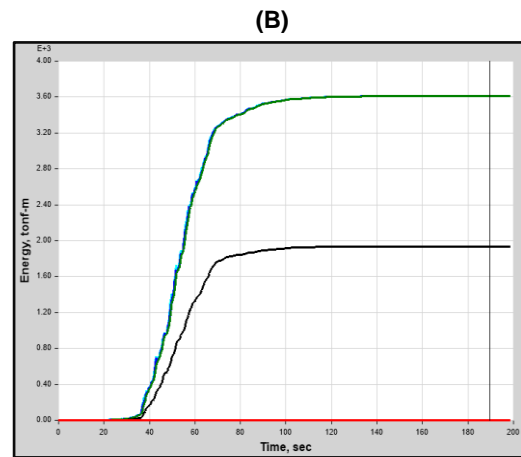
- **Balance de Energía**

Se muestran a continuación los gráficos de energía así como sus respectivos porcentajes de disipación de energía para cada uno de los sismos considerados. Se observa que el porcentaje de disipación de energía es mayor al 50% en la mayoría de los casos. Este porcentaje indica que la energía del sismo disipada por los amortiguadores es mayor que la energía disipada por la estructura de la edificación.

Registro Arequipa – Moquegua

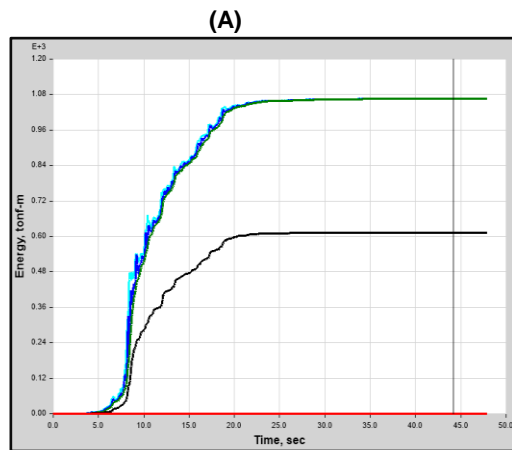


%DE DISIPACIÓN = 49.8%

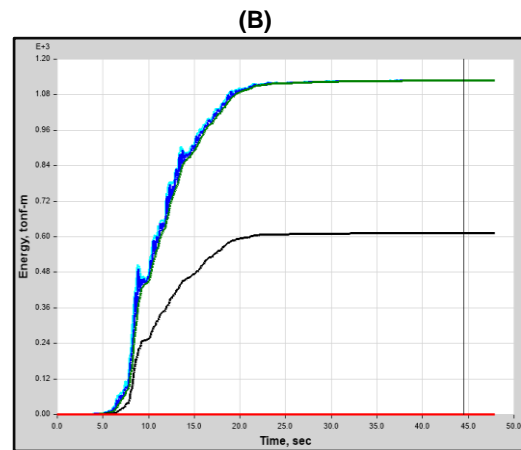


%DE DISIPACIÓN = 53.6%

Registro Japón Kobe

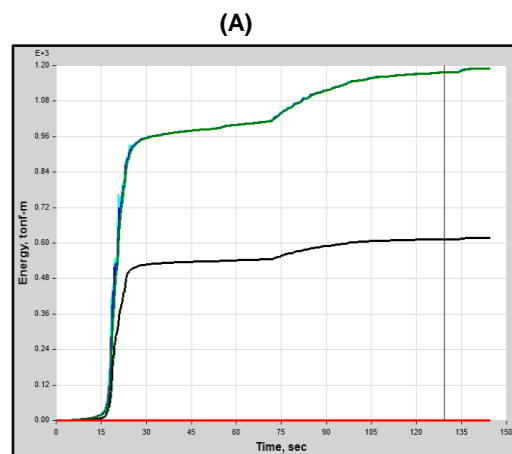


%DE DISIPACIÓN = 57.5%

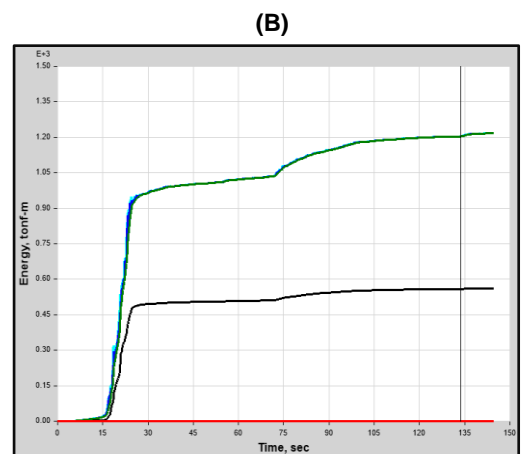


%DE DISIPACIÓN = 54.3%

Registro Pisco PCN



%DE DISIPACIÓN = 52%



%DE DISIPACIÓN = 46.4%

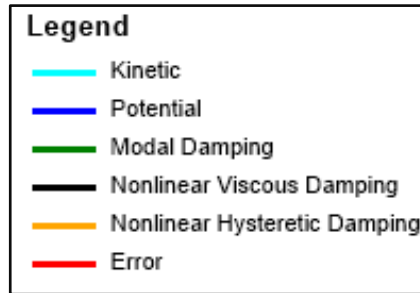


Figura N° 7.33 Balance de energía para el edificio Universal

- **Curvas Histeréticas**

A partir de estas curvas podemos observar el comportamiento del dispositivo.

Dirección X – X

La siguiente curva histerética corresponde a uno de los amortiguadores del último piso para el sismo Arequipa – Moquegua (Link K43).

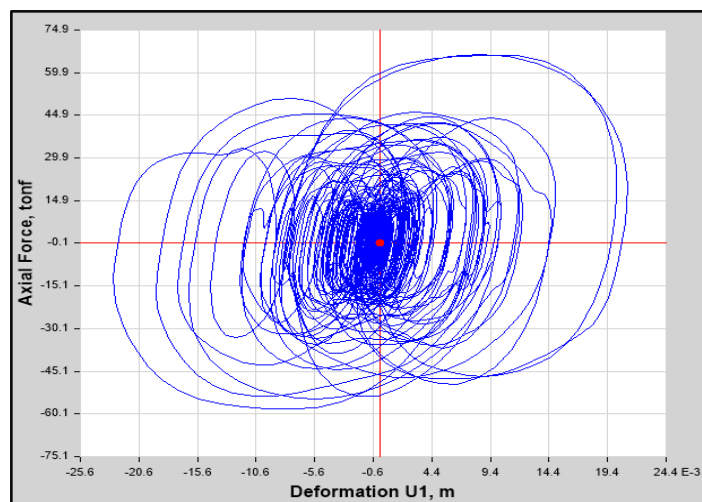


Figura N° 7.34 Lazo histerético en la dirección X-X

Se nota el comportamiento en la dirección X – X esperado para un dispositivo no lineal.

Dirección Y – Y

La siguiente curva histerética corresponde a uno de los amortiguadores del último piso para el sismo Arequipa – Moquegua (Link K7).

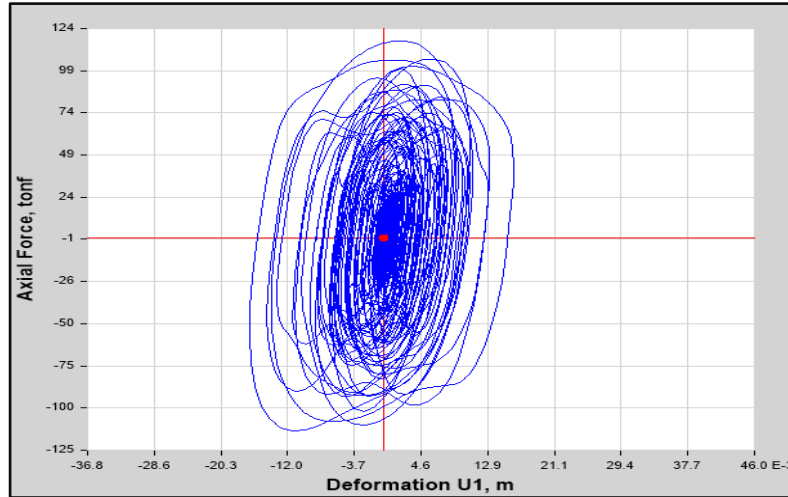


Figura N° 7.35 Lazo histérico en la dirección Y-Y

Se logra apreciar un comportamiento esperado para un dispositivo no lineal en la dirección Y – Y, sin embargo no se ha alcanzado un desplazamiento deseado en el dispositivo; este comportamiento se ve evidenciado en el bajo porcentaje de amortiguamiento alcanzado en dicha dirección ya que se presentan pequeños desplazamientos en el dispositivo.

- **Fuerzas en los amortiguadores**

Una vez alcanzadas las Distorsiones reglamentarias se procede al agrupar los dispositivos de acuerdo al nivel de fuerza a la que trabajan.

Dirección X – X

Tabla N° 7.11 Fuerza en los dispositivos en la dirección X-X.

Nivel	Amortiguador	FUERZA DEL AMORTIGUADOR	
		Ft (t)	Fc (t)
PISO 8	K16	66.077	-60.790
PISO 8	K21	64.378	-55.267
PISO 8	K26	58.021	-50.338
PISO 8	K31	65.151	-68.067
PISO 8	K36	65.822	-58.131
PISO 8	K41	58.566	-57.439
PISO 7	K17	69.907	-71.106
PISO 7	K22	68.292	-66.263
PISO 7	K27	64.896	-58.714
PISO 7	K32	67.561	-72.522
PISO 7	K37	68.326	-64.582
PISO 7	K42	63.387	-61.762
PISO 6	K18	72.324	-75.301
PISO 6	K23	73.216	-71.491
PISO 6	K28	68.804	-64.079
PISO 6	K33	66.270	-75.233
PISO 6	K38	64.703	-67.819
PISO 6	K43	65.153	-63.306
PISO 5	K19	69.184	-69.684
PISO 5	K24	69.476	-66.648
PISO 5	K29	71.083	-64.607
PISO 5	K34	68.939	-71.889
PISO 5	K39	60.491	-63.927
PISO 5	K44	61.836	-64.603
PISO 4	K15	62.200	-61.923
PISO 4	K20	56.954	-53.975
PISO 4	K25	65.080	-59.239
PISO 4	K30	62.488	-70.585
PISO 4	K35	61.401	-61.363
PISO 4	K40	61.275	-64.485
PISO 3	K12	43.164	-42.426
PISO 3	K14	44.713	-43.593
PISO 2	K11	46.421	-39.855
PISO 2	K13	47.703	-40.298

Tabla N°7.12 Resumen de dispositivos en la dirección X – X.

# Disipadores	F (t)	C (t-seg/m) ^{1/α}
4	50	150
30	75	150

Dirección Y – Y

Tabla N°7.13 Fuerza en los dispositivos en la dirección Y – Y.

Nivel	Amortiguador	FUERZA DEL AMORTIGUADOR	
		Ft (t)	Fc (t)
PISO 8	K1	109.346	-110.019
PISO 8	K6	131.637	-108.792
PISO 7	K2	108.284	-114.936
PISO 7	K7	158.721	-128.527
PISO 6	K3	103.530	-120.141
PISO 6	K8	174.735	-142.905
PISO 5	K4	108.322	-127.145
PISO 5	K9	160.852	-137.935
PISO 4	K5	113.205	-128.590
PISO 4	K10	113.918	-119.295

Tabla N° 7.14 Resumen de dispositivos en la dirección Y – Y.

# Disipadores	F (t)	C (t-seg/m) ^{1/α}
5	130	350
5	180	350

Como se aprecia son necesarios en total 44 dispositivos, 34 en la dirección X – X y 10 en la dirección Y – Y.

7.1.6. Comparación con disposición Chevron

Como se indicó al inicio de este capítulo el Edificio Universal ha sido reforzado utilizando disipadores viscosos en disposición Chevron y los resultados de dicho proyecto se comparan a continuación con los obtenidos para la disposición Upper Togle Brace.

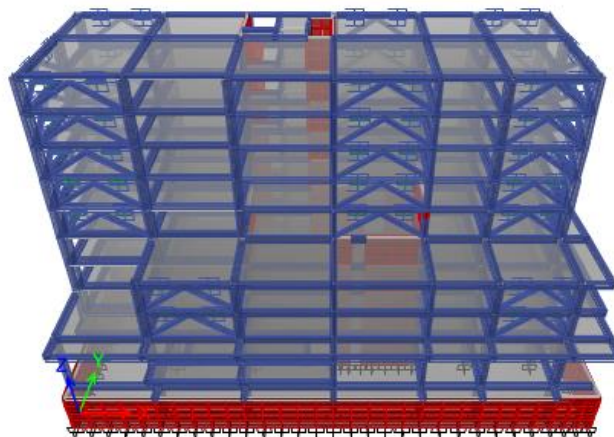


Figura N°7.36 Modelo Matemático del reforzamiento con disposición Chevron

- **Cantidad de dispositivos.**

Para este caso, la cantidad de dispositivos en la disposición Chevron doble utiliza el doble de dispositivos, es decir, para este caso se presentan 88 dispositivos de los cuales 72 están orientados en la dirección X – X, 20 en la dirección Y – Y.

- **Distorsiones**

Ambas disposiciones se han configurado de tal manera que no sobrepasen la Distorsión máxima de 0.007 para estructuras de concreto armado estipulada en la Norma E-030. A continuación se muestra en las Figuras N° 7.38 y 7.39, los resultados obtenidos:

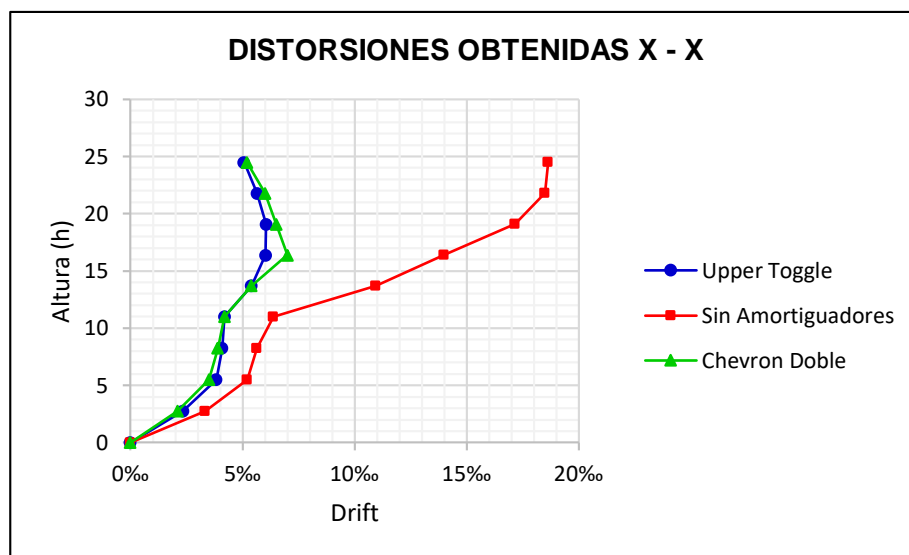


Figura N° 7.37 Comparación: distorsiones Upper Toggle, Chevron Doble y sin dispositivos en X-X

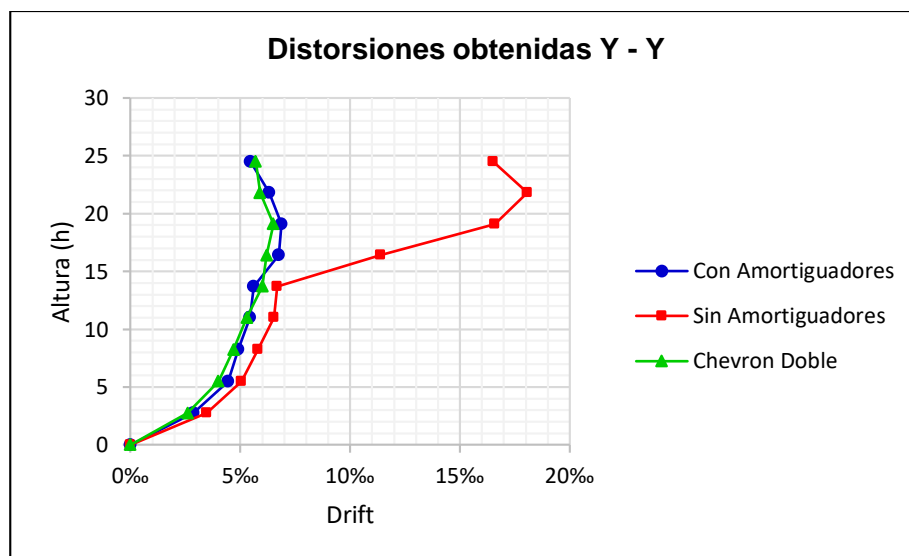


Figura N° 7.38 Comparación: distorsiones Upper Toggle, Chevron Doble y sin dispositivos en Y-Y

Como se aprecia las distorsiones de entrepiso para ambas disposiciones resultan muy similares para ambas direcciones.

• **Coefficientes de amortiguamiento**

En el proyecto original (Chevron Doble) se tienen las siguientes fuerzas y coeficientes de amortiguamiento C:

Tabla N° 7.15 Disipadores disposición Chevron Doble dirección X-X

# Disipadores	F(t)	C (t-seg/m) ^{1/α}
8	75	250
12	100	400
48	150	400

Tabla N°7.16 Disipadores disposición Chevron Doble dirección Y-Y

# Disipadores	F(t)	C (t-seg/m) ^{1/α}
10	100	400
10	150	400

• **Fuerza máxima en los dispositivos**

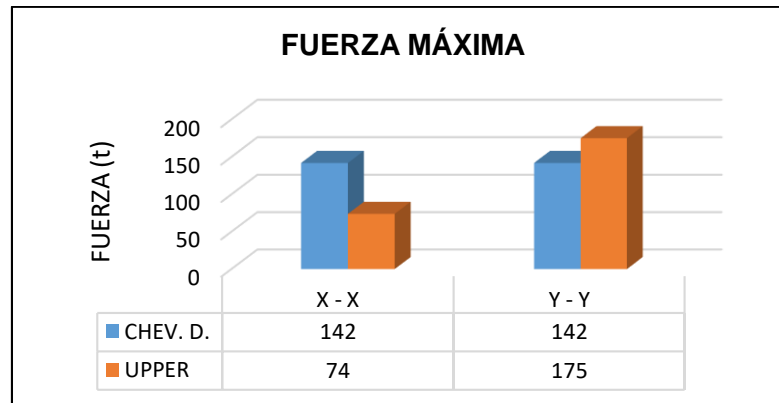


Figura N° 7.39 Comparación de fuerzas máximas

• **Amortiguamiento viscoso**

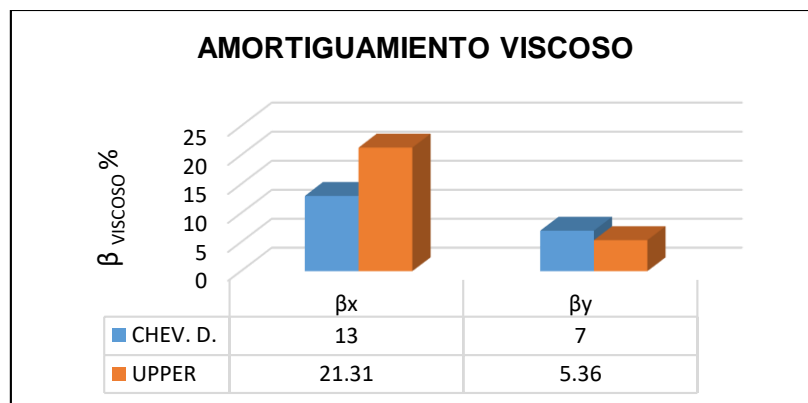


Figura N° 7.40 Comparación del amortiguamiento viscoso

- **Cantidad de dispositivos**

Se ha realizado un resumen de la cantidad y propiedades de los disipadores de fluido viscoso para ambas disposiciones tal como se muestra en las Tablas N° 7.17 y N°7.18.

Tabla N° 7.17 Resumen de dispositivos Chevron doble

EDIFICIO UNIVERSAL – CHEVRON DOBLE			
N°	F (t)	C (t-seg/m)^{1/α}	α
8	75	250	0.5
22	100	400	0.5
58	150	400	0.5
88			

Tabla N° 7.18 Resumen de dispositivos Upper Toggle

EDIFICIO UNIVERSAL - UPPER TOGGLE			
N°	F (t)	C (t-seg/m)^{1/α}	α
4	50	150	0.6
30	75	150	0.6
5	150	350	0.6
5	200	350	0.6
44			

Se observa que se tiene un total de 88 dispositivos para la disposición Chevron Doble y 44 dispositivos para la disposición Upper Toggle.

CONCLUSIONES

- **Respecto a la metodología.**

- La metodología propuesta por el ASCE 7, para determinar el coeficiente de amortiguamiento, arroja mejores resultados para estructuras regulares, ya que se basa únicamente en el primer modo, por lo que es necesario realizar iteraciones para lograr un adecuado valor del coeficiente de amortiguamiento.

- **Para un mismo nivel de distorsión**

- En general, se ha logrado reducir el valor del coeficiente de amortiguamiento con todas las disposiciones consideradas con respecto a la diagonal. En la disposición Lower Toggle se ha obtenido un valor de C de 25 (t-seg/m)^{1/0.5} seguida por la disposición Upper Toggle 2 con un valor de 30 (t-seg/m)^{1/0.5}. La disposición Lower Toggle ha brindado mejores resultados logrando reducir en un 81% el valor del coeficiente de amortiguamiento C respecto a la disposición diagonal.
- Del mismo modo, al tener menores coeficientes de amortiguamiento se presentan menores fuerzas en los disipadores y al igual que para el caso anterior la disposición Lower Toggle ha brindado mejores resultados, en este caso se ha logrado un valor de 21.88 t., seguida por la disposición Upper Toggle 2 con un valor de 24.32 t. En este caso se ha logrado reducir la fuerza en 67% con respecto a la disposición diagonal.
- Se ha logrado aumentar el amortiguamiento efectivo en la estructura en todos los casos lográndose mejores resultados con la disposición Chevron Doble con 17.98%, seguida por la disposición Upper Toggle 2 con 16%, diagonal con 15.85%, Chevron con 15.01%, Upper Toggle con 14.81% y finalmente las disposiciones Lower Toggle y Lower Toggle 2 con 12.17% y 9.44% respectivamente.
La disposición Chevron Doble utiliza el doble de dispositivos por tanto se ha considerado a la disposición Upper Toggle 2 como la más eficiente para añadir amortiguamiento a la estructura.
- En general las disposiciones Lower Toggle y Upper Toggle 2, han resultado las más eficientes. La disposición Lower Toggle supera ligeramente en los casos de reducción de coeficientes de amortiguamiento y fuerzas a la

disposición Upper Toggle 2, esta disposición reduce 4% menos amortiguamiento respecto a la disposición Upper Toggle 02 lo que resulta determinante para decir que la disposición Upper Toggle 2 es la más eficiente.

- El porcentaje de disipación de energía del sistema es alto ya que se presentan valores mínimos del orden del 70%

- **Para un mismo coeficiente de amortiguamiento**

- Se ha logrado reducir grandemente las distorsiones de entepiso comparándola con la disposición diagonal, en este caso la disposición Chevron doble ha sido la más eficiente alcanzando una distorsión de 0.00492 para la dirección X – X frente a la disposición diagonal con una distorsión de 0.00673, es decir, una reducción del 27% en la distorsión máxima.
 - Al tener el mismo valor para los coeficientes de amortiguamiento, se han obtenido fuerzas similares en los disipadores viscosos.
 - Se obtuvo mayores porcentajes de amortiguamiento para las disposiciones diagonal, Chevron y Chevron Doble, esto es consistente, ya que en las disposiciones Upper y Lower Toggle se requieren menores valores de C, es decir, se requiere mayor flexibilidad en los dispositivos para alcanzar mayores valores similares de amortiguamiento; lo mismo queda evidenciado en la gráfica del % de disipación de energía.
- ✓ De ambos sistemas analizados se concluye que la disposición Upper Toggle es la más eficiente.
 - ✓ Los mejores resultados se obtuvieron para mayores factores de amplificación “f”, lo cual evidencia la importancia de este factor en la respuesta de una estructura con disipadores de fluido viscoso.
 - ✓ Se ha logrado mejores resultados para la disposición Upper Toggle que para la disposición Chevron en el reforzamiento del edificio Universal del MEF.

RECOMENDACIONES

- Se recomienda realizar una investigación considerando la no linealidad de los elementos de concreto y acero a fin de verificar de manera más aproximada real la reducción del daño en las edificaciones.
- Se recomienda incluir en los factores de amplificación la componente vertical de deformación de los pórticos.
- Para el análisis Tiempo-historia, se recomienda considerar siete pares de registros sísmicos, ya que el uso de tres pares de registros conllevan a determinar respuestas máximas, lo cual resulta muy conservador.

BIBLIOGRAFÍA

- American Society of Civil Engineers ASCE 07-10: Minimum design load for building and other structures. Reston, 2010.
- Anil K. Chopra, "Dinámica de Estructuras", Cuarta Edición, Pearson Educación, México, 2014.
- Cámara Chilena de la Construcción, "Protección Sísmica de Estructuras, Sistemas de Aislación y Disipación de Energía". Santiago de Chile, Chile, 2011.
- Casal Rodríguez, Xavier Federico. "Uso de disipadores viscosos en edificios de hormigón armado en la ciudad de Guayaquil para el mejoramiento del desempeño sísmico". Tesis Profesional Universidad Católica de Santiago de Guayaquil. Guayaquil, Ecuador 2014.
- Claudio Oyarzo. "Métodos de selección y escalamiento de registros sísmicos para el análisis de la respuesta en el tiempo". Chile 2009.
- Edward L. Wilson. "Análisis Estático y Dinámico de estructuras". Primera edición en español de la cuarta edición en inglés. Computers and Structures Inc. California, EE.UU, 2009.
- Federal Emergency Management Agency FEMA. Commentary on Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Building - NEHRP. FEMA356. Washington DC, 2000.
- Federal Emergency Management Agency FEMA. Handbook for the Seismic Evaluation of Buildings. Washington DC. 1998.
- Federal Emergency Management Agency FEMA. Multi-hazard Loss Estimation Methodology. Washington DC. 2003.
- Guevara Huatuco, Diego y Torres Arias, Percy, "Diseño de un Edificio Aporticado con Amortiguadores de Fluido Viscoso en Disposición Diagonal", Tesis Profesional PUCP. Lima, Perú, 2012.
- Hart Gary y Wong Kevin, "Structural Dynamics for Structural Engineers", John Wiley y Sons, Inc., Estados Unidos 2000
- Horatiu Alin Mociran, Eugen Pantel. "A configuration of seismic energy dissipation system for stiff structures", Article N°4, Intersections/Intersectii, Vol. 6. Cluj-Napoca, Romania 2009.
- I. Restrepo, José "Elementos de diseño por desempeño". Viña del Mar, Chile, 2009.

- Jeen – Shin Hwang, “Seismic Design of Structures with Viscous Dampers”, National Science Council. Taipei, Taiwan, 2002.
- Kit Miyamoto, Robert D. Hanson, “U.S Design of Structures with Damping Systems”. University of Michigan. USA, 2002.
- Li Bo and Liang Xingwen, “Seismic Design of Structure with Improved Toggle-Brace-Damper System”. 14WCEE Paper N° 11-0071. Dept. of Civil Engineering Chang’an University, Xi’an, China.
- M. C. Constantinou, T. T. Song, G. F. Dargush, “Passive Energy Dissipation Systems for Structural Design and Retrofit”, Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research MCEER. Buffalo - NY, EE.UU, 1998.
- Maribel Burgos. “Disipadores de Energía Fluido Viscoso”. Diplomado de Estructuras – UPC. Lima, 2011.
- Michael C. Constantinou, Wilhelm Hammel and Ani N. Sigaher. “Toggle-Brace-Damper Seismic Energy Dissipation Systems”. Journal of structural engineering. Buffalo - NY, EE.UU, 2001.
- Morales Diaz, Luisa y Contreras Bálaro, Juan, "Protección de una Edificación Existente con Disipadores de Energía", Tesis Profesional PUCP. Lima, Perú, 2012.
- Pablo Verdugo, Juan, "Control de la Respuesta Dinámica de Estructuras Mediante el Uso de Disipadores de Energía de Fluido Viscoso de Tipo Lineal", Tesis Profesional Facultad de Ciencias e Ingeniería – Universidad Austral de Chile, Valdivia, 2007.
- Piqué del Pozo. “Apuntes de Clase de Ingeniería Antisísmica”. Universidad Nacional de Ingeniería. Rímac, Lima 2010.
- Structural Engineers Association of California SEAOC. Recommended Lateral Force Requirements and Commentary (The Blue Book). California, 1995.
- Trevor E. Kelly, “In-Structure Damping and Energy Dissipation, Design Guidelines”, Holmes Consulting Group Ltd. Wellington, Nueva Zelanda, 2001.
- Villareal Castro, Genner y Oviedo Sarmiento, Ricardo, "Edificaciones con Disipadores de Energía". Libro Premio Nacional ANR 2008. Lima, Perú, 2009.