

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DEL PERÚ

ANÁLISIS DE UNA EDIFICACIÓN DE 4 PISOS CON DISIPADORES DE FLUIDO VISCOSO

Tesis para optar el Título de **Ingeniero Civil**, que presentan los bachilleres:

Roberto Chacón Alvarez
José Eduardo Ramírez Caparó

ASESOR: Juan Antonio Montalbetti

Lima, Diciembre de 2014

Resumen

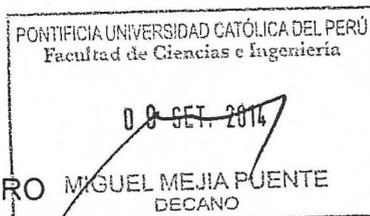
En las últimas décadas del desarrollo de la ingeniería estructural se han presentado medidas para que los edificios sean diseñados de acuerdo a requerimientos mínimos de fuerza lateral. Estas medidas se han concretado a través de códigos y normas de diseño estructural, que a través de lecciones aprendidas de los sismos, han evolucionado a lo largo de los años. Los edificios construidos y diseñados según lo especificado en los códigos de diseño modernos han demostrado un buen comportamiento ante los últimos terremotos ocurridos. Sin embargo, en muchos casos los costos de reparación de las estructuras y elementos no estructurales, como es el caso de la tabiquería, son muy elevados; además, el procedimiento a realizarse para la reparación implica que la estructura se encontrará inoperativa parcial o totalmente. Las razones presentadas anteriormente fueron motivo para desarrollar nuevos sistemas de protección sísmica. Estos no solo protegen a la estructura del colapso ante una sollicitación extrema, sino que también permiten lograr un buen comportamiento durante la acción de sismos leves o moderados. Los métodos de protección sísmica están agrupados en tres grupos: sistemas de protección activa, pasiva e híbridos.

En la presente investigación, se estudian dispositivos de protección pasiva, en especial los disipadores de fluido viscoso. El trabajo actual está basado en el estudio realizado por Shing [2] y Whittaker [3], también se consideraron las recomendaciones de desempeño existentes en el FEMA-HAZUS (Federal Emergency Management Agency) y sugerencias del ACI (American Concrete Institute). La metodología a emplearse está basada en los reportes del FEMA 273 y 274 [4].

Se realizó un estudio del comportamiento de los disipadores lineales y no lineales de fluido viscoso en la respuesta estructural de un edificio comercial de 4 pisos. Mediante el análisis realizado se demuestra que en este caso los disipadores de fluido viscoso disminuyen significativamente los desplazamientos de la estructura durante el análisis dinámico. Finalmente, se realiza un diseño de los sistemas de protección según la disponibilidad de los dispositivos en el mercado, por lo que se eligen disipadores Taylor.

TEMA DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

Título : "Análisis de una edificación de 4 pisos con disipadores de fluido viscoso"
Área : Estructuras
Asesor : Ing. Juan Antonio Montalbetti
Alumno : ROBERTO CHACÓN ALVAREZ
Código : 2012.3129.6.412
Alumno : JOSÉ EDUARDO RAMÍREZ CAPARO
Código : 2009.0206.5.412
Tema N° : 344
Fecha : Lima, 5 de setiembre de 2014

**OBJETIVO**

Realizar el análisis de una estructura de 4 pisos que contenga un sistema de protección sísmica compuesto por disipadores de fluido viscoso, haciendo una comparación entre su comportamiento lineal y no lineal.

DESCRIPCION DEL PROYECTO

La edificación a comparar será un modelo teórico de 4 pisos, estará ubicada en la ciudad de Lima y será usada como centro comercial. El Proyecto Arquitectónico contempla plantas típicas con 5 crujeas tanto en dirección X como Y, y para dar flexibilidad en su uso, no se deberá incluir elementos de cerramiento interior permanente.

La estructura se construirá sobre un suelo rígido como la grava típica de la ciudad de Lima. Por motivos arquitectónicos y de uso del centro comercial, la altura de todos los entrepisos será de 4.5 m.

Se asumirá que la circulación vertical se dará mediante ascensores y escaleras las cuales estarán separadas de la edificación principal en estudio.

PLAN DE TESIS

El tema se someterá a cuatro revisiones que comprenden:

1. Revisión bibliográfica. Marco Teórico. Estructuración del Edificio. Predimensionamiento de los elementos estructurales. Metrado de Cargas.
2. Análisis debido a Cargas de Gravedad. Análisis Sísmico espectral, Pseudo-estático y tiempo historia de la edificación con y sin elementos de disipación sísmica. Estudio de la deriva objetivo relacionado a un estado de daño propuesto por la tabla HAZUS.
3. Diseño del sistema de protección sísmica en base a disipadores de fluido viscoso.
4. Comparación. Conclusiones. Preparación del documento final.

NOTA

Extensión máxima: 100 páginas

J. Montalbetti

A mis padres, quienes me apoyaron incondicionalmente en cada paso de mi vida, les agradezco por enseñarme a ser perseverante y luchar por mis sueños. A mi hermana Lia, que siempre me da motivos para sonreír, le agradezco por habernos alentado en las innumerables amanecidas y servirnos una taza de café en los momentos que ya no teníamos más fuerzas. A mi gran amigo Roberto, sin él no hubiese sido posible culminar este trabajo. A mis amigos, con quienes viví momentos que siempre recordaré.

A todos ellos les agradezco.

José Eduardo Ramírez Caparó

A mi mamá Verónica por estar siempre a mi lado y aconsejarme a cada momento. A mi papá Roberto por ser una guía en mi vida y la persona que me alienta a seguir siempre adelante. A mis abuelos Mario Alvarez Soto e Hilda Espinoza Giraldo por ser un ejemplo siempre a seguir y un apoyo contante. A mis abuelos Leonardo y Luzmila. A mi hermano Adolfo por ser mi motivo de superación para ser cada día mejor. A Eduardo que a lo largo de mi vida universitaria fue un apoyo muy importante en ella. A mí enamorada Nina quien me incentivó a seguir adelante motivándome e incentivándome día a día a ser mejor. A mis tíos que me dieron sus buenos consejos los cuales me ayudaron. A mis amigos con los cuales la carrera universitaria fue divertida. Gracias a todos ellos.

Roberto Chacón Alvarez

Nuestro más sincero agradecimiento:

A nuestro Asesor, M. Sc. Juan Antonio Montalbetti por su apoyo en el desarrollo y culminación de la tesis.

A nuestros Jurados,

Ph. D. Marcial Blondet y M. Sc. Antonio Zeballos por haber revisado y enriquecido esta tesis.

Roberto y José Eduardo

Índice

Resumen.....	(2)
Índice.....	(3)
Capítulo I - Introducción.....	(6)
1.1 Generalidades	
1.2 Justificación de la Investigación	
1.3 Objetivos de la Investigación	
Capítulo II – Marco Teórico.....	(8)
2.1 Diseño Sismorresistente	
2.2 Balance de Energía	
2.3 Sistemas de Control de Respuesta Dinámica	
2.4 Dispositivos Pasivos de Disipación de Energía	
2.4.1 Disipadores histeréticos	
a) Disipadores por fluencia de metales	
b) Disipadores por fricción	
2.4.2 Disipadores con comportamiento viscoelástico	
a) Disipadores de fluido viscoso	
b) Disipadores viscoelásticos sólidos	
2.5 Configuración de los dispositivos de disipación pasiva de energía	
2.5.1 Configuración Diagonal	
2.5.2 Configuración Chevron	
2.5.3 Configuración Scissor Jack	
Capítulo III - Desempeño Sismorresistente en Edificaciones.....	(16)
3.1 Objetivos del Desempeño Sismorresistente	
3.2 Niveles de Amenaza Sísmica	
3.3 Estados de desempeño	
3.4 Importancia de la Edificación	
3.5 Daño Estructural Asociado a la Deriva del Edificio	
Capítulo IV – Efecto del amortiguamiento añadido a la estructura.....	(20)
4.1 Trabajo Realizado por amortiguadores lineales en la estructura	
4.2 Trabajo Realizado por amortiguadores no lineales en la estructura	

Capítulo V – Metodología de Diseño con Disipadores de Fluido Viscoso.....(26)

5.1 Metodología de Diseño General

5.2 Metodología para el diseño y configuración estructural del sistema de disipación de energía

5.2.1 Análisis de la estructura sin dispositivos de protección

5.2.2 Elección del desempeño

5.2.3 Objetivo de diseño

5.2.4 Ubicación y Disposición de los Amortiguadores

5.2.5 Propiedades del amortiguador

a) Rigidez del brazo metálico

b) Coeficiente de amortiguamiento

c) Exponente de velocidad

5.2.6 Modelamiento y análisis estructural

5.2.7 Evaluación de la estructura con amortiguadores

a) Deriva

b) Amortiguamiento efectivo

c) Balance energético

5.2.8 Diseño de la estructura de concreto armado

a) Elementos que constituyen el sistema de amortiguamiento

b) Sistema estructural

5.2.9 Diseño de los elementos de disipación

Capítulo VI – Caso de Estudio.....(31)

6.1 Características del modelo

6.2 Características de la Edificación

6.2.1 Sistema estructural

6.2.2 Las características de los materiales

6.3 Consideraciones para el análisis Sismorresistente

6.3.1 Cargas de Diseño

6.3.2 Parámetros empleados para el análisis Sismorresistente

6.3.3 Registros de Aceleración sísmica usados

6.4 Análisis Sísmico de la Estructura.

6.4.1 Modelo computacional

6.4.2 Análisis Pseudo Estático

6.4.3 Análisis Espectral

6.5 Resultados del Análisis Sin Dispositivos de disipación de Energía

6.5.1 Resultados de Análisis Dinámico Espectral

6.5.2 Resultados del Análisis Tiempo Historia

6.6 Procedimiento de Implementación de Amortiguadores Lineales de Fluido Viscoso

- 6.6.1 Elección de la deriva objetivo
- 6.6.2 Determinación del amortiguamiento efectivo
- 6.6.3 Cálculo del coeficiente de amortiguamiento
- 6.6.4 Cálculo de la rigidez del brazo del amortiguador
- 6.6.5 Análisis tiempo-historia de la edificación con amortiguadores
- 6.6.6 Cálculo del amortiguamiento efectivo
- 6.6.7 Energía del sistema
- 6.6.8 Curva de Histéresis

6.7 Procedimiento de Implementación de Amortiguadores No lineales de Fluido Viscoso

- 6.7.1 Determinación de la deriva objetivo y amortiguamiento efectivo
- 6.7.2 Cálculo del coeficiente de amortiguamiento
- 6.7.3 Cálculo de la rigidez del brazo del amortiguador
- 6.7.4 Análisis tiempo historia con amortiguadores no lineales
- 6.7.5 Cálculo del amortiguamiento efectivo
- 6.7.6 Energía del sistema
- 6.7.7 Curva de Histéresis

6.8 Análisis y Comparación de Resultados

- 6.8.1 Influencia en los desplazamientos de los diafragmas de la estructura
- 6.8.2 Influencia en las derivas de entrepiso de la estructura
- 6.8.3 Fuerza Axial en los disipadores

6.9 Elección de los amortiguadores considerados en el sistema de control sísmico.

Capítulo VII – Conclusiones	(57)
Capítulo VIII - Bibliografía	(58)

Capítulo I

Introducción

1.1 Generalidades

Durante varios años, los códigos sismorresistentes usados en el mundo se enfocaron en hallar y representar una fuerza equivalente a través de la cual se conseguía simular una sollicitación sísmica. Además de hallar una fuerza equivalente, desarrollaron una serie de metodologías de desempeño estructural, con estas es factible predecir el comportamiento de estructuras ante eventos sísmicos. Estos códigos y metodologías de diseño tuvieron en general respuestas satisfactorias.

El objetivo fundamental de los códigos y metodologías sismorresistentes es evitar el colapso de las estructuras frente a importantes eventos sísmicos, no obstante, el daño estructural es admisible. El daño está representado por el comportamiento inelástico de las estructuras mediante la aparición de rótulas plásticas, las cuales tienen la capacidad de disipar energía. La energía liberada por la deformación inelástica de la estructura, se denomina energía histerética.

Disipar la energía proveniente de los sismos a la estructura mediante las rótulas plásticas genera grandes deformaciones que a su vez producen daños, lo que compromete la integridad de los ocupantes. Además, existen edificaciones en las que no se debe interrumpir los servicios que brindan, como los hospitales, estaciones de bomberos etc. Tales estructuras son nombradas por la Norma Técnica E.030 [9] como edificaciones esenciales.

1.2 Justificación de la investigación

Actualmente existen nuevas opciones de diseño fundamentadas en el uso de dispositivos suplementarios de amortiguamiento. Dichos dispositivos tienen la función de disipar la energía que ingresa en el sistema estructural incrementando su amortiguamiento efectivo. El uso de dichos dispositivos controla la incursión de los elementos estructurales en el régimen inelástico.

Cuando una estructura sufre grandes deformaciones se pueden producir daños. Los costos de reparación de estos daños pueden ser muy elevados, pudiendo llegar al extremo de que la reparación no sea factible económicamente. Por otro lado, en innumerables casos el contenido dentro de las estructuras puede ser de gran

importancia, tal es el caso de museos en los que se encuentran elementos de valor histórico. Así mismo, en los hospitales se tienen equipos muy costosos cuya funcionalidad es primordial para las personas.

Los motivos presentados nos llevan a plantear un diseño no convencional de la estructura, haciendo uso de dispositivos de protección sísmica que permitan lograr un desempeño óptimo.

1.3 Objetivos de la investigación

El presente trabajo tiene como objetivo fundamental realizar el análisis estructural de una edificación con un sistema de disipación de energía; específicamente con disipadores de fluido viscoso.

El desarrollo del objetivo planteado ha considerado lo siguiente:

- Realizar una revisión de la literatura sobre los diferentes dispositivos de disipación de energía.
- Plantear una metodología para el análisis y diseño de una estructura con elementos de disipación de energía (amortiguadores de fluido viscoso).
- Modelar una estructura hipotética mediante un programa computacional.
- Mostrar los beneficios del uso de amortiguadores de fluido viscoso.

CAPITULO II

Marco Teórico

2.1 Diseño Sismorresistente

La filosofía de diseño sismorresistente definida por la Norma Técnica E.030 [9] en el artículo 3, consiste en “evitar la pérdida de vidas, asegurar la continuidad de los servicios básicos y minimizar los daños a la propiedad”. Sin embargo, dicha norma reconoce el hecho de que dar protección absoluta a una estructura frente a todos los sismos no es factible, por lo que propone los siguientes principios: La estructura no debe colapsar ni causar daños a las personas ante sismos severos y; deberá soportar movimientos sísmicos moderados con “daños dentro de límites aceptables”.

El hecho que una estructura pueda cumplir con los principios antes mencionados está estrechamente ligado a su capacidad de disipar energía. La disipación se presenta en las vigas y columnas, en las que se forman rótulas plásticas. Sin embargo, la formación de rótulas plásticas implica un alto nivel de daños.

En algunos casos particulares, se requiere que la estructura sufra el menor daño posible durante los eventos sísmicos, de manera tal que continúe operativa. Tal es el caso de hospitales, colegios, estaciones de bomberos, etc. En estos casos se debe diseñar una estructura bastante resistente para minimizar las incursiones en el régimen inelástico.

Una alternativa que permite cumplir con los objetivos del diseño sismorresistente planteados por la norma E.030, es la inclusión de sistemas de protección modernos en las estructuras. Estos pueden ser dispositivos de aislamiento o suplementarios de disipación de energía.

2.2 Balance de Energía

Un evento sísmico, desde el punto de vista del balance energético, representa un ingreso de energía en el sistema estructural. Esta energía, que entra en el sistema, se convierte en cinética y potencial. La energía cinética se reconoce fácilmente con el movimiento de la estructura ante uno de estos fenómenos. La energía potencial se acumula en la deformación que presentan los distintos elementos.

La energía potencial se almacena como energía de deformación elástica y deformación histerética. La primera, energía de deformación elástica, se da a lo largo de la etapa

elástica de la respuesta de la estructura ante una sollicitación externa como un sismo. Una vez que se retira la carga, la estructura puede recuperar su forma original. La energía de deformación histerética se produce cuando las deformaciones exceden el comportamiento elástico, parte de la energía se almacena como deformación y la otra se disipa en un proceso de degradación de la estructura. Cuando se producen incursiones importantes en el régimen inelástico, la energía histerética resulta ser mucho mayor que la energía de deformación elástica. Además, otra forma en que se disipa la energía es mediante el amortiguamiento natural que tiene la estructura. Esta energía que disipa durante la aplicación de la carga es la energía disipada por el amortiguamiento. A continuación se presenta la ecuación de balance de energía. Esta ecuación representa una síntesis del movimiento desde que se inicia la aplicación de la sollicitación externa hasta el momento de análisis.

$$E_K(t) + E_D(t) + E_S(t) + E_H(t) = E_I(t)$$

E_K : Energía cinética de la estructura

E_D : Energía disipada por amortiguamiento

E_S : Energía de deformación elástica

E_H : Energía de deformación inelástica

E_I : Energía total de entrada

La suma de la energía de deformación elástica y la inelástica corresponde al trabajo de la fuerza restitutiva.

La inclusión de sistemas modernos de protección sísmica intenta regular la energía de ingreso al sistema (aisladores sísmicos) o incrementar la disipación de energía por amortiguamiento (amortiguadores). En el caso de los aisladores se trabaja con el lado derecho de la ecuación de balance de energía (E_I). Al reducir la energía de ingreso en el sistema, se evita la incursión de la estructura en el régimen no lineal. En cuanto a los amortiguadores, el propósito de estos es incrementar la energía de amortiguamiento (E_D) y evitar la disipación por la incursión de los elementos en el régimen inelástico (energía de deformación inelástica). En general los sistemas de protección tienen como objetivo el reducir los desplazamientos relativos de entrepiso, y por ende también se reducen los daños a la estructura.

2.3 Sistemas de Control de Respuesta Dinámica

Los sistemas de control de respuesta dinámica requieren elementos especiales que modifican la respuesta de la estructura ante diversas sollicitaciones. Los sistemas que se emplean se categorizan en tres grandes grupos: pasivos, activos e híbridos.

Los sistemas de control pasivo, se diseñan para disipar gran parte de la energía que introducen los sismos en la estructura y generan deformaciones en la misma. Las deformaciones que se concentran en ciertos elementos, como vigas y columnas, ocasionan un daño que se puede reducir con el uso de estos dispositivos. Estos sistemas son pasivos porque no requieren una fuente de energía para operar ante movimientos sísmicos. Entre los sistemas de protección pasiva se encuentran los disipadores y los aisladores.

Los sistemas activos protegen la estructura mediante fuerzas impuestas que generan un contra balance a las inducidas por el sismo. Este tipo de sistemas requiere una fuente externa de energía para funcionar, además de actuadores controlados por un computador. Los sistemas activos son mucho más complejos que los pasivos.

Finalmente, existe un tercer grupo que son los sistemas de protección híbridos. Estos combinan los dos anteriores, pasivos y activos. Por lo general demandan de poca energía, son confiables y tienen un costo menor que los sistemas activos [11].

2.4 Dispositivos Pasivos de Disipación de Energía

Los dispositivos de disipación de energía se pueden clasificar en dos grupos: Aquellos cuyo funcionamiento depende del desplazamiento (Disipadores histeréticos) y, los que dependen de la velocidad (Disipadores Viscoelásticos).

2.4.1 Disipadores histeréticos

Los disipadores histeréticos son aquellos cuyo funcionamiento está basado en los desplazamientos relativos de entrepiso. Estos producen un incremento en la rigidez de la estructura. A continuación se presentan los diversos tipos de disipadores histeréticos.

a) Disipadores por fluencia de metales

Entre los disipadores metálicos encontramos dos tipos: los de brazo de pandeo restringido BRB, por su nombre en inglés buckling-restrained brace; y los de amortiguamiento y rigidez añadidas ADAS, added damping and stiffness.



Figura 1. Disipadores por fluencia de metales. Arriostre de pandeo restringido (University of New York at Buffalo)

Un disipador de brazo de pandeo restringido consiste en un brazo de acero con una sección transversal cruciforme rodeada de un tubo de acero. Usualmente la región entre el tubo y el brazo se llena con concreto. Dicho arreglo permite al tirante deslizarse con respecto al tubo lleno de concreto. El confinamiento provisto por este último evita que se produzca el pandeo ante cargas de compresión.

El tipo de disipador ADAS consiste en una serie de placas de acero, la parte inferior de estas se encuentran adjuntas a una configuración de tirantes tipo Chevron y, la parte superior al piso encima del arreglo. Cuando el piso superior se deforma lateralmente con respecto a la configuración Chevron, las placas metálicas son sometidas a una fuerza cortante. Estas fuerzas cortantes inducen momentos flectores en toda la altura de las placas. La configuración de éstas es tal que dichos momentos producen una distribución de esfuerzos por flexión uniformes en toda la altura. Por ende, las acciones inelásticas ocurren uniformemente en su altura.

b) Disipadores por fricción

Este tipo de amortiguadores disipa energía a través del rozamiento que se produce en la interface entre dos materiales bajo presión y durante el deslizamiento que ocurre entre ambos. En la interface de los dos cuerpos,

es posible emplear materiales especiales que procuren coeficientes de fricción estables.

2.4.2 Disipadores con comportamiento viscoelástico

a) Disipadores de fluido viscoso

Este tipo de disipadores consiste en un cilindro hueco que contiene un fluido, típicamente basado en silicona. A medida que el pistón avanza, el fluido es forzado a fluir a través de orificios ya sea alrededor o a través de la cabeza del pistón. La diferencia de presiones a lo largo del pistón produce importantes fuerzas que se oponen al movimiento. El fluido que fluye a altas velocidades genera fuerzas de fricción entre sus partículas y la cabeza del pistón. Las fuerzas de fricción dan lugar a la disipación de energía en forma de calor.



Figura 2. Disipadores de fluido viscoso. (Maurer Sohne)

A pesar de que este tipo de disipadores son conocidos como de fluido viscoso, normalmente el fluido tiene una baja densidad. El término de amortiguador de fluido viscoso está asociado al comportamiento macro del sistema.

b) Disipadores viscoelásticos sólidos

Usualmente los disipadores viscoelásticos sólidos consisten en una almohadilla sólida elastomérica unida con placas de acero. Las placas de acero están instaladas en la estructura con una disposición en diagonal o Chevron. Mientras un extremo del disipador se desplaza con respecto al otro, el material viscoelástico se cizalla, lo que resulta en el incremento de la temperatura y disipación de energía hacia el medio ambiente.

La elección del tipo de disipador está determinada por el diseñador, cada uno tiene características que lo hacen más apropiado para determinado tipo de estructura. La Tabla 1 resume las características más importantes de los tipos de disipadores mencionados anteriormente.

2.5 Configuración de los dispositivos de disipación pasiva de energía

A lo largo del acápite anterior se ha hecho referencia a diferentes disposiciones que pueden tener los disipadores. En adelante se trata con mayor detalle las configuraciones más comunes que existen.

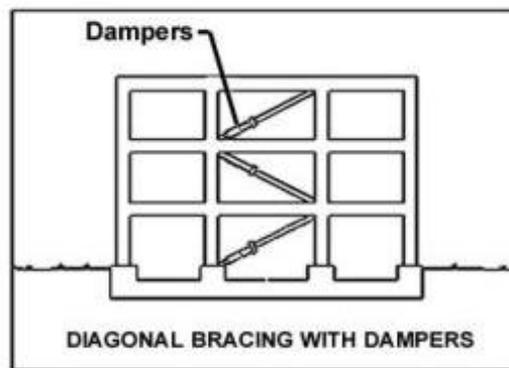


Figura 3. Disposición diagonal [13]

2.5.1 Configuración Diagonal

En esta disposición se orienta el disipador de forma diagonal dentro del pórtico en que se encontrará y resulta ser la más económica, pues solo requiere tubos metálicos para su instalación. Por otro lado, este arreglo tiene la menor eficiencia ya que solamente la componente horizontal desarrollada por el amortiguador participa en la disipación de energía.

2.5.2 Configuración Chevron

La configuración Chevron se distingue por colocar el dispositivo de disipación de energía de forma horizontal, es decir paralelo al entrepiso. A través de esta se puede lograr una eficiencia de 100%, es decir que se emplea toda la capacidad del disipador para restringir los desplazamientos de entrepiso.

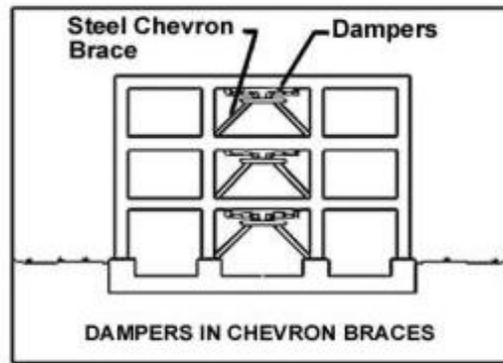


Figura 4. Disposición Chevron [13]

2.5.3 Configuración Scissor Jack

Este tipo de disposición tiene una eficiencia mayor al 100%; esto se debe a que su configuración incrementa el desplazamiento del pistón para una deriva de entrepiso dada.

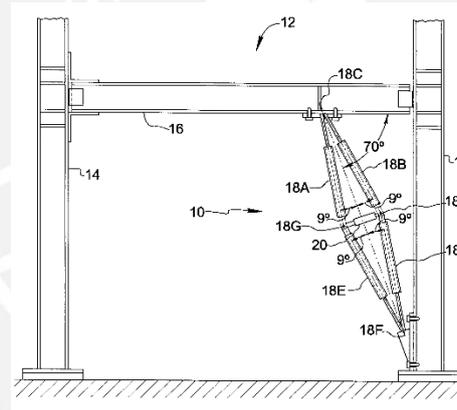
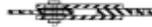
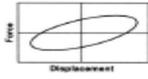
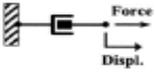
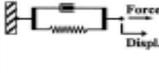


Figura 5. Disposición Scissor Jack [14]

Tabla 1

Resumen de construcción, comportamiento histerético, modelos físicos, ventajas, y desventajas de los dispositivos de disipación pasiva de energía para aplicación de protección sísmica (Adaptado de: Energy Dissipation Systems for Seismic Applications: Current Practice and Recent Developments)

Tipo de amortiguadores	Amortiguador de Fluido Viscoso	Amortiguador Sólido Viscoelástico	Amortiguador Metálico	Amortiguador de Fricción
Construcción Básica				
Comportamiento Histerético Idealizado				
Modelo Físico Idealizado			No se cuenta con un modelo idealizado	
Ventajas	<ul style="list-style-type: none"> -Activado a bajos desplazamientos -Mínima fuerza de restauración -Para amortiguadores lineales, el modelo es simple -Las propiedades son independientes de la frecuencia y temperatura -Desempeño probado en aplicaciones militares 	<ul style="list-style-type: none"> -Activado a bajos desplazamientos -Provee fuerzas restitutivas -Comportamiento lineal, por lo que su modelo es simple 	<ul style="list-style-type: none"> -Comportamiento histerético estable. -Confiable en tiempo prolongado. -Insensibilidad a la temperatura ambiental. -Materiales y comportamiento familiar a la práctica ingenieril 	<ul style="list-style-type: none"> -Gran energía disipada por ciclo -Insensibilidad a la temperatura ambiental
Desventajas	<ul style="list-style-type: none"> -Posibles fugas del líquido sellado 	<ul style="list-style-type: none"> -Capacidad de deformación limitada -Las propiedades dependen de la frecuencia y temperatura -Posible desunión y desprendimiento del material viscoelástico 	<ul style="list-style-type: none"> -Dispositivo dañado después de un terremoto, posiblemente se requiera reemplazar. 	<ul style="list-style-type: none"> -Las condiciones de la interfaz de deslizamiento pueden cambiar con el tiempo -Comportamiento no lineal muy grande; puede excitar modos más altos y requiere un análisis no lineal. -Desplazamientos permanentes si no se provee de un mecanismo de restauración de fuerza

Capítulo III

Desempeño Sismorresistente en Edificaciones

3.1 Objetivos del Desempeño Sismorresistente

Los códigos de diseño sismorresistente son en buena parte, el resultado de las experiencias aprendidas del comportamiento estructural de edificaciones ante terremotos pasados. Los antiguos códigos sismorresistentes estaban enfocados a un diseño por resistencia de la estructura, es decir se evitaba que estas colapsen ante un sismo severo. Sin embargo, a pesar de que la estructura cumplía con el objetivo de diseño, es decir no llegaba al colapso, se presentaban grandes daños inclusive ante sismos con aceleraciones menores que la máxima esperada. Dichos eventos demostraron que en muchos casos no se lograba un buen desempeño estructural con un diseño por resistencia; por ello, los códigos modernos no solamente exigen un diseño basado en la fuerzas de resistencia, sino también en el desempeño que se desea lograr.

Existen diversos criterios de desempeño propuestos por diferentes comités en todo el mundo. Entre dichos comités tenemos a la Sociedad de Ingenieros Estructurales de California (SEAOC), el programa HAZUS 99, FEMA 273 y 374, ATC-40, entre otros. El SEAOC, a través del comité Visión 2000, intentó mejorar los códigos actuales de manera significativa. Este comité se centró en definir qué es un sismo frecuente, raro o muy raro; y en describir detalladamente el desempeño que las estructuras deben alcanzar para cada tipo de evento sísmico.

3.2 Niveles de Amenaza Sísmica

El comité del SEAOC contempló cuatro tipos de terremotos, los cuales fueron clasificados según la probabilidad de ocurrencia y su periodo de retorno.

Tabla 2
Niveles de amenaza sísmica (Adaptado de SEAOC, 1995)

Sismo de Diseño	Probabilidad de Excedencia de Intensidad	Periodo de Retorno
Sismos Frecuentes	50% en 30 años	43 años
Sismos Ocasionales	50% en 30 años	72 años
Sismos Raros	10% en 50 años	475 años
Sismos muy Raros	10% en 100 años	970 años

3.3 Estados de desempeño

El comité Visión 2000 presenta cuatro posibles estados de desempeño, los cuales se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3
Estados de Desempeño (Adaptado del Comité Visión 2000) ^[10]

Estado de Desempeño	Descripción de los daños	Estado de daño	Límite de desplazamiento del sistema
Totalmente Operacional	Daño nulo. Todas las instalaciones y servicios operan normalmente luego del sismo.	Despreciable	Δy
Operacional	Daños ligeros en elementos estructurales y en componentes no estructurales. Las instalaciones y servicios están operativos o podrían estar parcialmente interrumpidos, pero de fácil recuperación.	Leve	$\Delta y + 0.30 \Delta p$
Resguardo de la Vida	Daño estructural y no estructural moderado. La estructura aún conserva un margen de seguridad contra el colapso. El edificio podría repararse aunque no siempre sea económicamente aconsejable.	Moderado	$\Delta y + 0.60 \Delta p$
Cerca al Colapso	Daño estructural severo. Falla de elementos no estructurales. La seguridad de los ocupantes se encuentra comprometida, las réplicas podrían ocasionar el colapso.	Extenso	$\Delta y + 0.80 \Delta p$
Colapso	Colapso estructural. No es posible reparar la edificación.	Completo	$\Delta y + 1.00 \Delta p$

Δy : desplazamiento elástico

Δp : capacidad de desplazamiento inelástico

Una propuesta para determinar el desempeño de una estructura consiste en una curva de capacidad sectorizada, dicha propuesta fue planteada por el SEAOC. Esta consiste en un modelo bilineal que comprende una etapa elástica y una inelástica dividida en cuatro sectores; en la Figura 6 se muestra dicha curva de capacidad.

3.4 Importancia de la Edificación

El comité VISION 2000 clasificó a las edificaciones en tres tipos de acuerdo a la importancia que tienen:

Edificaciones Esenciales: Instalaciones críticas post-terremoto, tales como hospitales, centros de comunicación, policía, estaciones de bomberos, etc.

Edificaciones de Seguridad Crítica: Instalaciones que contienen grandes cantidades de materiales peligrosos tales como toxinas, materiales radioactivos o explosivos.

Edificaciones Comunes: Edificaciones que no son incluidas anteriormente, como edificios de vivienda, oficinas, hoteles, entre otras.

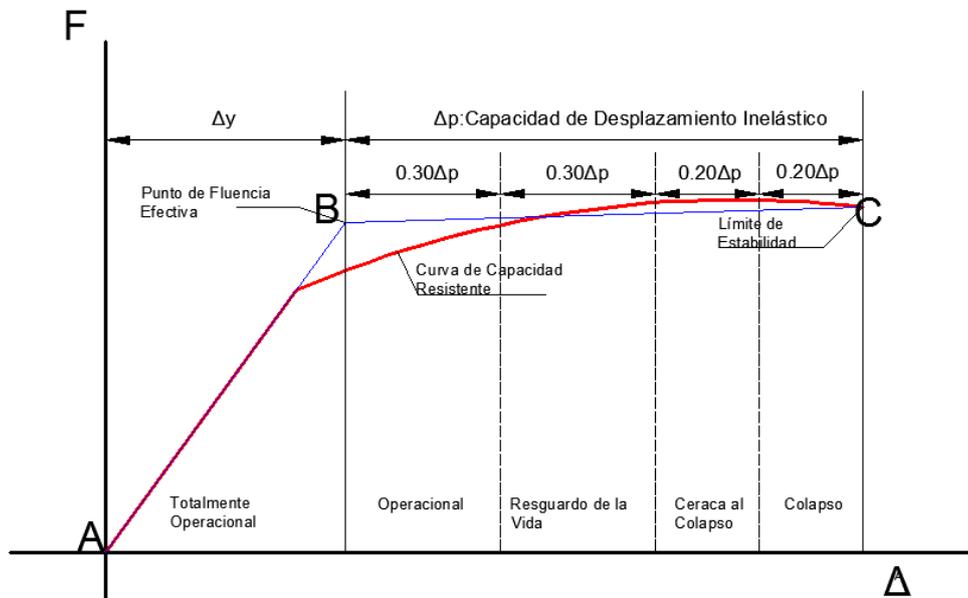


Figura 6. Curva de Capacidad Sectorizada (Adaptada de SEAOC) [10]

La Tabla 4 muestra la relación existente entre el objetivo de desempeño, tipo de edificación y probabilidad de ocurrencia del evento sísmico.

Tabla 4
Nivel de Desempeño de la Edificación (Adaptado de SEAOC)

		Nivel de Desempeño de la Edificación			
		Totalmente Operacional	Operacional	Resguardo de la vida	Cerca al colapso
Nivel de demanda sísmica	Sismos frecuentes (43 años)				
	Sismos ocasionales (72 años)				
	Sismos raros (475 años)				
	Sismos muy raros (970 años)				

Edificaciones de Seguridad Crítica
 Edificaciones Esenciales
 Edificaciones Comunes

3.5 Daño Estructural Asociado a la Deriva del Edificio

Según el capítulo 5 de Multihazard Loss Estimation Methodology (HAZUS), un edificio de tipo Aporticado de Concreto Armado de mediana altura, es abreviado como CM1. La Tabla 5 muestra la relación entre las derivas y los daños producidos en la estructura.

Tabla 5
Descripción de daño y deriva característica para edificios tipo CM1 (HAZUS)

Daño Estructural	Descripción	Deriva
Leve	Pueden observarse grietas de corte y flexión cerca de la unión de algunas vigas y columnas.	0.0033
Moderado	La mayoría de columnas y vigas presentan grietas. Algunos elementos como vigas han alcanzado la fluencia. Es evidente la presencia de largas grietas de flexión y en algunos lugares el concreto de recubrimiento se ha desprendido.	0.0058
Extenso	Algunos pórticos han alcanzado su capacidad última evidente por la presencia de largas grietas de flexión, concreto desprendido y refuerzo principal y transversal deformado. Resulta en un colapso parcial.	0.0156
Completo	La estructura ha colapsado o está a punto de hacerlo debido a falla frágil, agotamiento de ductilidad o pérdida de la estabilidad del sistema.	0.0400

Capítulo IV

Efecto del amortiguamiento añadido a la estructura

4.1 Trabajo Realizado por amortiguadores Lineales en la estructura

Mediante las ecuaciones planteadas por Newmark y Shing [4], y haciendo uso del principio de trabajo virtual, se demuestra y justifica la ecuación empleada para la elección del coeficiente de amortiguamiento de los disipadores de energía.

La fuerza que se genera debido al desplazamiento aplicado como un pulso en un sistema equivalente de un grado de libertad será:

$$p(t) = p(0) \text{sen}(\omega t + \delta)$$

Y la energía desarrollada por amortiguamiento es:

$$W_d = \oint F_d du$$

Donde

$$F_d = C \dot{u}$$

$$\dot{u} = \frac{du}{dt}$$

$$\dot{u} dt = du$$

Expresado en términos de la velocidad

$$W_d = \int C \dot{u}^2 dt \quad (4.1)$$

Y la velocidad en función del tiempo está expresada como:

$$\dot{u}(t) = \omega u(0) \cos(\omega t) \quad (4.2)$$

Reemplazando 4.2 en 4.1, se tiene el trabajo para un ciclo de respuesta

$$W_d = C u^2 \omega^2 \int_0^{\frac{2\pi}{\omega}} \cos^2 \omega t dt$$

Resolviendo la integral

$$W_d = \left| \pi r^2 C u^2 \omega^2 \left(\frac{t}{2} + \frac{\text{sen}(2\omega t)}{4\omega} \right) \right|_0^{\frac{2\pi}{\omega}}$$

Evaluando la integral se tendrá

$$W_d = Cu^2\omega^2 \left(\frac{2\pi}{2} + \frac{\text{sen} \left(2\omega \frac{2\pi}{\omega} \right)}{4\omega} \right)$$

$$W_d = Cu^2\omega^2 \left(\frac{4\pi + \text{sen}(4\pi)}{4\omega} \right)$$

Entonces, con $\text{sen}(4\pi) = 0$

$$W_d = \pi Cu^2\omega \quad (4.3)$$

Mediante la siguiente expresión se expresa C en función del amortiguamiento crítico

$$\xi_d = \frac{C}{C_{cr}} \quad (4.4)$$

Donde el amortiguamiento crítico (C_{cr}) se expresa en función de la masa y la rigidez

$$C_{cr} = 2\sqrt{KM} \quad (4.5)$$

Reemplazando (4.4) y (4.5) en (4.3)

$$W_d = \pi \xi_d C_{cr} u^2 \omega$$

$$W_d = \pi \xi_d 2\sqrt{KM} u^2 \omega$$

$$2\sqrt{KM} = 2 \sqrt{KM \frac{K}{K}} = 2 \frac{K}{\omega_n}$$

$$W_d = \pi \xi_d 2Ku^2 \frac{\omega}{\omega_n} \quad (4.6)$$

Donde ω_n es la frecuencia de vibración natural de la estructura

Sea W_s la energía debido al esfuerzo elástico de la estructura

$$W_s = Ku^2 \quad (4.7)$$

Energía de Amortiguamiento (W_d)

$$W_d = \pi \xi_d 2W_s \frac{\omega}{\omega_n} \quad (4.8)$$

Despejando ξ_d

$$\xi_d = \frac{\omega_n}{\omega} \frac{W_d}{2\pi W_s}$$

Debido a que la relación entre las frecuencias, para casos prácticos es igual a uno, se expresa el amortiguamiento como:

$$\xi_d = \frac{W_d}{2\pi W_s} \quad (4.9)$$

La relación entre la energía de amortiguamiento y la energía de esfuerzo elástico bajo una sollicitación sísmica en la estructura se muestra en la Figura 7

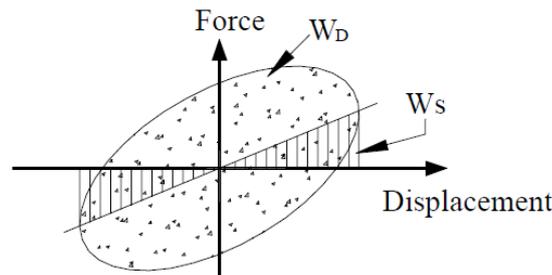


Figura 7. Desplazamiento vs fuerza del amortiguador (Tomado de: Seismic Design of Structures with Viscous Dampers)

El amortiguamiento efectivo en una estructura está definido como la suma del amortiguamiento añadido y el inherente, que para estructuras de concreto armado se asume igual al 5%.

$$\xi_{eff} = \xi_0 + \xi_d \quad (4.10)$$

ξ_0 = Amortiguamiento inherente

ξ_d = Amortiguamiento añadido

El FEMA 273 ^[4] expresa el amortiguamiento añadido por amortiguadores de la siguiente manera que es similar a la expresión encontrada en (4.9).

$$\xi_d = \frac{\sum W_d}{2\pi W_s} \quad (4.11)$$

Según la ecuación (4.3)

$$\sum W_d = \sum \pi C u^2 \omega$$

Donde en este caso u es el desplazamiento relativo en los extremos del amortiguador.

El desplazamiento que se empleará es el del modo fundamental de vibración, que en la mayoría de edificaciones, es el más importante.

Se asume una disposición del amortiguador en diagonal, como se muestra en la Figura 8

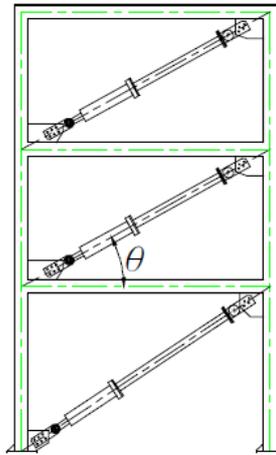


Figura 8. Disposición asumida (Tomado de: Seismic Design of Structures with Viscous Dampers)

Las ecuaciones que se resuelven adelante se basan asumiendo un ángulo de inclinación del dispositivo igual a θ y ϕ_{jr} es el desplazamiento relativo de cada entrepiso.

$$u = \cos\theta * \phi_{jr} \quad (4.12)$$

Remplazando 4.12 en la ecuación 4.3

$$\sum W_d = \frac{2\pi^2}{T} \sum C \cos^2\theta * \phi_{jr}^2 \quad (4.13)$$

La energía desarrollada por el esfuerzo elástico se representa como

$$W_s = F\Delta i$$

Donde F es la fuerza de cada piso y Δi es el desplazamiento de cada entrepiso

Matricialmente es posible expresar

$$W_s = \phi^T |K| \phi$$

$$W_s = \phi^T \omega^2 |m| \phi$$

$$W_s = \sum \omega^2 m \phi^2 = \frac{4\pi^2}{T^2} \sum m \phi^2 \quad (4.14)$$

Remplazando la ecuación 4.13 y 4.14 en la ecuación 4.10

$$\xi_{eff} = \xi_0 + \frac{\sum W_d}{2\pi W_s}$$

$$\xi_{eff} = \xi_0 + \frac{\sum \frac{2\pi^2}{T} \sum C \cos^2 \theta * \phi_{jr}^2}{2\pi \frac{4\pi^2}{T^2} \sum m \phi^2}$$

$$\xi_{eff} = \xi_0 + \frac{T \sum C \cos^2 \theta * \phi_{jr}^2}{4\pi \sum m \phi^2} \quad (4.15)$$

4.2 Trabajo Realizado por amortiguadores no lineales en la estructura

Al igual que para los amortiguadores lineales, se considera una historia de desplazamientos impuestos al sistema de un solo grado de libertad. A diferencia del caso anterior la energía desarrollada en términos de la velocidad será:

$$W_d = \int C \dot{u}^{1+\alpha} dt \quad (4.16)$$

Reemplazando la velocidad expresada en el tiempo en la ecuación anterior tendremos:

$$W_d = C(u \omega)^{1+\alpha} \int_0^{\frac{2\pi}{\omega}} |\text{sen}^{1+\alpha} \omega t| dt \quad (4.17)$$

$$W_d = 2^{2+\alpha} C \omega^\alpha u_0^{1+\alpha} \frac{\Gamma^2(1 + \alpha/2)}{\Gamma(2 + \alpha)}$$

Donde Γ es la función gamma,

Siguiendo un procedimiento similar al caso de los amortiguadores lineales se obtiene la siguiente ecuación:

$$\xi_d = \frac{\lambda C \omega^{\alpha-2} u^{\alpha-1}}{2\pi m} \quad (4.18)$$

Donde λ es un valor que puede ser obtenido de las tablas del FEMA o mediante la función:

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

La energía debido a los esfuerzos elásticos se representa como se muestra a continuación

$$W_s = \omega^2 \sum m u^2 \quad (4.19)$$

Reemplazando la ecuación (4.18) y (4.19) en la ecuación (4.11), donde el parámetro A es el máximo desplazamiento de la azotea del primer modo de vibración.

$$\xi_d = \frac{\lambda C \phi_{rj}^{1+\alpha} \cos^{1+\alpha} \theta_j}{2\pi A^{1-\alpha} \omega^{2-\alpha} \sum m_i \phi_i^2} \quad (4.20)$$

Remplazando (4.20) en la ecuación (4.10) se obtiene

$$\xi_{eff} = \xi_0 + \frac{\lambda C \phi r_j^{1+\alpha} \cos^{1+\alpha} \theta_j}{2\pi A^{1-\alpha} \omega^{2-\alpha} \sum m_i \phi_i^2} \quad (4.21)$$



CAPITULO V

Metodología de Diseño con Disipadores de Fluido Viscoso

5.1 Metodología de Diseño General

La metodología de diseño que se ha empleado, ha sido propuesta por el ASCE 7-10 Capítulo 18 ^[2]. Dicha metodología fue planteada únicamente para estructuras regulares, con dos dispositivos como mínimo en cada dirección de análisis. Además los dispositivos deberán encontrarse en todos los niveles.

Tras realizar un análisis tiempo-historia de la estructura sin disipadores, se obtiene una deriva máxima que posteriormente será reducida. El primer paso es escoger la deriva que se desea lograr, basado en el desempeño que se espera tenga la estructura. A continuación, se procede a calcular el porcentaje del amortiguamiento crítico que reducirá la deriva hasta el valor escogido. La siguiente etapa consiste en definir las propiedades del dispositivo de amortiguamiento a ser empleado (coeficiente de amortiguamiento C , rigidez K y exponente de no linealidad α). Con las propiedades definidas y con un modelo computacional que considere estos elementos, se vuelve a realizar un análisis tiempo-historia; de este análisis tenemos el valor de la deriva máxima, la cual no debe exceder la máxima elegida. Finalmente, se comprueba si el amortiguamiento de la estructura con disipadores es igual al propuesto.

5.2 Metodología para el diseño y configuración estructural del sistema de disipación de energía

5.2.1 Análisis de la estructura sin disipadores

La estructura debe ser modelada considerando la no linealidad de los materiales. Se asumen factores para considerar la no linealidad, estos factores reducen la rigidez de la estructura, asumiendo secciones fisuradas, el criterio a emplear es el propuesto por el ACI para estructuras de concreto.

Tabla 6

Factores de reducción para secciones agrietadas (Tomado de ACI) [1]

Elemento	Factor de reducción en corte	Factor de reducción en flexión
Vigas	0.4	0.5
Columnas	0.4	0.7

Con el modelo estructural no lineal, se realizará un análisis tiempo-historia. Se ha considerado emplear diferentes registros de aceleración correspondientes a la zona en que se encuentra la estructura escalados a la máxima aceleración esperada según la Norma Peruana [9]

5.2.2 Elección del desempeño

Consiste en la elección de un sismo de diseño y el nivel de desempeño que tendrá la estructura cuando sea sometida al sismo escogido. El sismo de diseño depende del periodo de retorno escogido, por ejemplo, puede tratarse de uno con un periodo de retorno de 500 años.

El nivel de desempeño consiste en definir el estado en el que se deberá encontrar la estructura tras la aplicación del sismo de diseño, por ejemplo, de acuerdo al criterio de desempeño escogido, el desempeño puede ser operativo, resguardo de vida, cerca al colapso, etc.

5.2.3 Objetivo de diseño

El objetivo de diseño está asociado a la deriva máxima aceptada de acuerdo al nivel de desempeño que se ha escogido. Esta deriva es conocida como la deriva objetivo; es evidente que esta es menor que la máxima hallada en el análisis del edificio sin dispositivos de amortiguamiento.

La inclusión de amortiguadores de fluido viscoso en la estructura busca lograr una deriva menor o igual a la objetivo cuando esta es analizada con un sismo de diseño.

El cociente entre la deriva máxima del análisis sin disipadores y la deriva objetivo es conocido como el factor de reducción de respuesta (B).

$$B = \frac{\text{Deriva Máxima}}{\text{Deriva Objetivo}}$$

Además, mediante la instalación de los disipadores de energía, se espera lograr un amortiguamiento objetivo, que se puede hallar directamente con la expresión planteada por el Programa Nacional para la Reducción de Peligro Sísmico (NERHP) [15]

$$B = \frac{2.31 - 0.41 \ln 5}{2.31 - 0.41 \ln \beta_{eff}}$$

En la expresión anterior el amortiguamiento efectivo (β_{eff}) debe ser desarrollado por los disipadores de energía y el inherente de la estructura, la cual usualmente se asume es igual a 5%. La participación que tendrán los disipadores en el amortiguamiento (β_{visc}) puede obtenerse descontando el amortiguamiento inherente de la estructura del efectivo total.

$$\beta_{visc} = \beta_{eff} - 5\%$$

5.2.4 Ubicación y Disposición de los Amortiguadores

Se recomienda usar los dispositivos en los pórticos exteriores y estos deberán ser constantes en toda la altura. Se deberán colocar por lo menos dos disipadores en cada dirección y ubicarlos simétricamente de forma que se evite introducir torsión en el sistema estructural.

5.2.5 Propiedades del amortiguador

a) Rigidez del brazo metálico

Se puede calcular mediante la siguiente expresión

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

Los valores de módulo de elasticidad (E), área de la sección transversal (A) y longitud (L), dependerán tanto del material como del elemento escogido y la geometría de la estructura.

b) Coeficiente de amortiguamiento

La forma de hallar el coeficiente de amortiguamiento dependerá si se trabaja con amortiguadores lineales o no lineales. Las expresiones respectivas, propuestas por el FEMA 273 ^[4], se presentan a continuación

Para amortiguadores lineales

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

Para amortiguadores no lineales

$$\beta_{visc} = \frac{\sum_j \lambda C_j \phi_{rj}^{1+\alpha} \cos^{1+\alpha} \theta_j}{2\pi A^{1-\alpha} W^{2-\alpha} \sum_i m_i \phi_i^2} \quad (4.21)$$

c) Exponente de velocidad (α)

Este coeficiente se calcula por medio de un proceso iterativo hasta encontrar el valor más adecuado definido por el diseñador. Puede tomar el valor de 1, para amortiguadores lineales; y menor a 1 para no lineales

5.2.6 Modelamiento y análisis estructural

La estructura se deberá modelar en un programa de análisis estructural que permita realizar un análisis tiempo-historia. Al momento de realizar el modelo se debe tener especial cuidado de definir correctamente las propiedades de los amortiguadores, que son los elementos que se están introduciendo al sistema. Además tener en cuenta que para este caso también se trabajará asumiendo que las secciones están agrietadas.

Al realizar el análisis se debe emplear los mismos registros sísmicos que se utilizaron para analizar el edificio sin amortiguadores, con la finalidad de comparar los resultados de ambos y verificar la eficacia de los dispositivos.

5.2.7 Evaluación de la estructura con amortiguadores

Una vez que se ha desarrollado el modelo y análisis de la estructura se procede a evaluar los resultados obtenidos; a diferencia de la estructura sin disipadores, en las estructuras con disipadores se debe evaluar las derivas, el amortiguamiento efectivo y el balance energético

a) Deriva

Los resultados de la deriva máxima obtenida se comparan con la deriva objetivo propuesta inicialmente. Si no se logra cumplir con el objetivo, se deben cambiar las propiedades del amortiguador, su disposición y el número de elementos a ser empleados.

b) Amortiguamiento efectivo

El amortiguamiento efectivo de la estructura puede ser estimado con diferentes métodos: vibración libre, señales y respuesta espectral y, calculando el trabajo que realiza el sistema de amortiguamiento añadido.

c) Balance energético

Se emplea el balance energético con la finalidad de verificar el porcentaje de participación del amortiguamiento en la disipación de energía de la estructura.

5.2.8 Diseño de la estructura de concreto armado

Realizar el diseño de los elementos de concreto armado requiere de un análisis espectral de la estructura. Éste tipo de análisis tendrá que considerar un espectro reducido que considere el incremento de amortiguamiento, mas no se incluirán los disipadores ya que su efecto está considerado en el espectro reducido.

a) Elementos que constituyen parte del sistema de amortiguamiento

Tras realizar el análisis con el espectro reducido, se calculan las fuerzas axiales en estos elementos; luego se procede a amplificar estas fuerzas con un coeficiente que es igual al cociente entre la fuerza axial del elemento con disipadores (análisis tiempo-historia) y la fuerza axial del elemento obtenida con el espectro reducido.

b) Sistema estructural

El resto de secciones de concreto armado que constituyen la estructura y no son parte del pórtico en el que se encuentra situado el amortiguador, se diseñan con las fuerzas obtenidas del análisis espectral con el espectro reducido por el amortiguamiento añadido.

5.2.9 Diseño de los elementos de disipación

Tanto las conexiones como los disipadores de energía serán diseñados con el esfuerzo crítico del análisis tiempo-historia. Haciendo uso de las propiedades de los amortiguadores y los esfuerzos críticos se procede a revisar los elementos disponibles en el mercado.

CAPITULO VI

CASO DE ESTUDIO

6.1 Características del modelo

Con el objetivo de desarrollar un ejemplo de aplicación se empleará un modelo teórico para simular un escenario en el cual es necesario estructurar y diseñar una edificación muy flexible, con alturas de entrepiso considerables (4.5 metros) y un sistema estructural aporticado.

La dificultad al realizar el diseño es que no es posible usar muros de corte ni vigas con gran peralte. Dichas consideraciones se deben a que la estructura estará destinada para ser usada como un centro comercial, lo que conlleva a tener pórticos libres, especialmente en los que están orientados hacia el exterior de la edificación, el que se muestra en las Figura 9.

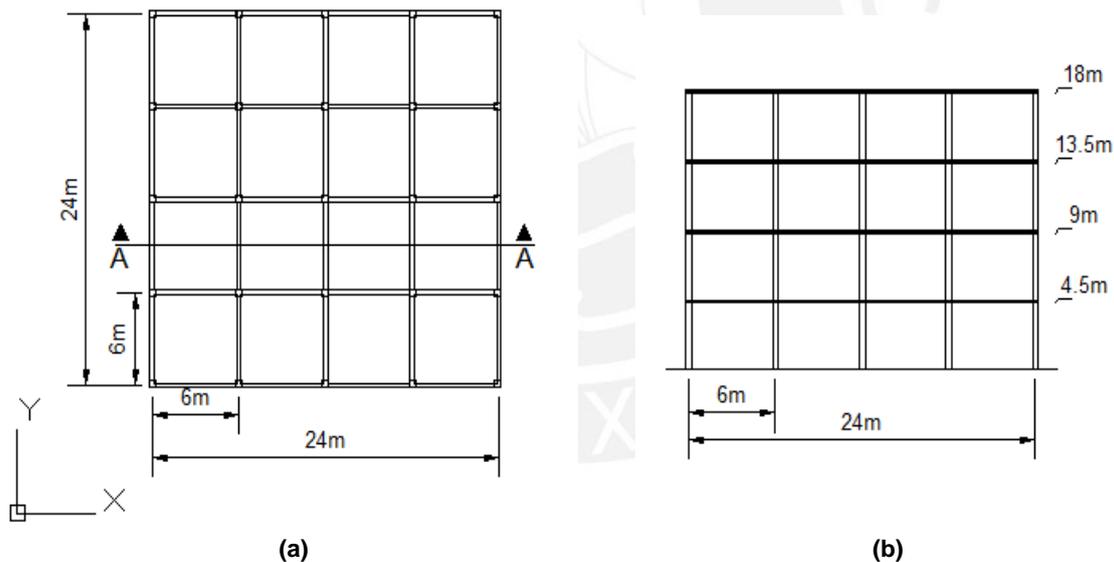


Figura 9. Vista en plata de la edificación (a). Elevación del corte A-A (b)

6.2 Características de la edificación

La edificación en estudio se trata de un edificio de 4 niveles, situado en la ciudad de Lima en el distrito de Miraflores. El edificio está destinado a ser un centro comercial. Cada nivel ocupará un área de 576 m^2 , siendo la altura de piso de 4.5 m para todos los entrepisos.

6.2.1 Sistema estructural

El sistema estructural en este caso de estudio es aporticado, conformado por vigas y columnas. Las columnas de 45x45 cm y las vigas de 30x70cm. Además, por las grandes luces se consideró emplear losas macizas de 20 cm de espesor. Finalmente, con propósitos de análisis, se consideró que la tabiquería se encuentra aislada de la estructura.

6.2.2 Las características de los materiales

En la tabla 7 se presentan de forma resumida las propiedades de los materiales asumidas para el análisis de esta edificación.

Tabla 7
Características mecánicas de los materiales

Material	Propiedad	Símbolo	Valor	Unidades
Concreto	Resistencia a la compresión	$f'c$	210	kg/cm ²
	Módulo de elasticidad	E_c	220000	kg/cm ²
	Peso específico	γ	2400	kg/m ³
	Coefficiente de Poisson	ν	0.15	
Acero	Esfuerzo de fluencia	F_y	4200	kg/cm ²
	Módulo de elasticidad	E_s	2000000	kg/cm ²

6.3 Consideraciones para el análisis Sismorresistente

6.3.1 Cargas de Diseño

Se presentan las cargas empleadas para el diseño en la tabla 8.

Tabla 8
Cargas Consideradas

Tipo de carga	Valor	Unidades
Peso de la losa	480	kg/ m ²
Peso del piso terminado	100	kg/ m ²
Peso de la tabiquería	100	kg/ m ²
Sobre carga (Piso Típico)	500	kg/ m ²
Sobre carga (Azotea)	100	kg/ m ²

6.3.2 Parámetros empleados para el análisis Sismorresistente

La norma E.030 ^[9] establece como válido el análisis espectral, para lo cual necesitamos conocer ciertos parámetros respecto de la ubicación así como las características de la estructura. A continuación se detalla los parámetros sísmicos empleados.

Tabla 9
Resumen de Parámetros Usados

Factor	Valor
Z	0.4
U	1.3
S	1
C	1
R	8

Factor de zona (Z)

Por encontrarse el edificio en la ciudad de Lima, está ubicado en la zona sísmica 3, por lo tanto el valor de Z será 0.4g.

Factor de amplificación del suelo (S y Tp)

La estructura se construirá sobre un suelo muy rígido (grava típica de Lima), por lo tanto el valor de S será 1 y el de Tp será 0.4 seg.

Factor de uso (U)

Se trata de un centro comercial, por lo que el factor de uso es 1.3. Es importante resaltar que este factor es arbitrario y no tiene un significado físico.

Factor de reducción por ductilidad (R)

El sistema estructural empleado es de pórticos de concreto armado, por lo que el valor máximo puede ser 8. En este caso se tomará su máximo valor, es decir R será igual a 8. Como la estructura califica como regular, no se reducirá el valor de R por $\frac{3}{4}$.

Factor de amplificación sísmica (C)

Está dado por la siguiente expresión

$$C = 2.5 \frac{T_p}{T}; C \leq 2.5$$

Como Tp es 0.4 y el periodo de vibración fundamental de la estructura es 1.06 seg. (Obtenido del análisis modal en computadora), el valor de C será 0.94. Debido a que la norma limita el espectro de aceleración a una relación de C/R mínima de 0.125 y la presenta estructura tiene una relación C/R=0.1175, se debe usar el valor de 0.125.

La tabla 9 resume los valores asumidos para el análisis espectral.

6.3.3 Registros de Aceleración sísmica usados

Se emplearon 3 registros sísmicos correspondientes a la costa peruana para el análisis de la estructura (Figura 10, Figura 11 y Figura 12). Además, con la finalidad de conocer algunas características de los sismos se usó la transformada rápida de Fourier para conocer el contenido de frecuencias.

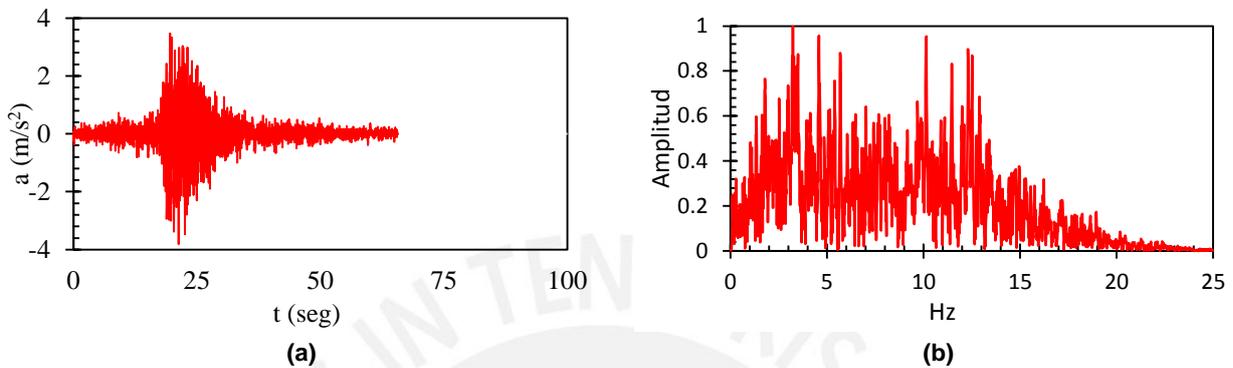


Figura 10. Acelerograma del sismo de 1966. **(a)** Registro de aceleraciones. **(b)** Transformada rápida de Fourier

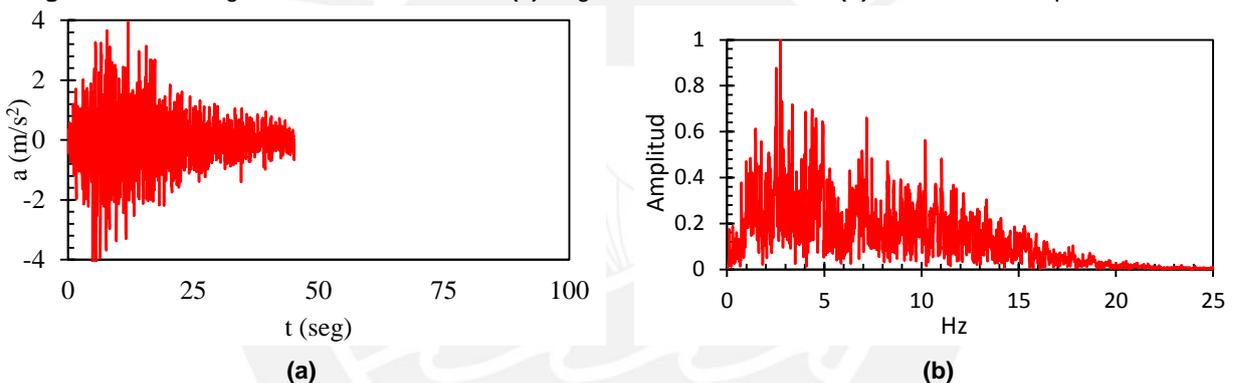


Figura 11. Acelerograma del sismo de 1970. **(a)** Registro de aceleraciones. **(b)** Transformada rápida de Fourier

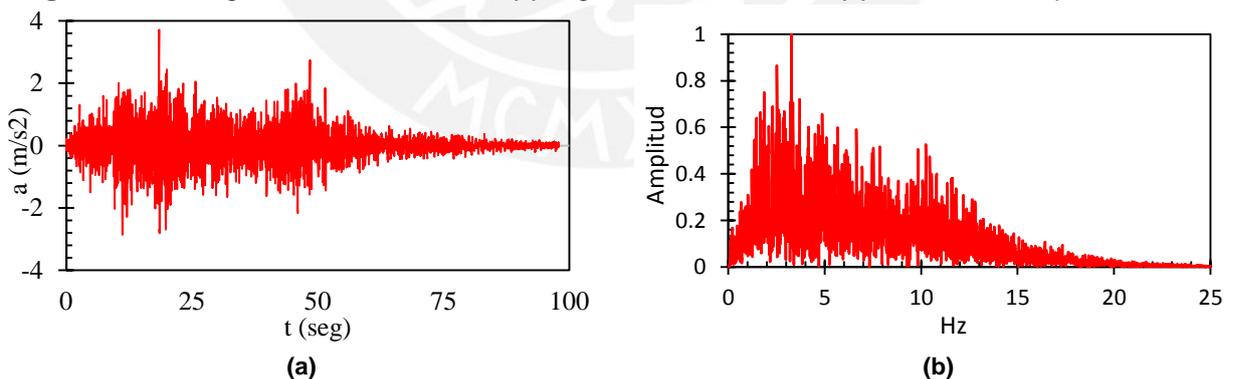


Figura 12. Acelerograma del sismo de 1974. **(a)** Registro de aceleraciones. **(b)** Transformada rápida de Fourier

Se observa que el registro empleado del sismo de 1966 tiene un forma típica de los acelerogramas peruanos, sin embargo, en la trasformada rápida de Fourier (FFT) se observa un alto contenido de frecuencias. Por otro lado, los espectros en el dominio de la frecuencia de los otros registros empleados contienen una frecuencia dominante claramente definida.

6.4 Análisis sísmico de la estructura

El análisis sísmico de la edificación tiene como objetivo determinar las fuerzas internas que existen en los elementos estructurales por acción del sismo para su posterior diseño. Existen varias maneras de analizar una estructura ante solicitaciones sísmicas, tales como: Análisis espectral, pseudo dinámico, tiempo-historia.

El análisis espectral requiere de algunos parámetros estructurales como el periodo natural de vibración de la estructura, coeficientes de reducción sísmica por ductilidad y otros parámetros sísmicos como la localización, que nos permite generar un espectro de aceleraciones uniformizadas que representan una intensidad con una tasa de retorno de 50 años y 10% probabilidad de excedencia.

En cuanto al análisis pseudo dinámico, se presenta el problema dinámico mediante una serie de fuerzas que se concentran en cada diafragma de la estructura. Esta serie de fuerzas se distribuyen de manera triangular, considerando una excentricidad accidental del 5% en cada dirección, debido a esta excentricidad se generan momentos de torsión.

Los problemas principales que se presentan en las estructuras, debido a solicitaciones sísmicas, se deben principalmente a los desplazamientos excesivos que existen. Estos producen altas concentraciones de esfuerzos en las uniones viga-columna (nudos), así como problemas en elementos estructurales y no estructurales.

Una forma de medir el daño que se presenta en una estructura, debido a la limitación de ductilidad que todas las construcciones tienen, es la deriva permitida. Por ejemplo, para sistemas estructurales conformados únicamente por pórticos y muros de concreto armado la deriva máxima según la norma E.030 [9] es de 7 ‰

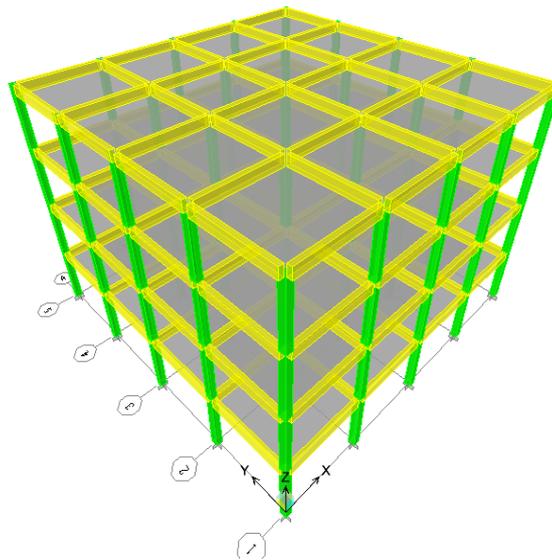


Figura 13. Modelo computacional de la estructura en el software ETABS

6.4.1 Modelo computacional

El análisis de la estructura se realizó empleando el programa de Computers and Structures ETABS Nonlinear v9.7.3

La estructura modelada está conformada por 5 pórticos de concreto armado en cada una de las direcciones principales, con una distancia de 6 metros de eje a eje; y con 4 niveles de 4.5 metros de altura de entrepiso. En el sistema estructural se consideraron losas macizas que se modelaron como membranas; tanto vigas como columnas fueron modeladas con elementos tipo “frame”. Finalmente, se agregó un diafragma rígido a cada una de las losas.

6.4.2 Análisis Pseudo Estático

Con los parámetros definidos en el Ítem 6.3.2, los cuales se resumen en la tabla 9, procedemos a realizar el análisis Pseudo Estático.

Tabla 10
Cálculo del peso de la edificación

	Masa (ton)	Área (m ²)	Peso por m ² (ton/m ²)	Peso por nivel (ton)
Nivel 1	65.73	576	1.12	609.2
Nivel 2	65.73	576	1.12	609.2
Nivel 3	65.73	576	1.12	609.2
Nivel 4	51.20	576	0.87	609.2
Total	248.39	2304	1.06*	2436.8

* Peso promedio por m²

La norma peruana sismorresistente E-030 establece la siguiente relación para el cálculo de la fuerza cortante basal:

$$V = \frac{ZUCS}{R} P$$

En el presente modelo, se tiene: V=158.39 Ton. Esta fuerza cortante basal servirá para poder hallar un factor de escala de las fuerzas halladas por el análisis dinámico espectral.

6.4.3 Análisis Espectral

Para el análisis espectral se consideraron tres grados de libertad dinámicos por cada piso, por lo que tendremos 12 gdl en total. La masa participante asignada en el análisis fue de 100% de la carga muerta y 50% de masa de la carga viva, esto debido a lo indicado en la norma E-030 por ser la edificación de Tipo B. El espectro obtenido, según la norma E.030, se muestra en la Figura 14. Espectro usado para el análisis según la norma E.030.

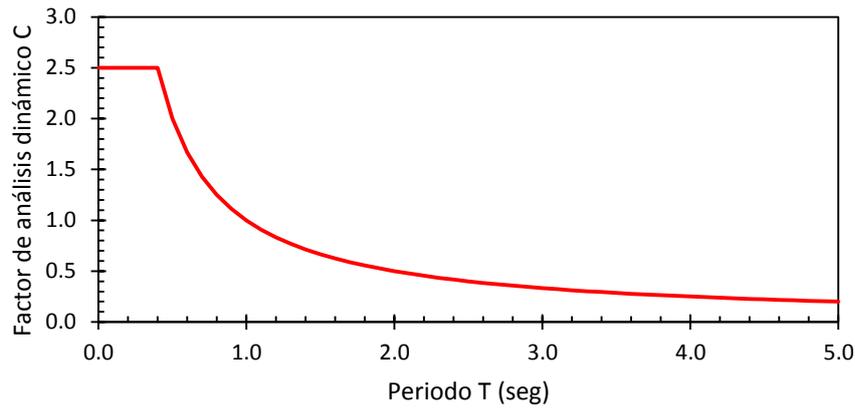


Figura 14. Espectro usado para el análisis según la norma E.030.

Como resultado del análisis dinámico espectral, se obtiene la siguiente fuerza cortante basal dinámica.

$$V_{din} = 128.91 \text{ Ton}$$

Mediante la relación entre la fuerza cortante estática y dinámica, se encuentra el factor de escala.

$$\text{Factor de escala} = 1.22$$

6.5 Resultados del análisis sin dispositivos de disipación de Energía

6.5.1 Resultados del Análisis Pseudo Estático.

Los valores de las derivas obtenidas del análisis pseudo estático, según lo establecido por la norma de Diseño Sismorresistente E.030, se muestran en la Figura 15. En la Figura 15 se observa la máxima deriva de la estructura la cual se genera en el segundo entrepiso. Max. Deriva = 14.87 0/00. Esta deriva excede los límites establecidos en la NTE E.030 diseño sismorresistente que para la estructura en estudio es 7 0/00.

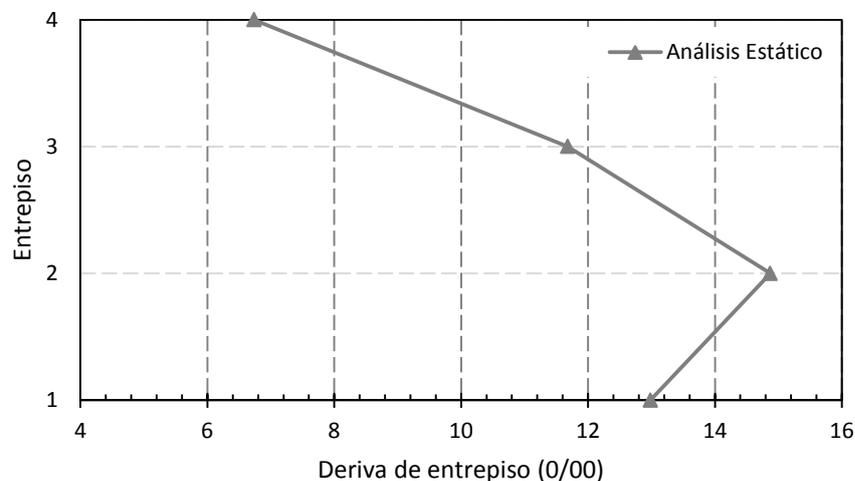


Figura 15. Derivas de los Análisis propuestos por la norma E-030 (Max Deriv. A.Est=14.87 0/00)

6.5.2 Resultados del Análisis Dinámico Espectral.

Los valores de las derivas obtenidas del análisis dinámico, según lo establecido por la norma de Diseño Sismorresistente E.030, se muestran en la figura 15. En la figura 15 se observa la Máxima deriva de la estructura la cual se genera en el segundo entrepiso Max. Deriva = 11.7 0/00. Esta deriva excede los límites establecidos en la NTE E.030 diseño sismorresistente que en nuestro caso por el tipo de la estructura es de 7 0/00

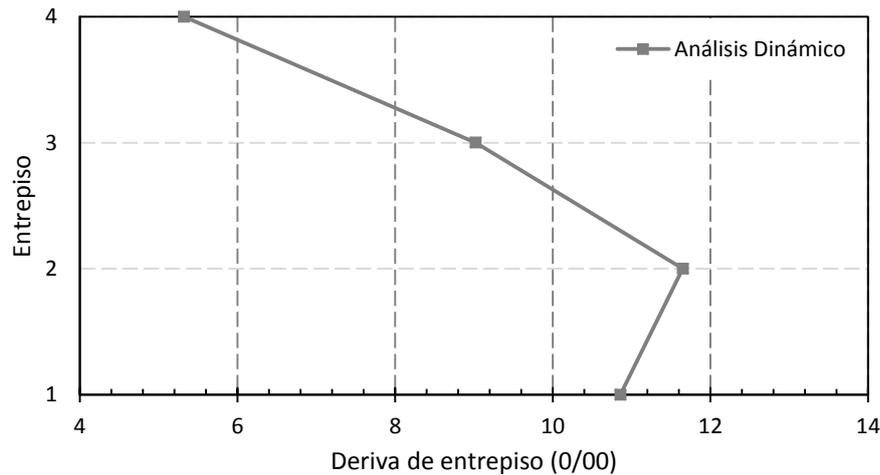


Figura 16. Derivas de entrepiso obtenidos del análisis dinámico espectral

6.5.3 Resultados del Análisis Tiempo Historia

Luego del análisis tiempo-historia de la misma estructura, considerando que las secciones se encuentran agrietadas como se indicó previamente, se obtiene las máximas derivas de entrepiso que se resumen en la Tabla 11.

Tabla 11

Derivas (0/00) obtenidas del Análisis Tiempo Historia del modelo sin disipadores

	Registro de aceleraciones analizado		
	Sismo 66	Sismo 70	Sismo 74
Entrepiso 4	4.91	5.99	4.65
Entrepiso 3	4.64	5.37	5.91
Entrepiso 2	6.32 [*]	5.77	5.25
Entrepiso 1	5.32	6.00	4.74

^{*} Máxima deriva obtenida

6.6 Procedimiento de Implementación de Amortiguadores Lineales de Fluido Viscoso

6.6.1 Elección de la deriva objetivo

La elección de la deriva objetivo se realizó en base a los valores propuestos por HAZUS: una deriva de 0.0058 corresponde a un daño moderado y, una de 0.0033

a un daño leve. Considerando que estas derivas se han establecido para construcciones en los Estados Unidos, en donde el proceso constructivo es más riguroso que en Perú, se escogió una deriva igual al promedio aritmético de estas. Evidentemente éste es un criterio arbitrario y conservador. La deriva obtenida fue de 4.5 por mil (0.0045). Esta deriva permite realizar una comparación del análisis tiempo historia con el análisis espectral que incluye un factor de amplificación de 1.3 (Factor de Uso).

6.6.2 Determinación del amortiguamiento efectivo

En base a la relación entre la deriva objetivo planteada y a la máxima deriva obtenida del análisis tiempo-historia de la estructura sin disipadores, se obtiene un factor que nos permite calcular el amortiguamiento efectivo (ver 5.2.3)

$$B = \frac{\text{Deriva Máxima}}{\text{Deriva Objetivo}}$$

$$B = \frac{2.31 - 0.41 \ln 5}{2.31 - 0.41 \ln \beta_{eff}}$$

En base a las ecuaciones planteadas se puede encontrar un valor del amortiguamiento efectivo necesario para lograr la deriva objetivo propuesta. La Tabla 12 presenta los valores obtenidos para el cálculo del amortiguamiento efectivo.

6.6.3 Cálculo del coeficiente de amortiguamiento

A fin de realizar un primer cálculo del coeficiente de amortiguamiento se dispuso emplear 4 amortiguadores por piso para cada dirección, este análisis sólo considera la dirección en X por la simetría de la estructura. En la imagen que se presenta a continuación, se puede apreciar la disposición de los amortiguadores en una elevación lateral. Estos están colocados en dos pares por piso; cada par se encuentra en una de las caras externas opuestas de la estructura.

Tabla 12
Datos para el cálculo del amortiguamiento efectivo necesario

Característica	Valor
Deriva máxima	0.0063
Deriva objetivo	0.0045
Factor de respuesta (B)	1.4
Amortiguamiento efectivo necesario (β_{eff})	16.43%
Amortiguamiento inherente (β_{inh})	5.00%
Amortiguamiento de los disipadores (β_{visc})	11.43%

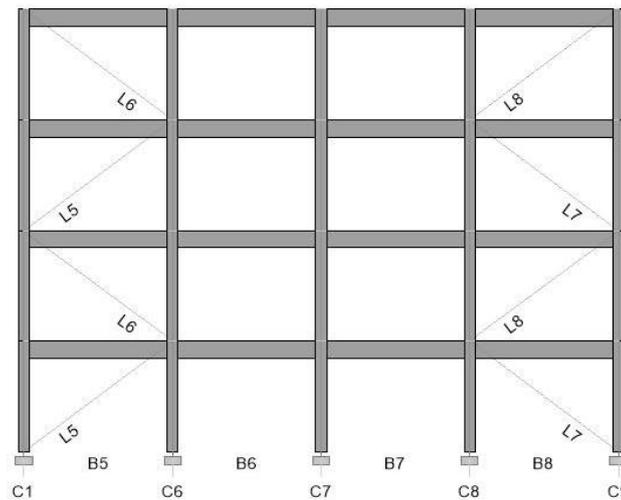


Figura 17. Disposición de los Amortiguadores

El cálculo del coeficiente de amortiguamiento se realizó según el procedimiento establecido por el FEMA 273 [4] para estimar un primer valor del coeficiente de amortiguamiento con amortiguadores lineales. La ecuación planteada por el FEMA 273 [4] es la siguiente:

$$\beta_{eff} = \beta + \frac{T \sum_j C_j \cos^2 \theta_j \phi_{rj}^2}{4\pi \sum_i \left(\frac{w_i}{g}\right) \phi_i^2} \quad (6.1)$$

En la Tabla 13, se calculan los parámetros necesarios para poder hallar C, de la ecuación 6.1.

Tabla 13
Parámetros para el cálculo de C

	ϕ_i	ϕ_{ij}	Masa	$\cos\theta$	N° disp./ piso	$\sum \phi_{rj}^2 \cos^2 \theta$	$\sum \phi_i^2 m_i$
Nivel 1	0.28	0.28	65.74	0.8	4	0.29	5.31
Nivel 2	0.62	0.34	65.74	0.8	4	0.41	25.40
Nivel 3	0.87	0.25	65.74	0.8	4	0.23	50.05
Nivel 4	1.00	0.13	51.20	0.8	4	0.06	51.20
			Suma			0.98	131.96

Donde:

$$4 \pi \sum m \phi^2 = 1658.2$$

$$T \sum \cos^2 \theta * \phi_j r^2 = 0.98$$

Con lo que podemos hallar el coeficiente de amortiguamiento

$$C = \frac{\beta_{visc}}{\left(\frac{4 \Pi \sum m \phi^2}{T \sum \cos^2 \theta * \emptyset jr^2} \right)}$$

$$C = 193.13 \text{ ton s/m}$$

A partir de los resultados obtenidos (C=193.13 ton-s/m) se escoge un coeficiente de amortiguamiento, redondeando se tiene C = 200 ton-s/m.

6.6.4 Cálculo de la rigidez del brazo del amortiguador

Se considera la rigidez axial del brazo con la siguiente relación $K=EA/L$ (Perfil Hss 7.5x0.500. Anexo 2). La Tabla 14 resume las propiedades asumidas para el brazo.

Tabla 14
Propiedades del brazo del amortiguador

Características	Valor	Unidades
Módulo de elasticidad	29000	ksi
	20400000	tn/m ²
Área de la sección transversal	11.0	in ²
	0.007161	m ²
Longitud	295.27	in
	7.5	m
Rigidez	1090.17	kip/in
	19477.92	tn/m

6.6.5 Análisis tiempo-historia de la edificación con amortiguadores

Al igual que se realizó el análisis de la edificación sin amortiguadores, se analizó la estructura con estos elementos y, una vez más, considerando las secciones fisuradas en el análisis.

Los resultados obtenidos de la deriva para cada caso se presentan en la tabla 15

Tabla 15
Derivas (0/00) obtenidas del Análisis Tiempo Historia del Modelo con disipadores C=200, $\alpha=1$

	Registro de aceleraciones analizado		
	Sismo 66	Sismo 70	Sismo 74
Entrepiso 4	1.51	1.78	1.86
Entrepiso 3	2.40	3.10	3.23
Entrepiso 2	2.97	3.86*	3.79
Entrepiso 1	2.53	3.74	3.32

* Deriva máxima obtenida

En base a los resultados, se concluye que el amortiguamiento empleado es el adecuado para lograr una deriva menor a la planteada (4.5 por mil).

6.6.6 Cálculo del amortiguamiento efectivo

Tras haber encontrado la deriva máxima de la estructura con disipadores para los diversos casos de registro sísmico, se procede a comprobar el amortiguamiento efectivo. Con tal motivo se aplica una función pulso en el edificio para estudiar la respuesta del amortiguamiento elástico lineal y mediante el decremento logarítmico encontrar la variable en estudio.

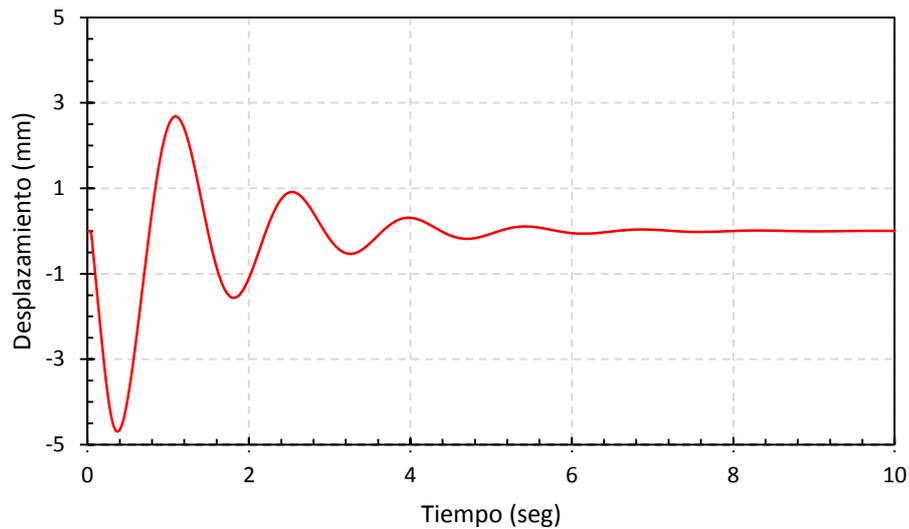


Figura 18. Decremento del desplazamiento de la estructura en función del tiempo. (t vs m)

La siguiente expresión relaciona el decremento logarítmico con el amortiguamiento.

$$\ln\left(\frac{x_t}{x_{t+nT}}\right) = \frac{2n\pi\xi}{\sqrt{1-\xi^2}}$$

$$\ln\left(\frac{0.00469}{0.00156}\right) = \frac{2\pi\xi}{\sqrt{1-\xi^2}}$$

De donde se obtiene

$$\xi = 17.2\%$$

El amortiguamiento efectivo, inicialmente planteado, fue 16.43%. Comparando ambos valores se deduce que se ha alcanzado un resultado aproximado que cumple con las expectativas de diseño.

6.6.7 Energía del sistema

Se procede a evaluar la participación de los amortiguadores en la disipación de la energía de entrada a través del gráfico de energía que se obtiene del software ETABS.

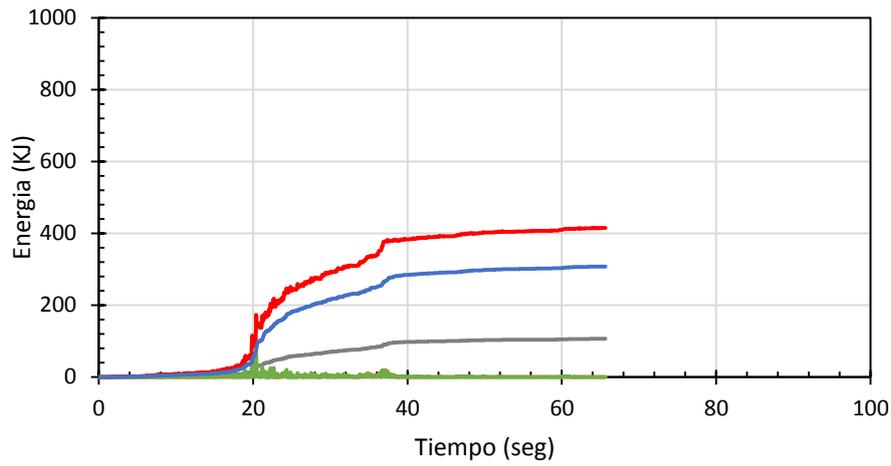
Tabla 16

Porcentaje de disipación de energía logrado en cada evento sísmico

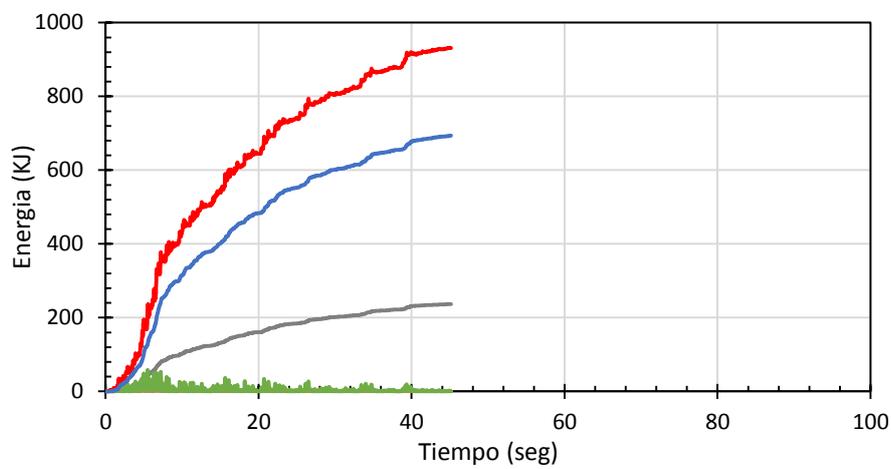
	Sismo del 66	Sismo del 70	Sismo del 74
Energía ingresada en el sistema (KJ)	415	932	846
Energía disipada por los amortiguadores (KJ)	308	694	634
Porcentaje de energía disipada	74%	74%	75%

Mediante este análisis se observa que la participación energética del Sistema de Amortiguamiento Lineal es aproximadamente 75%, con lo se observa poca participación en disipación de energía histerética de la propia estructura.

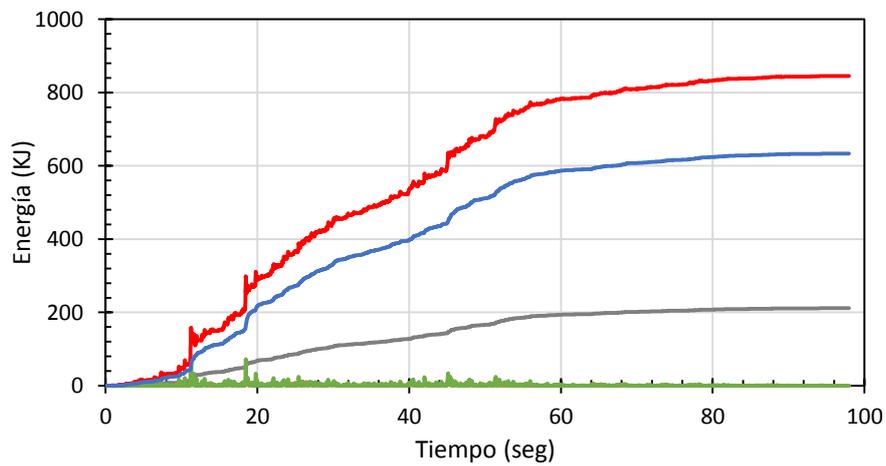
Este indicador permite confiar en la reducción de daños con la ayuda de este sistema de disipación de energía. En la Figura 19. Gráfico de Energía. **(a)** Registro sismo 66. **(b)** Registro sismo 70. **(c)** Registro sismo 74 se puede observar la disipación de energía por diferentes medios para cada caso de análisis.



(a)



(b)



(c)

Figura 19. Gráfico de Energía. (a) Registro sismo 66.(b) Registro sismo 70 .(c) Registro sismo 74

- Energía ingresada en el sistema
- Energía disipada por el amortiguamiento inherente
- Energía potencial
- Energía cinética
- Energía disipada por el amortiguamiento añadido

6.6.8 Curva de Histéresis

A partir de los gráficos que se muestran a continuación, se puede identificar el comportamiento fuerza-desplazamiento del amortiguador. Se observa una tendencia casi elíptica.

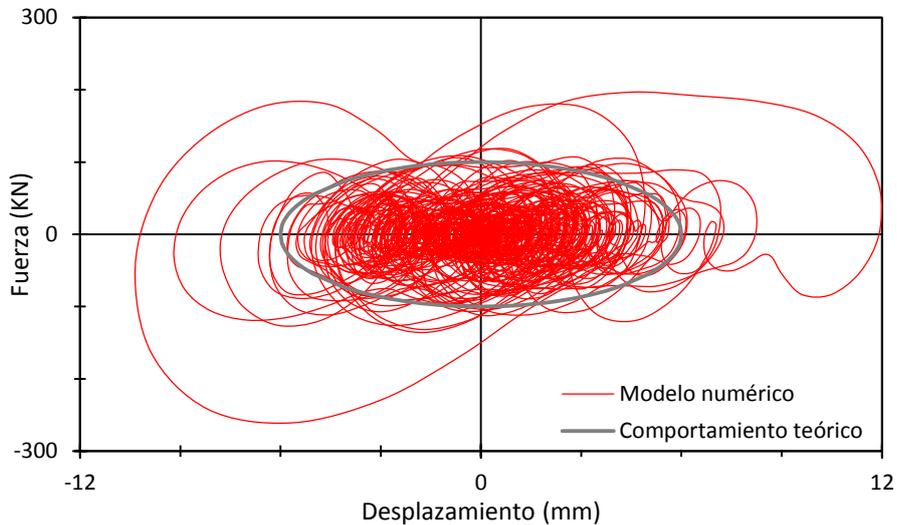


Figura 20. Curva de histéresis de un dissipador lineal del primer nivel del análisis tiempo-historia del sismo del 66

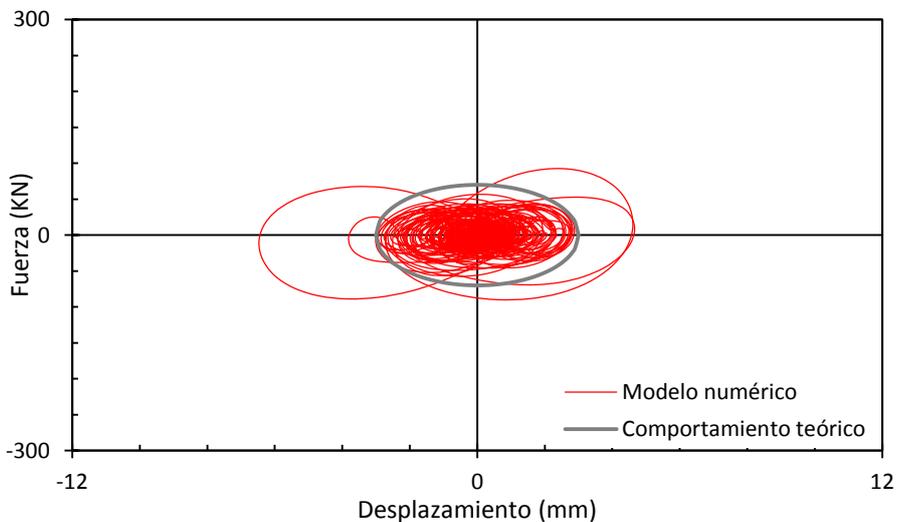


Figura 21. Curva de histéresis de un dissipador lineal del cuarto nivel del análisis tiempo-historia del sismo del 70

6.7 Procedimiento de Implementación de Amortiguadores No Lineales de Fluido Viscoso

6.7.1 Determinación de la deriva objetivo y amortiguamiento efectivo

Al igual que en el caso de los dissipadores lineales, también se debe escoger una deriva objetivo (la misma que para el caso anterior) y luego calcular el

amortiguamiento que deben incorporar los amortiguadores (13.36%), con un amortiguamiento efectivo de 18.36%.

6.7.2 Cálculo del coeficiente de amortiguamiento

Análogo al caso de disipadores lineales, primero se ubican los elementos en la estructura y se procede a calcular haciendo uso de las ecuaciones propuestas en FEMA 273 para disipadores no lineales.

$$\xi_{eff} = \xi_0 + \frac{\sum_j \lambda C_j \phi_{rj}^{1+\alpha} \cos^{1+\alpha} \theta_j}{2\pi A^{1-\alpha} \omega^{2-\alpha} \sum_i m_i \phi_i^2}$$

En la tabla 17 se presenta las variables necesarias para determinar el valor de C. Además se deben considerar los parámetros presentados en la tabla 16

Tabla 17
Parámetros para el diseño con amortiguadores no lineales

Parámetro	Valor
T	1.4
A	0.087
α	0.5
λ	3.5

Tabla 18
Parámetros para el cálculo de C con amortiguadores no lineales

	ϕ_i	ϕ_j	Masa	cos θ	Nº disp./ piso	$\sum \phi_r^{1+\alpha} \cos^{1+\alpha} \theta$	$\sum \phi_i^2 m_i$
Nivel 1	0.28	0.28	65.74	0.8	4	1.52	5.31
Nivel 2	0.62	0.34	65.74	0.8	4	1.96	25.40
Nivel 3	0.87	0.25	65.74	0.8	4	1.26	50.05
Nivel 4	1.00	0.13	51.20	0.8	4	0.46	51.20
					Suma	1.48	131.96

Luego se tiene:

$$2\pi A^{1-\alpha} \omega^{2-\alpha} \sum m_i \phi_i^2 = 2325.17$$

Finalmente, la constante de amortiguamiento no lineal será

$$C=51.3 \text{ ton-s/m}$$

6.7.3 Cálculo de la rigidez del brazo del amortiguador

Se considera la rigidez axial del brazo con la siguiente relación $K=EA/L$. Se usaron las mismas propiedades que la Tabla 14

6.7.4 Análisis tiempo historia con amortiguadores no lineales

Una vez realizado el análisis tiempo-historia con los tres acelerogramas, se obtuvieron los siguientes valores de derivas:

Tabla 19

Derivas (0/00) del Análisis Tiempo Historia del Modelo con disipadores C=50, α=0.5

	Registro de aceleraciones analizado		
	Sismo 66	Sismo 70	Sismo 74
Entrepiso 4	1.47	1.60	1.67
Entrepiso 3	2.53	2.99	3.06
Entrepiso 2	2.77	3.81*	3.77
Entrepiso 1	2.49	3.65	3.27

* Deriva máxima obtenida

A partir de la Tabla 19 mostrada se concluye que existe una disminución de la deriva y que se cumple con la deriva objetivo escogida.

6.7.5 Cálculo del amortiguamiento efectivo

Tras haber encontrado la deriva máxima de la estructura con disipadores no lineales para los diversos casos de registro sísmico, se procede a comprobar el amortiguamiento efectivo. Se aplicó una función pulso en el edificio para estudiar la respuesta del amortiguamiento y mediante el decremento logarítmico encontrar la variable en estudio, como se muestra en la Figura 22. Decremento del desplazamiento de la estructura en función del tiempo.

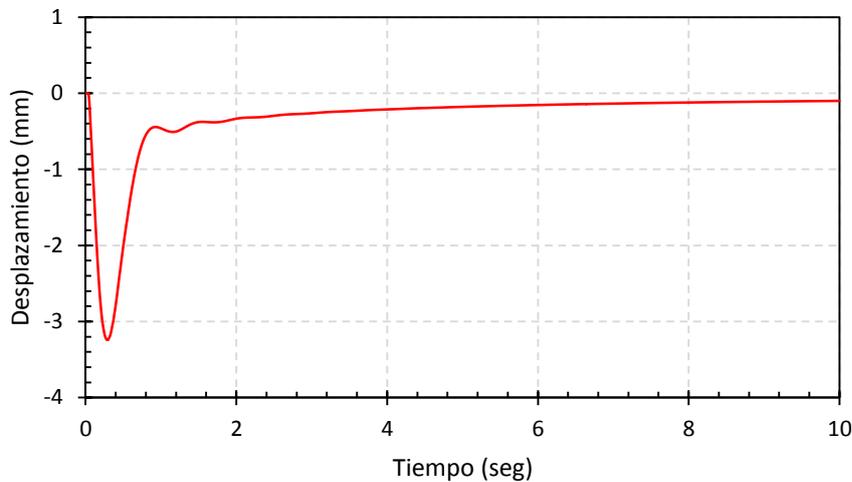


Figura 22. Decremento del desplazamiento de la estructura en función del tiempo.

Con la expresión correspondiente al decremento logarítmico, se calculó el amortiguamiento de la estructura, esta ecuación se denomina decremento logarítmico.

$$\ln\left(\frac{x_t}{x_t + nT}\right) = \frac{2n\pi\xi_{eff}}{\sqrt{1 - \xi_{eff}^2}}$$

$$\ln\left(\frac{2.87 * 10^{-3}}{1.12 * 10^{-4}}\right) = \frac{2 * 3.1416 * 3 * \xi_{eff}}{\sqrt{1 - \xi_{eff}^2}}$$

De donde se obtiene,

$$\xi = 16.9 \%$$

El amortiguamiento efectivo inicialmente planteado fue 18.36% por lo que se alcanza un resultado aproximado que cumple con los objetivos de diseño.

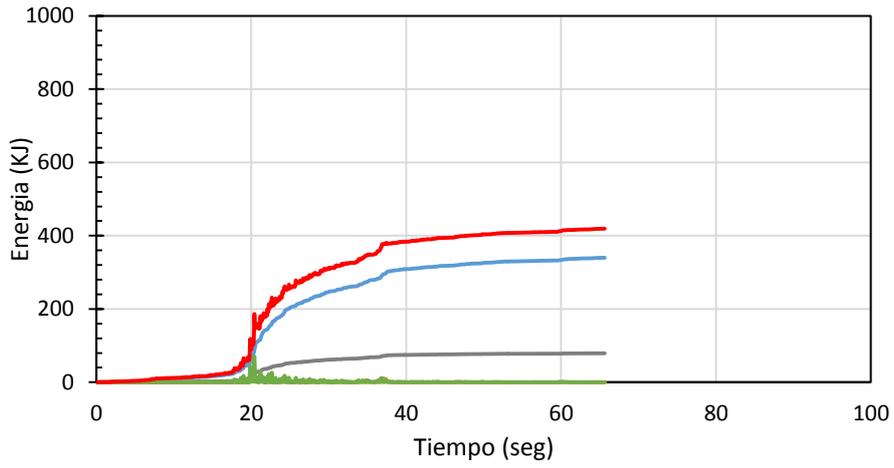
6.7.6 Energía del sistema

A continuación se procede a evaluar la participación de los amortiguadores en la disipación de la energía de entrada a través del gráfico de energía que podemos extraer del software ETABS.

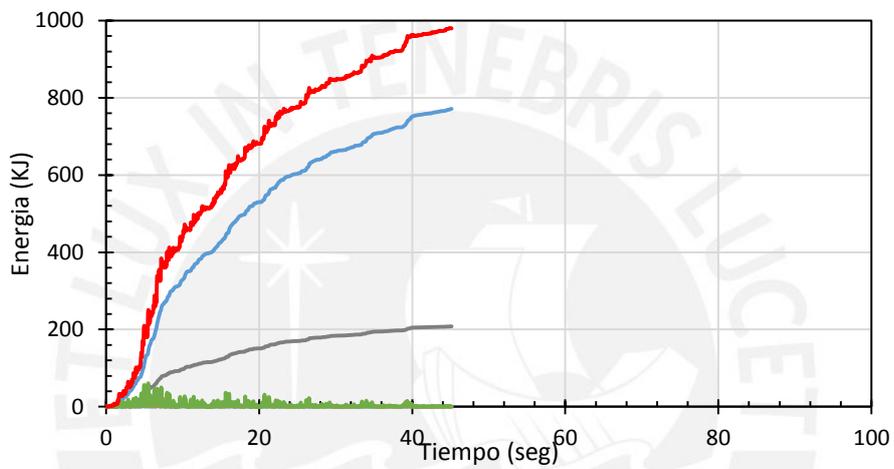
Tabla 20
Porcentaje de disipación de energía logrado en cada evento sísmico

	Sismo del 66	Sismo del 70	Sismo del 74
Energía ingresada en el sistema (KJ)	419	980	900
Energía disipada por los amortiguadores (KJ)	340	771	731
Porcentaje de energía disipada	81%	79%	81%

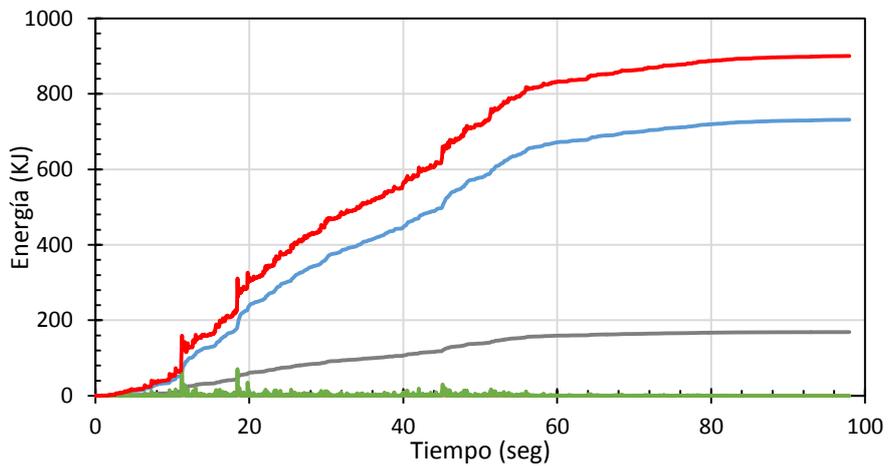
La Figura 23 muestra las diferentes formas de disipación de energía, así como la energía que ingresó en el sistema a lo largo de cada uno de los eventos sísmicos. Nótese que los dispositivos de disipación de energía tienen una gran participación a lo largo de todos los casos. Es claro que su desempeño es importante para evitar daños durante el evento sísmico. Asimismo, la energía disipada por el movimiento (cinética) y deformación (potencial) de la estructura se ve disminuida, por lo que se puede afirmar que la edificación presenta un buen comportamiento.



(a)



(b)



(c)

Figura 23. Gráfico de Energía. (a) Registro sismo 66 .(b) Registro sismo 70 .(c) Registro sismo 74

- Energía ingresada en el sistema
- Energía disipada por el amortiguamiento inherente
- Energía potencial
- Energía cinética
- Energía disipada por el amortiguamiento añadido

La figura 23 muestra el mayor ingreso de energía cinética entre los segundos 20 y 30, tal y como se puede observar en el registro de aceleraciones del sismo de 1966 que tiene el mayor incremento de aceleraciones en estos segundos. Este mismo fenómeno se puede apreciar en los otros dos registros.

También se puede comparar la energía cinética en el registro del sismo de 1966 es menor a los otros registros, debido a que la duración de este sismo y el intervalo del incremento de las aceleraciones fue menor en comparación a los otros dos registros.

6.7.7 Curva de Histéresis

A partir de estos gráficos se identifica el comportamiento fuerza- desplazamiento del amortiguador. A diferencia con los disipadores lineales, estos no trabajan en fase con la estructura generando esfuerzos remanentes en la estructura.

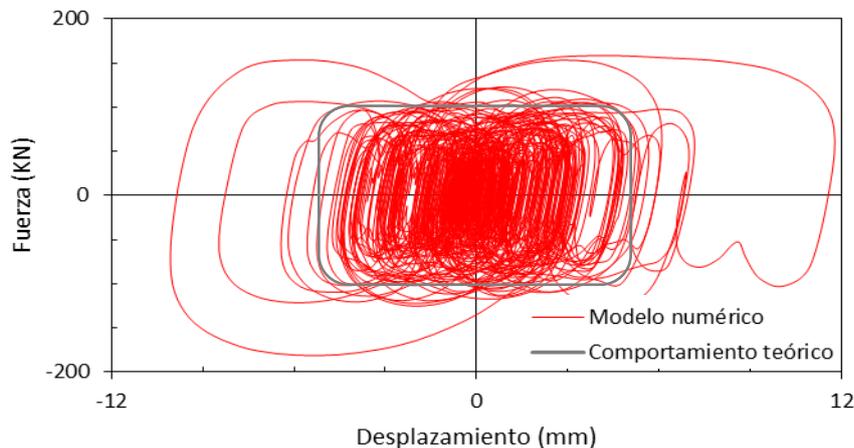


Figura 24. Curva de histéresis correspondiente a un disipador no lineal del primer nivel del análisis del sismo del 66

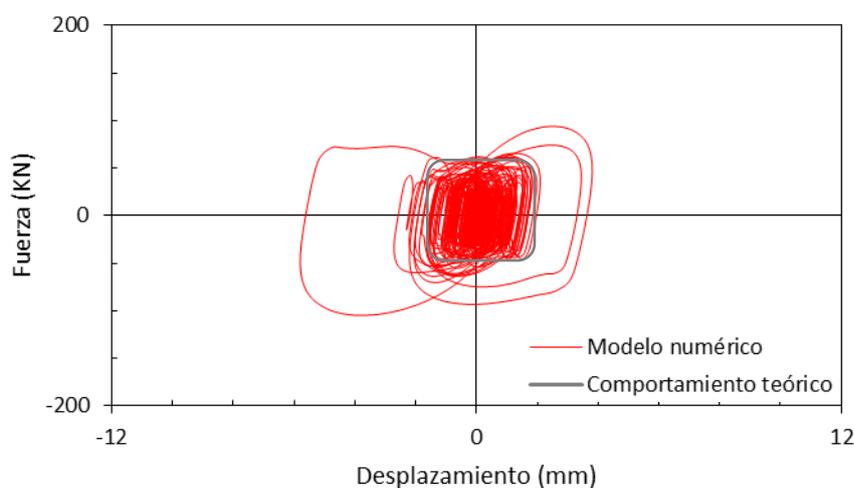


Figura 25. Curva de histéresis correspondiente a un disipador no lineal del cuarto nivel del análisis del sismo del 66

6.8 Análisis y Comparación de Resultados

En el siguiente acápite se comparan y analizan los desplazamientos de los diafragmas, derivas de entrepiso, la fuerza axial que desarrollan los disipadores y, la variación de la fuerza axial y momento flector de una columna característica. Se contrastan estos aspectos entre sistemas con disipadores lineales y no lineales.

6.8.1 Influencia en los desplazamientos de los diafragmas de la estructura.

La Tabla 21 muestra los desplazamientos de los diafragmas rígidos de cada entrepiso. Estos son los máximos desplazamientos obtenidos del análisis tiempo historia para los registros: 6610N08 (Sismo de Lima 1966); 7005M08 (Sismo de Ancash 1970) y el registro 7410N08 que pertenece al Sismo de Lima 1974. Asimismo, en la Figura 26 se comparan los resultados obtenidos para cada análisis.

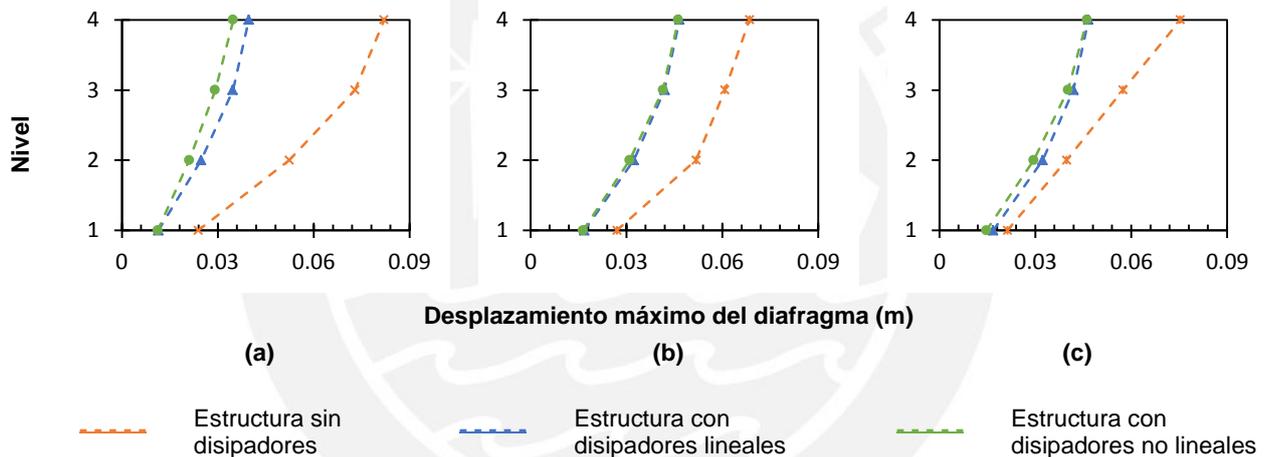


Figura 26. Desplazamiento máximo de los diafragmas para los sismos del año 66 (a), 70 (b) y 74 (c)

Tabla 21

Desplazamiento de los diafragmas de la estructura sometidos a registros sísmicos de aceleraciones

		Piso 1	Piso 2	Piso 3	Piso 4
Desplazamiento de la estructura sin disipadores (m)	S 66	0.0239	0.0524	0.0729	0.0820
	S 70	0.0270	0.0518	0.0608	0.0685
	S 74	0.0213	0.0398	0.0574	0.0754
Desplazamiento de la estructura con disipadores lineales (m)	S 66	0.0114	0.0248	0.0347	0.0397
	S 70	0.0168	0.0323	0.0419	0.0466
	S 74	0.0149	0.0298	0.0417	0.0491
Desplazamiento de la estructura con disipadores no lineales (m)	S 66	0.0112	0.0211	0.0292	0.0348
	S 70	0.0164	0.031	0.0414	0.0462
	S 74	0.0147	0.0295	0.0402	0.0462

Se observa que los disipadores no lineales producen una mayor reducción de los desplazamientos de la estructura, llegando a ser esta reducción hasta el 59.95% en el sismo de 1966 como se presenta en la Tabla 22

Tabla 22
Porcentaje de Reducción de los desplazamientos

		Piso 1	Piso2	Piso3	Piso4
Sistema con disipadores lineales	S66	52.30%	52.67%	52.40%	51.59%
	S70	37.78%	37.64%	31.09%	31.97%
	S74	30.05%	25.13%	27.35%	34.88%
	Max	52.30%	52.67%	52.40%	51.59%
Sistema con disipadores no lineales	S66	53.14%	59.73%	59.95%	57.56%
	S70	39.26%	40.15%	31.91%	32.55%
	S74	30.99%	25.88%	29.97%	38.73%
	Max	53.14%	59.73%	59.95%	57.56%

6.8.2 Influencia en las derivas de entrepiso de la estructura.

La Tabla 23 y Tabla 24 presentan el porcentaje de reducción de la deriva en cada escenario analizado.

Tabla 23
Porcentaje de Reducción de las derivas de entrepiso con disipadores lineales

	Porcentaje de Reducción		
	Sismo 66	Sismo 70	Sismo 74
Entrepiso 4	69.32%	70.23% [*]	59.99%
Entrepiso 3	48.34%	42.29%	45.25%
Entrepiso 2	52.98%	33.29%	27.79%
Entrepiso 1	52.46%	37.62%	30.02%

^{*} Reducción máxima

Tabla 24
Porcentaje de Reducción de la deriva de entrepiso con disipadores no lineales

	Porcentaje de Reducción		
	Sismo 66	Sismo 70	Sismo 74
Entrepiso 4	70%	73% [*]	64%
Entrepiso 3	45%	44%	48%
Entrepiso 2	56%	34%	28%
Entrepiso 1	53%	39%	31%

^{*} Reducción máxima

En la Figura 27 se aprecia la influencia que tienen los dispositivos en la reducción de los desplazamientos de entrepiso, lo que previene daños en la estructura.

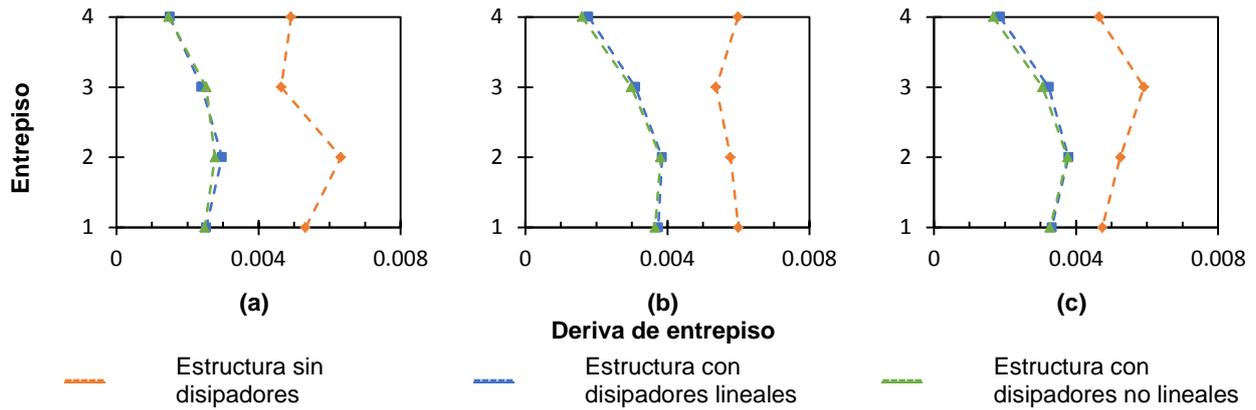


Figura 27. Comparación de derivas máximas obtenidas para los sismos de los años 66 (a), 70 (b) y 74 (c)

Se observa que ambos sistemas de disipación de energía cumplen con la deriva objetivo , por lo que se logran los estándares propuestos por las tablas de Hazus (Acápite 3.5). Además, los disipadores no Lineales tienen mayor eficiencia que los disipadores lineales y tienen para esta estructura, la capacidad de reducir la deriva hasta en 73%.

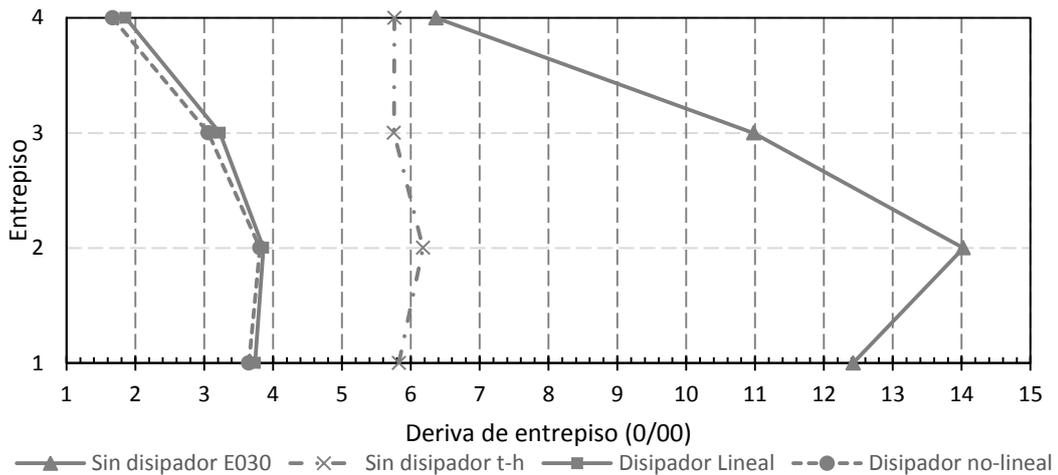


Figura 28. Análisis comparativo de derivas obtenidas de los diferentes métodos de análisis

La Figura 28 resume los resultados obtenidos de los diferentes tipos de análisis que se realizaron en la estructura. En esta gráfica se buscó incluir la respuesta de la estructura en todos los escenarios analizados por lo que fue necesario realizar un promedio de la respuesta para cada caso. Por ejemplo, la edificación sin disipadores fue sometida a un análisis tiempo-historia con tres registros diferentes. Las derivas máximas para cada uno de estos registros fue muy diferente (ver Figura 27). Es evidente que para los fines de este trabajo la máxima deriva es la más importante, sin embargo no es posible dejar de considerar el resto. Por el motivo expuesto se realizó un promedio ponderado en el que se dio mayor importancia a la máxima deriva. Se planteó la siguiente ecuación

$$D_i = \frac{\sum_{n=0}^{N-1} d_{i,n+1} \cdot p^{Nn}}{\sum_{n=0}^{N-1} p^{Nn}}$$

Dónde:

D_i es la deriva promedio del entrepiso i

- N es la cantidad de análisis que se consideran para el promedio
- d_i es la deriva del entrepiso i

Además

$$d_{i,1} < d_{i,2} < \dots < d_{i,N}$$

- $d_{i,1}$ es la menor deriva del entrepiso i (considerar el resultado de los N análisis a promediar)
- $d_{i,N}$ es la mayor deriva del entrepiso i (considerar el resultado de los N análisis a promediar)
- p es la relación entre la máxima deriva y la mínima (considerar el resultado de los N análisis a promediar)

$$p = \frac{\max \text{drift}}{\min \text{drift}}$$

6.8.3 Fuerza Axial en los disipadores.

En la Tabla 25 se observa la máxima fuerza que desarrollan los disipadores lineales.

Tabla 25
Fuerza desarrollada en los disipadores y fuerza de diseño escogida

Disipador	Disipadores lineales		Disipadores no lineales		
	Fuerza desarrollada (KN)	Fuerza de diseño (KN)	Fuerza desarrollada (KN)	Fuerza de diseño (KN)	
Piso 1	L5	225.82	250	172.65	250
	L7	260.84	250	181.38	250
	L13	225.82	250	172.65	250
	L15	260.84	250	181.38	250
Piso 2	L6	205.91	250	164.31	250
	L8	198.75	250	164.12	250
	L14	205.91	250	164.31	250
	L16	198.75	250	164.12	250
Piso 3	L5	176.97	250	151.56	250
	L7	147.34	250	137.04	250
	L13	176.97	250	151.56	250
	L15	147.34	250	137.04	250
Piso 4	L6	98.88	250	101.33	250
	L8	106.34	250	111.04	250
	L14	98.88	250	101.33	250
	L16	106.34	250	111.04	250

Los disipadores tienen mayor fuerza axial en comparación con los disipadores no lineales.

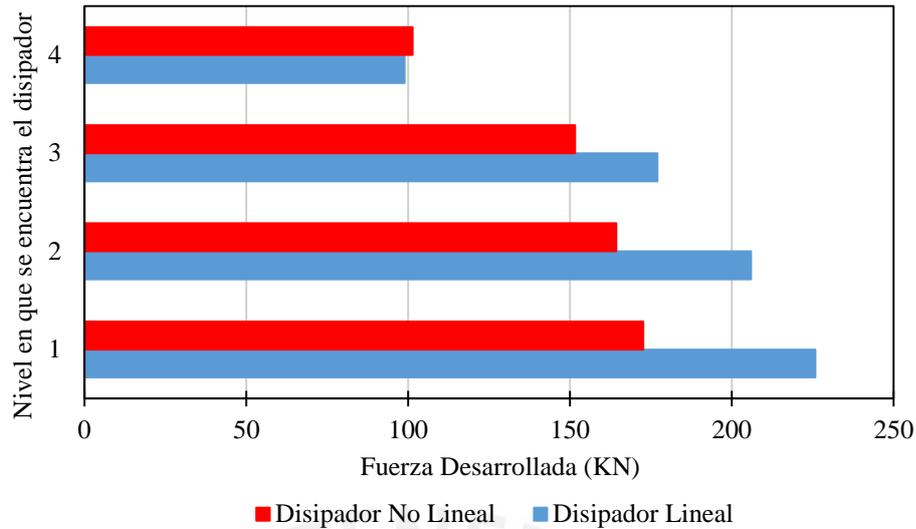


Figura 29. Fuerza desarrollada por el disipador L13-L14 con coeficientes $\alpha=1$ (lineal) y $\alpha=0.5$ (no lineal)

En la Figura 30 se presenta el promedio de las fuerzas desarrolladas por los disipadores en cada piso. Además se graficó la desviación estándar por piso. Nótese que en el caso de los disipadores lineales existe una mayor dispersión, no solo por piso (como es el caso del primero) sino también en toda la estructura. Se observa que la fuerza generada por los disipadores lineales varía desde los 100 KN (cuarto piso) hasta casi 250 KN (primer piso), mientras que los disipadores no lineales presentan valores entre 100 KN (cuarto piso) y 170 KN (primer piso).

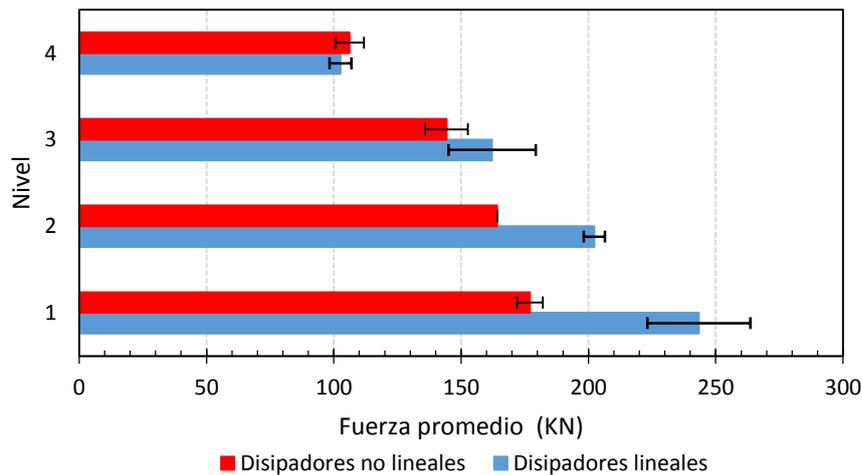


Figura 30. Fuerza promedio desarrollada por los disipadores en cada piso

6.9 Elección de amortiguadores considerados en el sistema de control sísmico.

Tras el análisis realizado previamente, se decide emplear disipadores no lineales con un exponente de 0.5 ya que tienen una mayor eficiencia. Las características de los disipadores son las siguientes:

Tabla 26
Características de los disipadores escogidos

Número de disipadores	16
Coefficiente de amortiguamiento C (ton-s/m)	100
Coefficiente de no linealidad (α)	0.5
Fuerza Axial (KN)	250

Estas características se deben indicar a los fabricantes de estos dispositivos como por ejemplo Taylor Devices. Inc. Usando los dispositivos de la Taylor Devices, se necesitará un amortiguador que pueda soportar una fuerza axial de 250 KN lo que es equivalente a 56.2Kip. En el anexo 1 se encuentran las especificaciones técnicas del disipador que se emplea. Las características del fuste correspondientes al disipador se encuentran en el anexo 2 usando un perfil Hss 7.5x0.500.

6.9 Verificación de la capacidad de los fustes de los disipadores.

En la Tabla 27 se resumen las propiedades de los fustes escogidos.

Tabla 27
Propiedades del fuste de los amortiguadores

Propiedad	Símbolo	Valor	Unidades
Longitud	L	295.28	tn/m ²
Módulo de Elasticidad	E	29000	Ksi
Área del perfil metálico	A	11	In ²
Radio del perfil metálico	r	2.48	In
Esfuerzo de fluencia	f _y	35	Ksi
Resistencia en tensión	f _u	50	Ksi

$$F_e = \frac{\pi^2 * E}{\left(\frac{L}{r}\right)^2} = \frac{\pi^2 * 29000}{\left(\frac{295.28}{2.48}\right)^2} = 20.19 \text{ ksi}$$

$$F_{cr} = \left(0.658^{\frac{F_y}{F_e}}\right) * F_y = \left(0.658^{\frac{35}{20.19}}\right) * 35 = 16.94 \text{ ksi}$$

$$\phi * P_n = \phi * F_{cr} * A = 0.9 * 16.94 * 11 = 167.71 \text{ ksi} = 76.07 \text{ Ton} > \mathbf{25.5 \text{ Ton}} \quad \text{OK}$$

$$\phi * T_n = \phi * F_y * A = 0.9 * 35 * 11 = 346.5 \text{ ksi} = 157.16 \text{ Ton} > \mathbf{25.5 \text{ Ton}} \quad \text{OK}$$

Se observa que, los fustes de los disipadores cumplen con la resistencia requerida por esfuerzos admisibles.

Capítulo VII

Conclusiones

Con la información obtenida del análisis y elección de los dispositivos de amortiguamiento se llegó a las siguientes conclusiones:

- La comprobación del amortiguamiento efectivo de la estructura se puede realizar empleando el concepto de decremento logarítmico, el cual se logra sometiendo a la estructura a un pulso.
- Los disipadores no lineales son más eficientes que los disipadores lineales. Los disipadores no lineales pueden cumplir los mismos objetivos de diseño con valores menores del coeficiente de amortiguamiento;
- Los disipadores lineales tienen una curva histerética casi elíptica, mientras que los disipadores no lineales tienen una tendencia rectangular, disminuyendo la fuerza desarrollada pero aumentando su capacidad de deformación;
- Se pudo reducir los desplazamientos de la estructura hasta en 52.67% haciendo uso de disipadores lineales y 59.73% haciendo uso de disipadores no lineales;
- Se pudo reducir las derivas de entrepiso en 70.23% haciendo uso de disipadores Lineales y 73% haciendo uso de disipadores no lineales;
- Se obtuvo una deriva máxima de 4 0/00 usando disipadores no lineales, con lo cual se cumplió la deriva objetivo y así se aseguró un desempeño óptimo de la estructura;
- Los disipadores lineales desarrollan una fuerza axial mayor en comparación de los disipadores no lineales;
- Los sistemas de disipación con amortiguadores lineales presentan una mayor dispersión en la fuerza axial del disipador en comparación a los disipadores no lineales.
- Se escogieron 16 disipadores de fluido viscoso con un coeficiente de amortiguamiento $C=100$ Ton-Seg/mm y una fuerza axial de 25 Ton con un exponente no lineal $\alpha=0.5$.

Capítulo VIII

Bibliografía

[1] AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (ACI)

2005 *Building code Requirements for Structural Concrete and Commentary*. Farmington Hills, Michigan

[2] AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS (ASCE)

2010 *Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures*. Reston, Virginia

[3] BOZA, Zuen, Danny GALAN

2013 *Diseño de un Edificio Aporticado con Disipadores en Arreglo Chevron*. Tesis para optar el título de Ingeniero Civil. Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú, Facultad de Ciencias e Ingeniería.

[4] FEDERAL EMERGENCY MANAGEMENT AGENCY (FEMA) 273/274

1997 *NEHRP guidelines for the seismic rehabilitation of buildings*. Report No 273/274, Building Seismic Safety Council, Washington, D.C.

[5] GUEVARA, Diego y Percy TORRES

2012 *Diseño de un Edificio Aporticado con Amortiguadores de Fluido-Viscoso en Disposición Diagonal*. Tesis para optar el título de Ingeniero Civil. Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú, Facultad de Ciencias e Ingeniería.

[6] JENN-SHIN, Hwang

“Seismic Design of Structures with Viscous Dampers” *International Training Programs for Seismic Design of Building Structures*

[7] MORALES, Luisa, Juan CONTRERAS

2012 *Protección de una Edificación existente con Disipadores de Energía*. Tesis para optar el título de Ingeniero Civil. Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú, Facultad de Ciencias e Ingeniería.

[8] OVIEDO, Ricardo

2008 *Dispositivos pasivos de Disipación de Energía para Diseño Sismorresistente de Estructuras*. Tesis de Maestría en Ciencias con mención en Ingeniería Estructural. Lima: Universidad Nacional de Ingeniería, Facultad de Ingeniería Civil.

[9] REGLAMENTO NACIONAL DE CONSTRUCCIONES

2006 *Norma Técnica Peruana de Edificación E.020/E.030*, Lima.

[10] STRUCTURAL ENGINEERS ASSOCIATION OF CALIFORNIA (SEAOC)

1995 *Performance-based Seismic Engineering of Buildings. Vision 2000 Report*. Sacramento, California.

[11] SYMANS, CHARNEY, WHITTAKER, y otros.

2008 “Energy Dissipation Systems for Seismic Applications: Current Practice and Recent Developments” *Journal of Structural Engineering*. 2008

[12] US ARMY CORPS OF ENGINEERS

1998 *Technical Instructions. Seismic Design for Buildings*. Washington, D.C.

[13] TAYLOR DEVICES INC

2013 Consulta en página web. www.taylordevices.com