

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DEL PERU

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERIA



PONTIFICIA
**UNIVERSIDAD
CATÓLICA**
DEL PERÚ

**DISEÑO DE UN EDIFICIO APORTICADO CON DISIPADORES
EN ARREGLO CHEVRON**

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

Zuen Estefania Boza Farfán

Danny Jean Galán Tirapo

ASESOR: Alejandro Muñoz Peláez

Lima, Abril del 2013

RESUMEN

Durante terremotos severos, las estructuras pueden sufrir daños debido a las incursiones inelásticas que experimentan. Hoy en día existen en el mercado sistemas de aislamiento y disipación de energía que se instalan en los edificios con el fin de reducir el daño. Los sistemas de disipación de energía liberan la energía sísmica de entrada en forma de amortiguamiento, mientras que los sistemas de aislamiento sísmico permiten reducir la energía sísmica de entrada.

En nuestro país se vienen desarrollando proyectos de edificios nuevos con aislamiento y disipadores de energía, lo cual de alguna manera ha motivado el presente estudio.

En este trabajo se desarrolló el diseño del sistema de disipación de energía para un edificio aporticado de 7 pisos que tiene una deriva de entrepiso cercana al 1%, bajo las solicitaciones de la Norma Peruana de Diseño Sismorresistente.

Se definió como objetivo de desempeño lograr que el edificio se comporte con daño moderado ante un sismo de 500 años de periodo de retorno. Para el sistema de pórticos empleado, la deriva asociada a este nivel de daño es cercana a 0.55%. El diseño del sistema de disipación se orientó a lograr que la deriva se mantuviera por debajo de este valor.

Se estudiaron alternativas de arreglo Chevron para amortiguadores lineales y no lineales. La mejor alternativa consistió en 56 disipadores no lineales, dispuestos en todos los pisos.

Con la solución obtenida se logró un amortiguamiento equivalente de 24 % y se logró reducir la deriva a 0.56%. Las fuerzas desarrolladas en los disipadores fueron del orden de las 50ton.

Los resultados del presente trabajo indican que el sistema diseñado permitirá reducir la deriva en un 40%, y que el daño se mantendría, en teoría, por debajo del umbral de moderado frente a sismos raros (500 años de período de retorno).

Es necesario que la actual Norma Peruana de Diseño Sismorresistente incluya un capítulo para el diseño los sistemas modernos de protección sísmica.

TEMA DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

Título : "Diseño de un edificio aporticado con disipadores en arreglo Chevron".
Área : Estructuras
Asesores : Ing. Alejandro Muñoz P.
Ing. Marcos Tinman B.
Alumno : DANNY JEAN GALÁN TIRAPO
Código : 2005.0464.0.412
Alumna : ZUEN ESTEFANIA BOZA FARFÁN
Código : 2005.0323.7.412
Tema N° : 270
Fecha : Lima, 9 de setiembre de 2011



16/09/11

INTRODUCCIÓN

Los sistemas de disipación de energía constituyen una alternativa para reducir las demandas sísmicas sobre las edificaciones. En los edificios aporticados estos dispositivos suelen ser muy efectivos para el control de la deriva y la reducción de las sollicitaciones internas en los elementos. En el mercado local ya se encuentran disponibles dispositivos de amortiguamiento y es de esperar que paulatinamente se vayan incorporando en el proyecto de nuevas edificaciones.

OBJETIVOS Y ALCANCES

El objetivo de este trabajo es el diseño del sistema de disipación de energía para un edificio regular aporticado de 7 pisos con planta rectangular.

Para el diseño se usará un edificio que presente una deriva de 1% bajo las sollicitaciones sísmicas establecidas por las Normas Peruanas. El diseño del sistema de disipación se orientará a lograr un daño moderado en un terremoto de 500 años de periodo de retorno. Se diseñará completamente el sistema de disipación de energía y algunos elementos estructurales. Se empleará una disposición en Chevron.

Como resultado del trabajo se presentará un resumen del procedimiento empleado, junto al diseño de los disipadores y los elementos de concreto armado más representativos.



METODOLOGÍA

El trabajo se iniciará revisando la información disponible respecto a los procedimientos de diseño. Se seleccionará un edificio ideal de pórticos que bajo las solicitaciones de la actual Norma Peruana tenga una deriva de 1%. Se procederá a diseñar el sistema de disipación empleando arreglos Chevron y luego se diseñarán los principales elementos estructurales. Finalmente se preparará el reporte y los planos.

Los alumnos elaborarán un borrador de artículo con no más de 12 hojas con fines de publicación.

V°B° *ASB*
.....
Ing. Ángel San Bartolomé
Coordinador de Investigación



NOTA

Extensión máxima: 100 páginas





A Dios; a mi madre, Sonia, por estar siempre cuando la necesito y por tener siempre las palabras adecuadas para llegar a mí.

A mi padre, Heraclio, por su gran fuerza de voluntad y por enseñarme a gustar de nuestra carrera Ing. Civil con su ejemplo y sacrificios.

A mis queridos hermanos Andrea, Tony, Valeria y Marcela, por alentarme y darme alegría en los momentos más difíciles.

A mi gran amiga Ysbel por su ejemplo de valor y alegría frente a la adversidad.

Zuen Boza F.



A Dios, por permitirme llegar hasta este momento tan importante de mi formación profesional

A mi madre, Rosa, por haberme apoyado en todo momento, por sus consejos y valores pero sobre todo por su amor incondicional de madre.

A mi padre, Juan, por los ejemplos de constancia y esfuerzo que lo caracterizan y que han guiado mi educación, tanto académica, como de la vida.

A mi abuelo Manuel, a quien siempre llevo en mi corazón, gracias por tus enseñanzas.

A mis hermanos, Dean Paul y Jesse, por estar siempre conmigo.

Y a Fiorella, por su gran amor y apoyo que me motiva a seguir adelante.

Danny Galán T.

Agradecimientos

Un agradecimiento muy especial a nuestro asesor Ing. Alejandro Muñoz, por su apoyo, preocupación y paciencia a lo largo del desarrollo de esta tesis.

A nuestros jurados Ing. Gianfranco Ottazzi e Ing. Marcos Tinman, por las revisiones de cada capítulo. Sus sugerencias han hecho que este trabajo sea más claro y concreto.

Por último, a nuestros amigos Diego Guevara y Percy Torres, por todo el apoyo que nos brindaron de forma desinteresada.



INDICE

CAPITULO 1. INTRODUCCION	1
1.1. Objetivos y metodología del trabajo.	1
1.2. Organización del documento.	1
CAPITULO 2. SISTEMAS DE PROTECCION SISMICA	3
2.1. Estrategia clásica de diseño Sismorresistente.	3
2.2. Balance de energía.	4
2.3. Posibilidades actuales de los sistemas de protección.	4
2.3.1. Sistemas pasivos.	5
2.3.2. Sistemas activos.	7
2.3.3. Sistemas híbridos.	7
2.3.4. Sistemas semi - activos.	8
2.4. Tipos de disipadores de energía.	9
2.4.1. Disipadores de energía histeréticos.	9
2.4.2. Disipadores de energía viscoelásticos.	10
2.4.3. Amortiguamiento y reducción de la respuesta sísmica.	11
2.5. Disipadores fluido - viscosos.	11
2.5.1. Componentes de un disipador fluido - viscoso.	11
2.5.2. Modelo mecánico del disipador.	12
2.5.3. Comportamiento histerético.	13
2.5.4. Amortiguamiento efectivo equivalente.	14
2.5.5. Disposiciones típicas: Chevron y Diagonal.	16
CAPITULO 3. DERIVA Y DESEMPEÑO SISMORRESISTENTE DE EDIFICACIONES	17
3.1. Objetivos del Desempeño Sismorresistente de edificaciones.	17
3.1.1. Niveles de amenaza sísmica.	17
3.1.2. Niveles de desempeño.	18
3.1.3. Importancia de la edificación.	19
3.1.4. Objetivos múltiples de desempeño.	19
3.2. Deriva y daño estructural.	21
3.2.1. Relación deriva – daño.	21
3.2.2. Factores que influyen en la relación deriva - daño.	21
3.2.3. Propuesta del Hazus para la relación deriva - daño.	22

CAPITULO 4. METODOLOGIA DE DISEÑO PARA SISTEMAS DE DISIPACION DE ENERGIA	23
4.1. Análisis sísmico de la estructura sin sistemas de disipación de energía.	23
4.2. Elección del desempeño.	24
4.3. Definición de los objetivos de diseño.	24
4.4. Generación de alternativas.	24
4.4.1. Ubicación de dispositivos en el sistema estructural.	24
4.4.2. Propiedades de los disipadores.	25
4.5. Evaluación de la respuesta de cada alternativa.	25
4.6. Elección de la mejor alternativa.	25
4.7. Diseño de los dispositivos de amortiguamiento.	25
4.8. Síntesis de la metodología.	26
CAPITULO 5. EJEMPLO DE APLICACIÓN	27
5.1. Descripción de la estructura y objetivos de desempeño.	27
5.2. Análisis sísmico de la estructura sin sistema de disipación de energía.	28
5.2.1. Parámetros sísmicos.	29
5.2.2. Análisis por combinación espectral.	30
5.2.3. Análisis tiempo - historia.	32
5.3. Elección del objetivo de desempeño.	34
5.4. Definición de los objetivos de diseño.	34
5.5. Ubicación de los dispositivos de amortiguamiento.	35
5.6. Estimación de los parámetros del sistema de amortiguamiento.	36
5.7. Respuesta de la estructura con sistemas de amortiguamiento.	40
5.7.1. Amortiguadores lineales.	40
5.7.2. Amortiguadores no lineales.	45
5.8. Evaluación de resultados.	49
5.9. Propuesta diseño final.	58
5.10. Diseño de los dispositivos de amortiguamiento.	60
5.11. Diseño del brazo metálico.	61
CAPITULO 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	63
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Enfoque estructural clásico.	3
Figura 2.2: Clasificación de los sistemas modernos de protección sísmica.	4
Figura 2.3: Comportamiento de una estructura con aislamiento sísmico.	5
Figura 2.4: Técnicas de control pasivo con disipadores de energía.	5
Figura 2.5: Esquema de amortiguamiento de un Tuned Mass Damping.	6
Figura 2.6: Estructura con sistema de control activo.	7
Figura 2.7: Estructura con sistema de control híbrido.	8
Figura 2.8: Estructura con sistema de control semi – activo.	8
Figura 2.9: Clasificación de los sistemas de disipación de energía.	9
Figura 2.10: Dispositivo histerético metálico tipo ADAS.	9
Figura 2.11: Dispositivo viscoelástico sólido.	10
Figura 2.12: Partes de un disipador fluido – viscoso.	11
Figura 2.13: Disipador en disposición Chevron.	12
Figura 2.14: Esquema de un disipador fluido viscoso y Diagrama de Maxwell.	12
Figura 2.15: Relaciones fuerza – velocidad de disipadores de viscosos.	13
Figura 2.16: Relación fuerza – desplazamiento del amortiguador fluido viscoso.	14
Figura 3.1: Curva de capacidad sectorizada propuesta por el SEAOC.	19
Figura 3.2: Curvas de fragilidad para cuatro niveles de daño.	21
Figura 5.1: Planta típica y corte A – A de la edificación.	27
Figura 5.2: Modelo estructural.	28
Figura 5.3: Registros sísmicos.	33
Figura 5.4: Ubicación de disipadores en disposición Chevron.	35
Figura 5.5: Ubicación de los disipadores en los pórticos A y G, dirección x.	36
Figura 5.6: Ubicación de los disipadores en los pórticos 1 y 5, dirección y.	36
Figura 5.7: Curva tiempo vs desplazamiento para amortiguadores lineales con $\alpha = 1.00$	41
Figura 5.8: Gráficos de energía para amortiguadores lineales con $\alpha = 1.00$	43
Figura 5.9: Curvas de histéresis para amortiguadores lineales con $\alpha = 1.00$	44
Figura 5.10: Curva tiempo vs desplazamiento para amortiguadores no lineales con $\alpha = 0.50$	46
Figura 5.11: Gráficos de energía para amortiguadores no lineales con $\alpha = 0.50$	47
Figura 5.12: Curvas de histéresis para amortiguadores no lineales con $\alpha = 0.50$	48
Figura 5.13: Curvas de fuerza vs velocidad.	54
Figura 5.14: Ubicación de los disipadores en los pórticos A y G, dirección x.	58
Figura 5.15: Ubicación de los disipadores en los pórticos 1 y 5, dirección y.	58

LISTA DE TABLAS

Tabla 2.1:	Valores del parámetro lambda.	16
Tabla 3.1:	Niveles de amenaza sísmica según la propuesta del SEAOC.	17
Tabla 3.2:	Niveles de desempeño según la propuesta del SEAOC.	18
Tabla 3.3:	Matriz de desempeño.	20
Tabla 3.4:	Desempeño esperado para edificios comunes en la costa peruana.	20
Tabla 3.5:	Desempeño y derivas objetivo para edificios tipo CM1.	22
Tabla 5.1:	Metrado de cargas muertas.	30
Tabla 5.2:	Metrado de cargas vivas.	30
Tabla 5.3:	Peso de la edificación.	30
Tabla 5.4:	Parámetros Sísmicos.	31
Tabla 5.5:	Derivas máximas del análisis espectral (%).	32
Tabla 5.6:	Descripción de los sismos de diseño.	32
Tabla 5.7:	Derivas máximas del análisis tiempo – historia (‰) en la dirección x.	33
Tabla 5.8:	Derivas máximas del análisis tiempo – historia (‰) en la dirección y.	34
Tabla 5.9:	Amortiguamiento efectivo y viscoso requerido en la dirección x.	35
Tabla 5.10:	Amortiguamiento efectivo y viscoso requerido en la dirección y.	35
Tabla 5.11:	Propiedades del perfil metálico.	36
Tabla 5.12:	Coeficiente de amortiguamiento del disipador en función de α	37
Tabla 5.13:	Derivas (‰) en la dirección x para amortiguadores lineales con $\alpha = 1.00$. ..	40
Tabla 5.14:	Derivas (‰) en la dirección y para amortiguadores lineales con $\alpha = 1.00$. ..	40
Tabla 5.15:	Derivas (‰) en la dirección x para amortiguadores no lineales con $\alpha = 0.50$. 45	45
Tabla 5.16:	Derivas (‰) en la dirección y para amortiguadores no lineales con $\alpha = 0.50$. 45	45
Tabla 5.17:	Porcentaje de reducción de derivas en la dirección x para el sismo de 1974. 49	49
Tabla 5.18:	Porcentaje de reducción de derivas en la dirección y para el sismo de 1974. 49	49
Tabla 5.19:	Fuerzas de diseño para los disipadores en la dirección x.	59
Tabla 5.20:	Fuerzas de diseño para los disipadores en la dirección y.	59
Tabla 5.21:	Propiedades de los dispositivos y dimensiones de la placa base.	60
Tabla 5.22:	Propiedades del dispositivo de amortiguación.	61
Tabla 5.23:	Características de la placa base.	61
Tabla 5.24:	Propiedades geométricas del perfil HSS 7.50 x 0.375.	61

CAPITULO 1 INTRODUCCION

Los sistemas de disipación de energía se vienen usando desde hace aproximadamente cincuenta años en diversas aplicaciones en la industria militar y pesada. En 1990 se empezaron a comercializar gracias al esfuerzo del US Multi-disciplinary Center (Douglas P. Taylor. *Seismic Dampers for the Torre Mayor Project*), siendo la Torre Mayor en la ciudad de México uno de los primeros edificios en ser construido con disipadores fluidoviscosos en Latinoamérica; dicho edificio ha tenido un comportamiento satisfactorio frente a varios eventos sísmicos a lo largo de su vida útil, siendo el más significativo el terremoto del 21 de Enero del 2003 con una magnitud de 7.6.

Actualmente se vienen usando los Disipadores Fluido Viscosos (DFV) en muchos países tales como Japón, Taiwan, China, entre otros y la historia de su uso prueba la capacidad de estos sistemas de reducir la demanda sísmica sobre las diferentes edificaciones.

En los edificios aporticados estos dispositivos suelen ser muy efectivos para el control de la deriva y la reducción de las solicitaciones internas en los elementos estructurales. En el mercado local ya se encuentran disponibles dispositivos de amortiguamiento y es de esperar que paulatinamente se vayan incorporando en el proyecto de nuevas edificaciones.

1.1. Objetivos y Metodología

El objetivo de este trabajo es el diseño del sistema de disipación de energía para un edificio de concreto armado aporticado y regular de 7 pisos con planta rectangular.

Para el diseño se usó un edificio que presentó una deriva de aproximadamente 1% bajo las solicitaciones sísmicas establecidas por las Normas Peruanas. El diseño del sistema de disipación se orientó a lograr un daño moderado en un terremoto de 500 años de período de retorno. Se diseñó completamente el sistema de disipación de energía empleando una disposición en Chevron.

El trabajo se inició revisando la información disponible respecto a los procedimientos de diseño. Se seleccionó un edificio ideal de pórticos que bajo las solicitaciones de la actual Norma Peruana tenga una deriva de aproximadamente 1%. Se procedió a diseñar el sistema de disipación empleando arreglos Chevron y finalmente se preparó el presente documento.

1.2. Organización del Documento

La clasificación y descripción de los sistemas modernos de protección sísmica se muestran en el capítulo dos.

El capítulo tres resume la propuesta del Seismology Committee Structural Engineers Association of California - SEAOC en su libro *Recommended Lateral Force Requirements and Commentary* para calificar el desempeño sismorresistente de edificaciones y relaciona los conceptos de deriva y daño estructural siguiendo la propuesta del documento *Multihazard Loss Estimation Methodology* - HAZUS.

El capítulo cuatro describe la metodología de diseño para los sistemas de protección sísmica.

El capítulo cinco describe el desempeño de un edificio aporticado de 7 pisos con una deriva máxima de 1% para el posterior diseño del sistema de disipación de energía siguiendo la metodología expuesta en el capítulo cuatro.

En el capítulo seis se presentan las conclusiones de este trabajo agrupadas respecto a: metodología, desempeño y daño, modelo analítico, resultados del diseño y posibilidades futuras.



CAPITULO 2

SISTEMAS DE PROTECCION SISMICA

2.1. Estrategia Clásica de Diseño Sismorresistente.

Las técnicas convencionales para controlar la respuesta de las estructuras consisten en la combinación de resistencia, rigidez y capacidad de disipación de energía en el rango inelástico, tomando como condición su ductilidad.

Estas técnicas convencionales requieren de una elevada inversión económica, además de, eventualmente, no satisfacer las demandas arquitectónicas.

Así mismo, presentan el inconveniente de que la estructura, por su mismo trabajo inelástico, sufre daños permanentes, la mayoría de ellos irreparables e imposibles de permitir en estructuras cuya funcionalidad es vital luego de ocurrido un sismo, tales como hospitales, estaciones de bomberos, centros educativos entre otros.

Es por ello que en las últimas décadas surgen nuevas técnicas para controlar la respuesta de la estructura, las cuales modifican sus características dinámicas ya sea controlando o disipando parte de la energía entregada por el sismo.

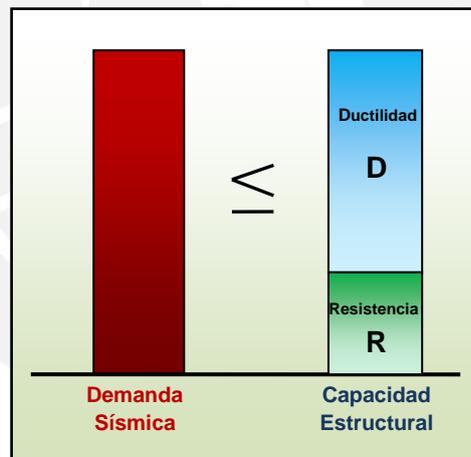
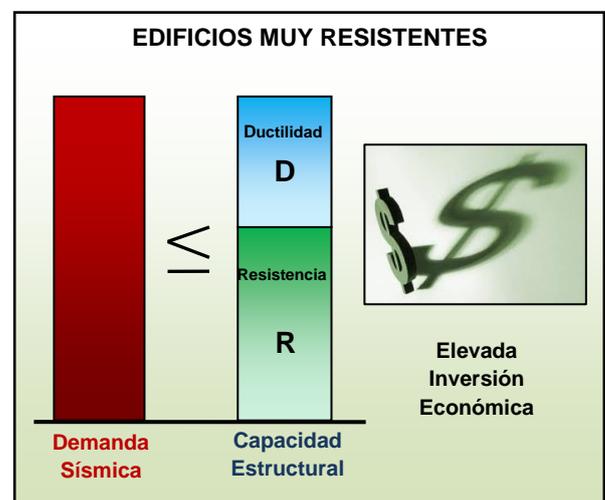
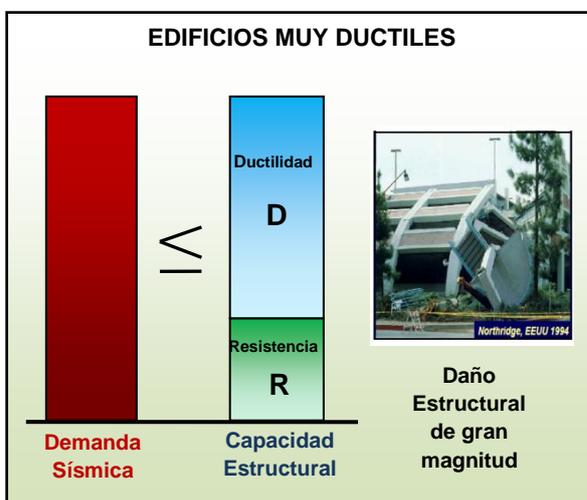


Figura 2.1. Enfoque estructural clásico



2.2. Balance de Energía.

La ecuación de energía absoluta (A. Muñoz. *Ingeniería Sismorresistente*) muestra:

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

Al lado derecho de la ecuación se encuentra la capacidad de la estructura y al lado izquierdo, la energía que demanda el sismo. Siendo $E_I(t)$, la energía de entrada; $E_k(t)$, la energía cinética; $E_D(t)$, la energía de amortiguamiento; $E_S(t)$, la energía elástica no disipada y $E_H(t)$, la energía de deformación plástica o histerética.

En el diseño sísmico convencional, la capacidad de la estructura se apoya en términos de deformaciones inelásticas transformando gran parte de la energía de entrada $E_I(t)$ en energía histerética $E_H(t)$. Para evitar dichas incursiones inelásticas se emplean amortiguadores, donde la capacidad de disipación de energía se da mediante la adición de energía de amortiguamiento $E_D(t)$, disminuyendo la participación de los componentes estructurales.

2.3. Posibilidades actuales de los sistemas de protección

En la actualidad existen diferentes sistemas de protección sísmica, los cuales poseen varias ventajas sobre los sistemas convencionales. Se encuentran desde simples dispositivos de control pasivo hasta complejos sistemas completamente activos; los más conocidos incluyen los sistemas de aislamiento sísmico y los sistemas de disipación de energía.

Los sistemas de protección sísmica pueden ser clasificados en cuatro grandes grupos: sistemas pasivos, activos, híbridos y semi-activos. La figura 2.2 resume esta clasificación:

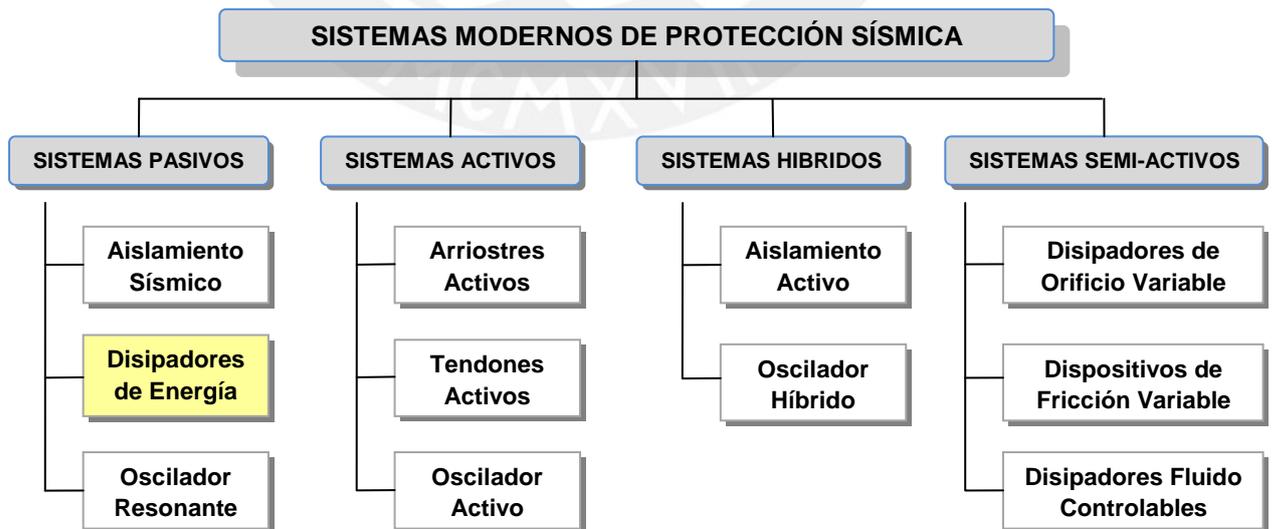


Figura 2.2. Clasificación de los sistemas modernos de protección sísmica

2.3.1. Sistemas Pasivos de Protección Sísmica.

Los sistemas de control pasivo se basan en dispositivos mecánicamente simples que responden de forma inercial a la acción sísmica y, a diferencia del resto de sistemas, son más económicos y no dependen de fuentes de energía para funcionar.

Estos sistemas se clasifican en sistemas de aislamiento sísmico, en disipadores de energía y en osciladores resonantes.

El *aislamiento sísmico* se basa en el hecho de que es posible separar la estructura de los movimientos del suelo mediante la incorporación de elementos flexibles entre la estructura y su cimentación, disminuyendo notablemente la energía de entrada E_I y por consiguiente su respuesta estructural.

Los aisladores incrementan los desplazamientos totales pero reducen las deformaciones de entrepiso, como se aprecia en la figura 2.3:

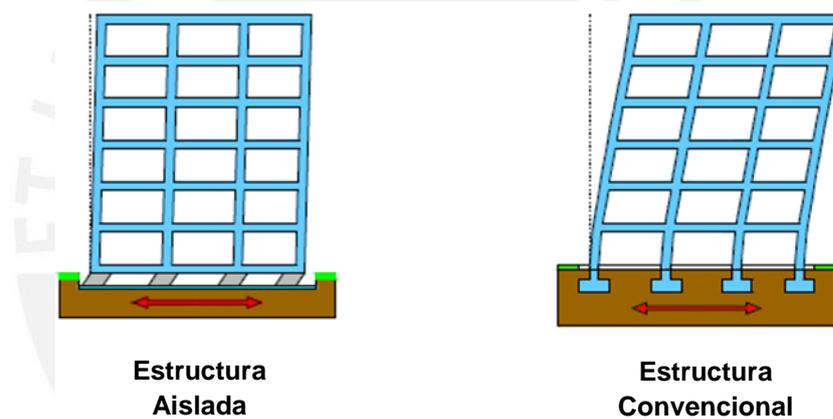


Figura 2.3. Comportamiento de una estructura con aislamiento sísmico.

Los *disipadores de energía*, por el contrario, no alteran la energía de entrada y manifiestan su eficiencia absorbiendo parte importante de la energía sísmica E_D evitando así que esta sea disipada por deformaciones inelásticas en los elementos estructurales. La figura 2.4 nos muestra la incorporación de los disipadores a la estructura:

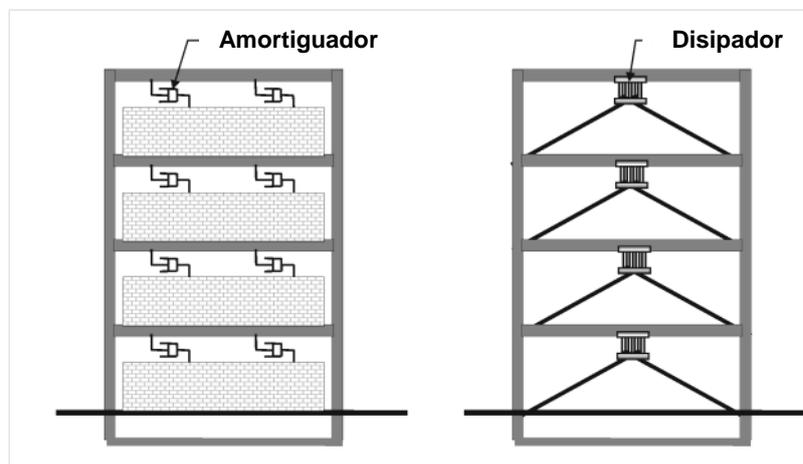


Figura 2.4. Técnicas de control pasivo con disipadores de energía.

Los disipadores presentan numerosas ventajas como:

- Reducen el nivel de daño de la estructura y concentran la energía en los dispositivos adicionales, elementos totalmente identificados y fáciles de reemplazar. En el caso de los disipadores fluido - viscosos no necesitarán ser reemplazados.
- Reducen las fuerzas cortantes, aceleraciones y derivas en cada nivel; por lo tanto, reducen los daños en elementos estructurales y no estructurales. En muchos casos las estructuras pueden permanecer elásticas.
- Pueden suplir exigencias estructurales en arquitecturas muy exigentes: permite espacios más grandes y limpios, implementación y uso de nuevos materiales para elementos no estructurales, confort y seguridad a los usuarios.
- Los disipadores de energía no solamente se han utilizado contra sismos, sino también para el control de vibraciones inducidas por viento y en aplicaciones militares.

Un *oscilador resonante* “Tuned Mass Damper – TMD”, introduce a la edificación, generalmente en la parte superior, un sistema de un grado de libertad formado por una masa, un elemento restitutivo y un mecanismo de amortiguamiento. Para que el TMD reduzca la respuesta dinámica su frecuencia de oscilación debe ser la misma que la frecuencia fundamental de la estructura.

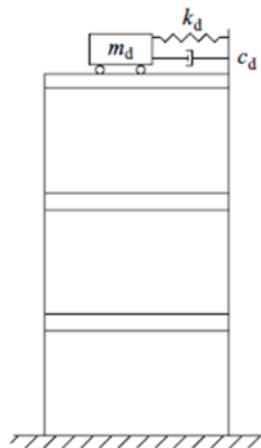


Figura 2.5. Esquema de amortiguamiento de un Tuned Mass Damper - TMD.

En nuestro país, la aplicación de los sistemas de protección sísmica está enfocada principalmente al aislamiento sísmico y los disipadores de energía fluido-viscosos. Esto se debe principalmente a que dichos sistemas son compatibles con la configuración estructural de las edificaciones peruanas además de ser económicos.

2.3.2. Sistemas Activos de Protección Sísmica.

Los sistemas activos contrarrestan directamente los efectos de sismo mediante fuerzas aplicadas por actuadores integrados a un grupo de sensores, controladores y procesadores de información en tiempo real.

Los sensores instalados miden las excitaciones externas y la respuesta dinámica de la estructura; por su parte, los dispositivos de procesamiento de información calculan las fuerzas de control necesarias para estabilizar la estructura la cual será generada por los actuadores con el fin de contrarrestar los movimientos sísmicos.

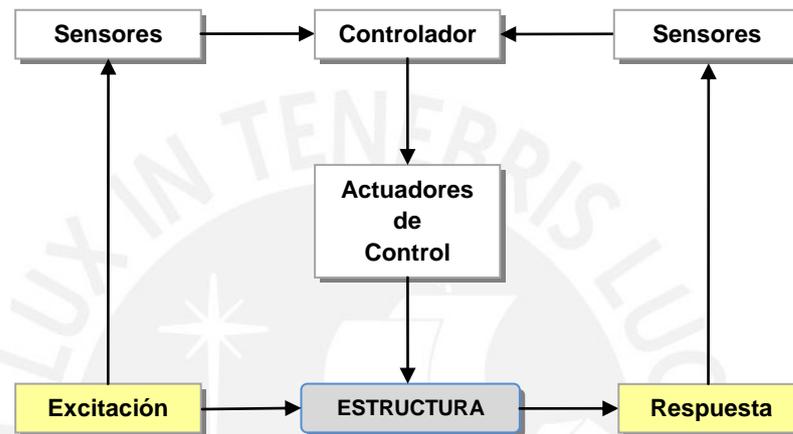


Figura 2.6. Estructura con sistema de control activo

La aplicación de las fuerzas de control se da mediante un oscilador de *masa activa*, “Active Mass Damper – AMD”, *arriostres* o *tendones activos*.

Los sistemas activos presentan una mayor efectividad en control de la respuesta estructural a comparación de los sistemas pasivos, pero presenta un elevado costo de mantenimiento y requiere de una gran fuente energética para lograr un desempeño adecuado frente a sismos fuertes.

2.3.3. Sistemas Híbridos de Protección Sísmica.

Los sistemas híbridos son la combinación de sistemas activos y pasivos con el fin de incrementar la eficiencia y confiabilidad del control estructural. Dado que el control se consigue a partir de un dispositivo pasivo (DPE), los sistemas híbridos presentan mejoras con relación a los sistemas activos: menor requerimiento de energía y, en caso de falla del componente activo, el sistema pasivo seguirá ejerciendo funciones de control aunque de forma menos efectiva.

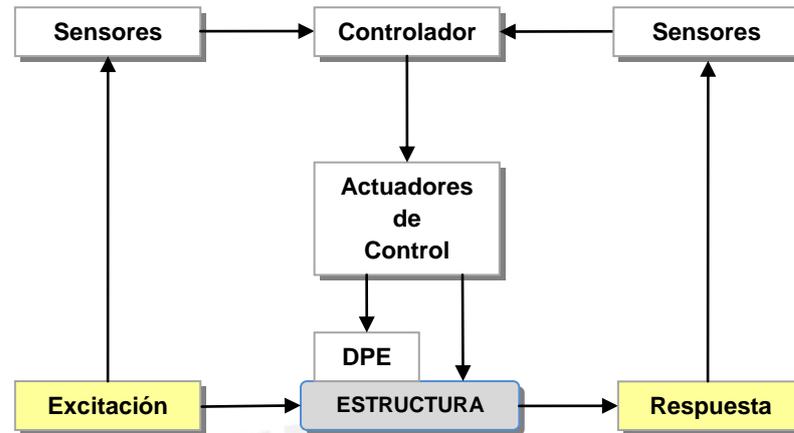


Figura 2.7. Estructura con sistema de control híbrido

Los sistemas de control híbrido se enfocan principalmente en dos tipos: *osciladores híbridos* “Hybrid Mass Damper - HMD”, y *aislamiento de base con control activo del desplazamiento*. Los HMD son el resultado de la combinación de un oscilador resonante (TMD) y un actuador activo, lo cual mejora la eficiencia del sistema.

2.3.4. Sistemas Semi - Activos de Protección Sísmica.

Los sistemas semi - activos tienen un esquema de funcionamiento similar a los sistemas activos, con la diferencia que no aplican fuerzas de control en el sistema estructural, pero poseen distintas propiedades que pueden ser controladas a tiempo real mediante actuadores para reducir la respuesta del sistema estructural con costos energéticos reducidos.

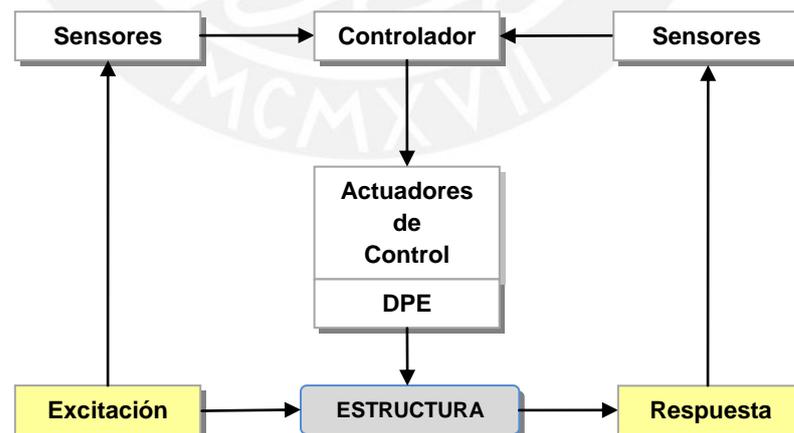


Figura 2.8. Estructura con sistema de control semi-activo

Entre las técnicas de control empleadas tenemos: la fricción variable, la incorporación de dispositivos hidráulicos de rigidez o amortiguamiento variable, amortiguadores con fluidos de viscosidad controlable a partir de campos eléctricos o magnéticos.

2.4. Tipos de Disipadores de Energía.

Los sistemas pasivos de disipación de energía se componen de los dispositivos que liberan energía y de los elementos de fijación de estos al sistema estructural. Se pueden clasificar en dispositivos **histeréticos** y **viscoelásticos**.

En la figura 2.9 se puede apreciar la subdivisión de los sistemas de disipación de energía.

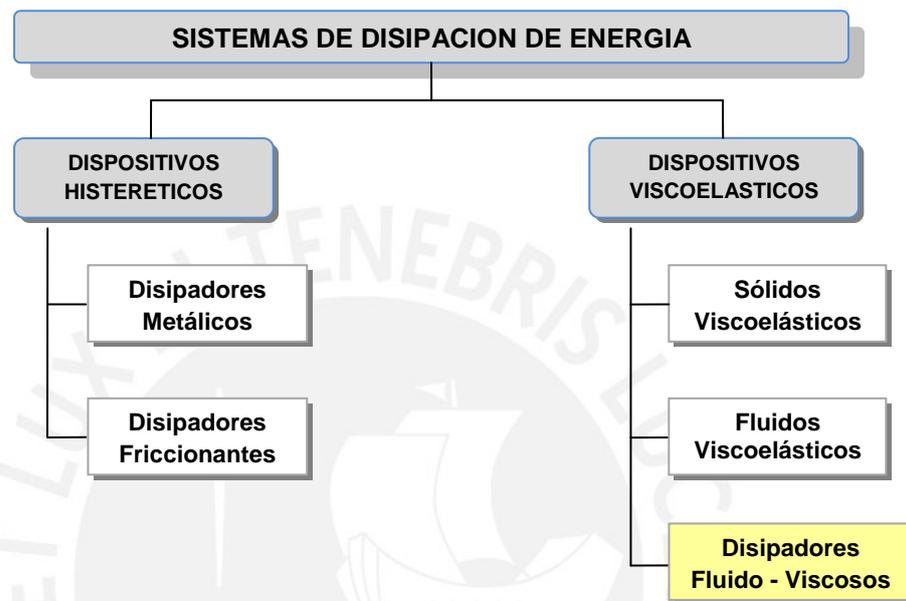


Figura 2.9. Clasificación de los sistemas de disipación de energía

2.4.1. Disipadores de energía histeréticos.

Los dispositivos histeréticos dependen básicamente de los desplazamientos de la estructura.

Los *disipadores metálicos* se basan en la fluencia de los metales a partir de esfuerzos de flexión, corte, torsión o a través del proceso de extrusión.

El acero ha sido sin duda el metal más empleado en esta clase de disipadores. Entre sus virtudes están las posibilidades constructivas que ofrece, debido a que es de fácil mecanizado y soldabilidad; además, tiene un bajo costo y elevada ductilidad. Entre los más usados tenemos el denominado dispositivo ADAS.

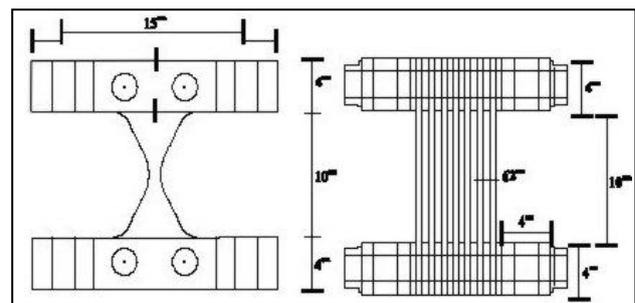
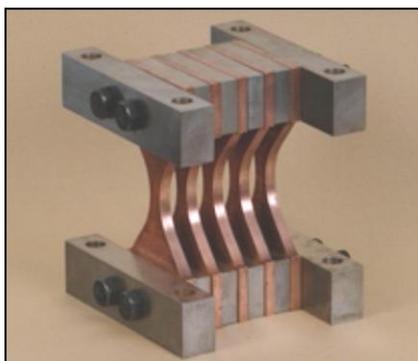


Figura 2.10. Dispositivo histerético metálico Tipo ADAS

Los *disipadores friccionantes* disipan energía mediante el rozamiento que se presenta por el desplazamiento relativo entre dos superficies en contacto. Su principal inconveniente radica en el coeficiente de fricción, el cual depende de la velocidad, la presión entre las superficies y las condiciones de las mismas.

Si la estructura permanece en rango elástico, la variación del coeficiente de fricción no afecta significativamente a la respuesta estructural, pero dicha respuesta llega a ser significativa si esta entra en rango no lineal.

2.4.2. Disipadores de energía viscoelásticos.

Los dispositivos viscoelásticos dependen básicamente de la velocidad relativa entre dos puntos de la estructura y se basan en el incremento del amortiguamiento estructural. Su incursión ante solicitaciones sísmicas es reciente, dado que han sido empleados principalmente para reducir la respuesta de estructuras ante solicitaciones de viento.

Los *disipadores viscoelásticos sólidos* están formados por chapas metálicas unidas por una capa de material viscoelástico acopladas a los arriostres que conectan los extremos del entrepiso.

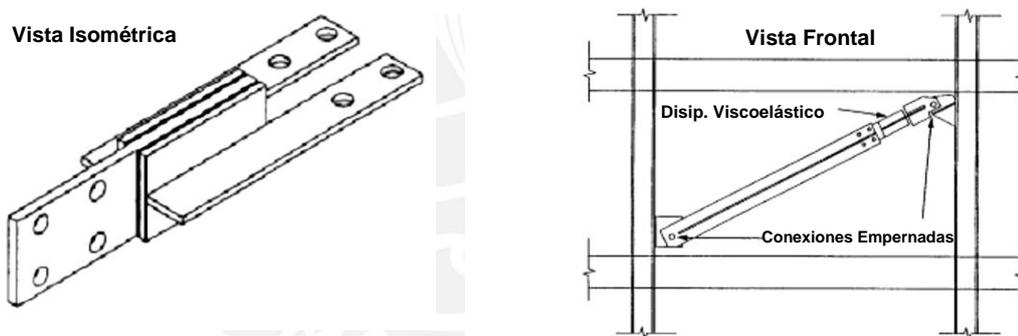


Figura 2.11. Dispositivo viscoelástico sólido

Por su parte, los *disipadores viscoelásticos líquidos* disipan la energía por medio de movimientos inducidos por un pistón en una sustancia altamente viscosa.

En relación con los disipadores histeréticos, los disipadores viscoelásticos no cambian significativamente el período de vibración de la estructura, con lo cual la modelación es más sencilla. Por otro lado, si se desea lograr un amortiguamiento significativo a la estructura ante sismos severos, se requiere necesariamente de una gran cantidad de estos dispositivos.

2.4.3. Amortiguamiento y Reducción de la Respuesta Sísmica.

Para fines de diseño de los dispositivos de amortiguamiento, el factor de reducción de la respuesta sísmica (B) depende directamente del amortiguamiento efectivo (β_{eff}) como se muestra en la siguiente expresión (Programa Nacional para la Reducción de Peligro Sísmico – NERHP):

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

El amortiguamiento efectivo de una estructura (β_{eff}) es el amortiguamiento inherente (β_o), asumido en no más de 5%, más el amortiguamiento asociado al efecto de los disipadores sobre la estructura (β_{vm}).

$$\beta_{\text{eff}} = \beta_o + \beta_{\text{vm}}$$

También es posible obtener el factor de reducción de la respuesta sísmica (B) dividiendo la deriva máxima obtenida a partir de los registros sísmicos (D_{max}) entre la deriva de diseño (D_{objetivo}), mediante la siguiente fórmula:

$$B = \frac{D_{\text{max}}}{D_{\text{objetivo}}}$$

2.5. Disipadores fluido - viscosos.

Son mecanismos llenos de líquido viscoso que disipan energía forzando su flujo a través de un orificio. Los disipadores dependen de la velocidad, por lo que no incrementan esfuerzos en la estructura ya que aquellos que ésta desarrolla están fuera de fase con las fuerzas actuantes en los disipadores durante el movimiento.

2.5.1. Componentes de un disipador fluido – viscoso (DFV).

Un DFV consiste de un cilindro metálico lleno de un líquido viscoso, como aceite o silicona, y una cabeza de pistón con orificios que separa al cilindro en dos cámaras. Una de las cámaras posee un acumulador que compensa el cambio de volumen del fluido debido al posicionamiento del pistón durante el movimiento como se muestra en la figura 2.12.

El modelamiento del DFV con orificios está desarrollado en la publicación Contantinou y Symans (1993).

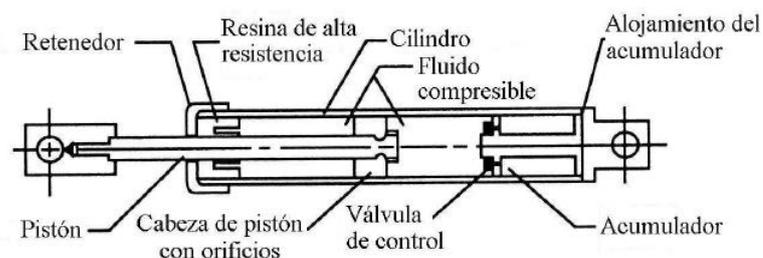


Figura 2.12. Partes de un disipador fluido – viscoso
(Oviedo, Ricardo. *Dispositivos pasivos de disipación de energía para diseño Sismorresistente de estructuras*)

Para instalaciones típicas, el pistón es fijado al piso superior, mientras que el acumulador es fijado al piso inferior. Las dos disposiciones más comunes de colocación son diagonal y chevron. La figura 2.13 muestra la configuración chevron, en la que se puede observar dos disipadores en disposición diagonal.

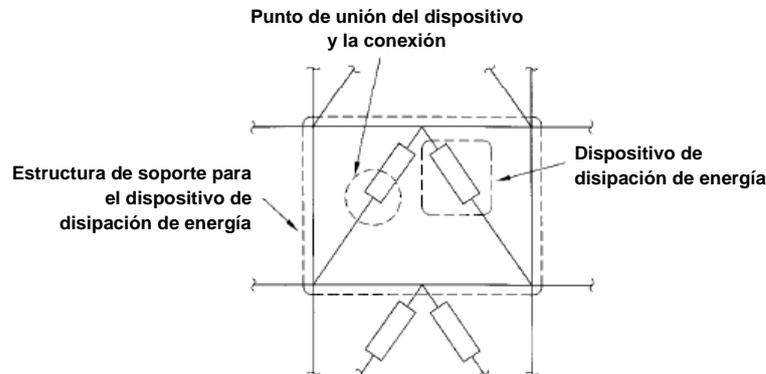


Figura 2.13. Disipador en disposición Chevron (FEMA 274)

2.5.2. Modelo mecánico del disipador

La relación de esfuerzo y velocidad de deformación de un fluido Newtoniano tiene la misma forma que la relación fuerza y velocidad de desplazamiento de un amortiguador, donde el amortiguador en una posición suelta mueve un cilindro que contiene un fluido newtoniano, como lo representa el diagrama de Maxwell en la figura 2.14.

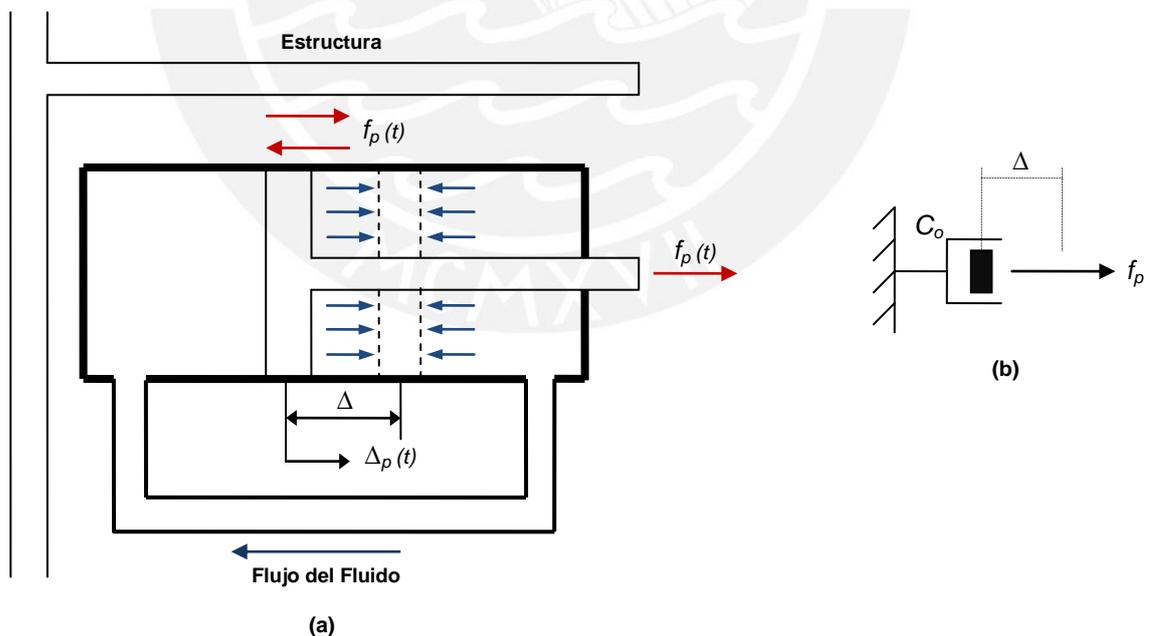


Figura 2.14. (a) Esquema de un disipador fluido viscoso, (b) Diagrama de Maxwell (Chen Franklin. *Smart Structures*)

Durante la vibración de la estructura, la diferencia de presiones entre cada lado de la cabeza del pistón resulta en la fuerza de amortiguamiento, como se muestra en la siguiente ecuación:

$$F = C \cdot \dot{\Delta}^\alpha$$

La fuerza es una función de $\dot{\Delta}$ (velocidad relativa entre dos extremos del disipador), la constante de amortiguamiento C (que depende de la frecuencia, temperatura y la amplitud del movimiento) y un exponente de velocidad α .

Los amortiguadores con α igual a uno tienen un comportamiento lineal y representan la forma más simple de disipación de energía; sin embargo, los disipadores más usados son los no lineales con α menor a uno. La figura 2.15 muestra el comportamiento de ambos tipos de amortiguadores.

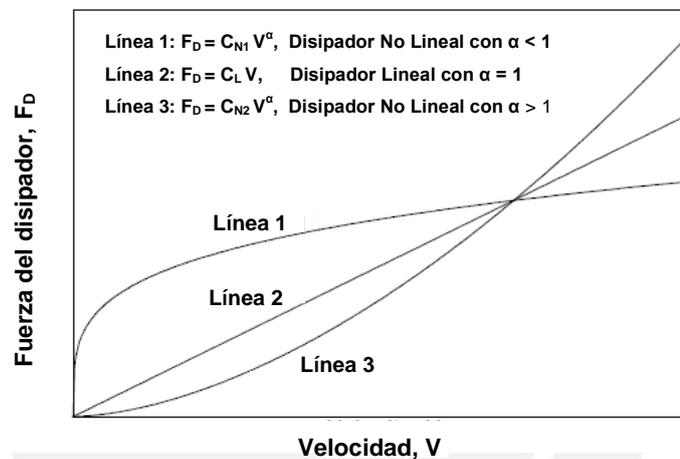


Figura 2.15. Relaciones fuerza - velocidad de disipadores viscosos
(Jenn – Shin Hwang. *Seismic Design of Structures with Viscous Dampers*)

Para una pequeña velocidad relativa, el amortiguador con α menor a uno es el más efectivo minimizando choques de alta velocidad, por lo que provee una fuerza de amortiguamiento mayor que los otros tipos de amortiguadores.

2.5.3. Comportamiento Histerético.

La figura 2.16 muestra un ciclo de histéresis de un amortiguador con un comportamiento viscoso lineal y no lineal. El ciclo muestra una elipse perfecta para el primer caso ($\alpha=1$).

Cuando la estructura alcanza su máximo desplazamiento, su velocidad es cero; por lo tanto, la fuerza en el disipador también será cero y cuando el desplazamiento de la estructura sea mínimo, la fuerza en el disipador será máxima.

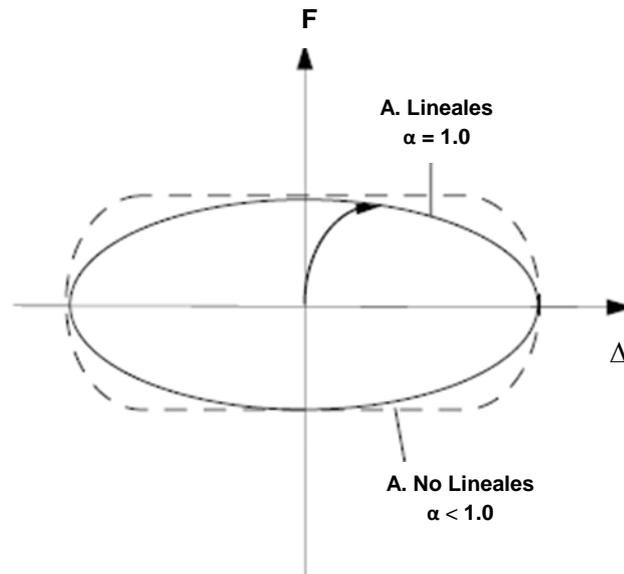


Figura 2.16. Relación fuerza - desplazamiento del amortiguador fluido viscoso.
(Chen Franklin. *Smart Structures*)

2.5.4. Amortiguamiento efectivo equivalente.

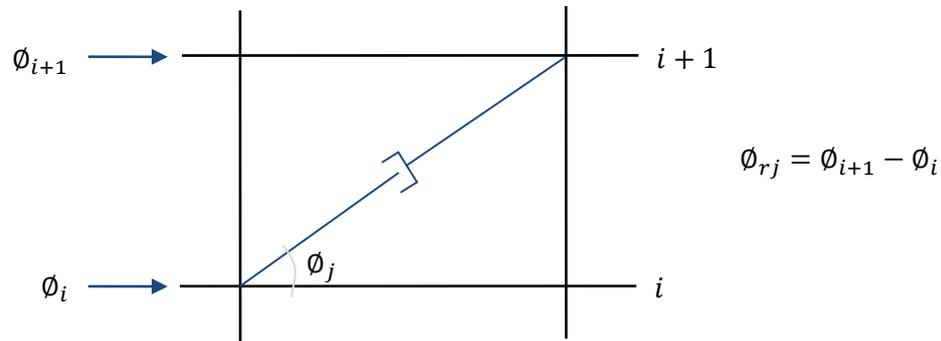
La ecuación de amortiguamiento efectivo para un amortiguador viscoso lineal ($\alpha = 1$) (FEMA 273) es:

$$\beta_{eff} = \beta_0 + \frac{T \cdot \sum_j C_j \cdot \cos^2 \theta_j \cdot \phi_{rj}^2}{4\pi \cdot \sum_i (\frac{w_i}{g}) \cdot \phi_i^2}$$

Donde:

- β_{eff} : Amortiguamiento efectivo del sistema estructural.
- β_0 : Amortiguamiento inherente del sistema estructural.
- T : Período fundamental de la estructura
- C_j : Coeficiente de Amortiguamiento del disipador j
- w_i : Peso del nivel i
- θ_j : Angulo de Inclinación del disipador j
- ϕ_i : Desplazamiento del nivel i
- ϕ_{rj} : Desplazamiento relativo del disipador j

El desplazamiento relativo del sistema de amortiguamiento es representado en la figura 2.17.



La ecuación de amortiguamiento efectivo sirve para estimar el coeficiente de amortiguamiento C_j una vez definidas las demás variables.

Para amortiguadores viscosos no lineales ($\alpha < 1$) se tiene:

$$\beta_{eff} = \beta_0 + \frac{\sum_j \lambda C_j \phi_{rj}^{1+\alpha} \cos^{1+\alpha} \theta_j}{2\pi A^{1-\alpha} \omega^{2-\alpha} \sum_i m_i \phi_i^2}$$

Donde:

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

- β_{eff} : Amortiguamiento efectivo del sistema estructural.
- β_0 : Amortiguamiento inherente del sistema estructural.
- C_j : Coeficiente de Amortiguamiento del disipador j
- m_i : Masa del nivel i
- θ_j : Angulo de Inclinación del disipador j
- ϕ_i : Desplazamiento del nivel i
- ϕ_{rj} : Desplazamiento relativo del disipador j
- A : Desplazamiento del primer modo.
- ω : Frecuencia angular.
- λ : Parámetro lambda
- Γ : Función gamma

El parámetro lambda λ depende de la función gamma $\Gamma(\alpha)$ definida por Euler, la cual extiende el concepto de factorial a los números complejos y es ampliamente usada en temas de probabilidad y estadística. Las funciones gamma $\Gamma^2(1 + \frac{\alpha}{2})$ y $\Gamma(2 + \alpha)$ se resuelven mediante la integración por partes.

El FEMA 274 facilita una tabla que permite obtener el parámetro lambda directamente con el valor del exponente de velocidad α :

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

Tabla 2.1. Valores del parámetro lambda. (FEMA 274)

2.5.5. Disposiciones típicas: Chevron y Diagonal.

Podemos mencionar algunas características comunes de ambas disposiciones en DFV, tales como:

- No alteran la frecuencia natural de la estructura por poseer una rigidez mínima en comparación al sistema estructural.
- La disipación de la energía se da en cualquier dirección, reduciendo los esfuerzos y deformaciones de la estructura con una fuerza que depende únicamente de la velocidad.

A continuación, se presenta una comparación de ambas disposiciones:

- La instalación del disipador chevron requiere diseñar el sobreesfuerzo generado en la parte intermedia de la viga, mientras que el diagonal no tiene este requerimiento.
- En términos arquitectónicos la configuración chevron resulta más conveniente que la configuración diagonal, puesto que permite el libre tránsito a través de la zona reforzada.
- Los DFV chevron tienen un mejor control de derivas que los DFV diagonales, ya que poseen dos dispositivos de amortiguamiento a diferencia de los diagonales que solo poseen uno.

CAPITULO 3

DERIVA Y DESEMPEÑO SISMORRESISTENTE DE EDIFICACIONES

3.1. Objetivos del Desempeño Sismorresistente de Edificaciones.

La Ingeniería Sismorresistente ha ido mejorando gracias a la experiencia adquirida de los sismos recientes. Lo que en un primer momento pretendía que las estructuras bien diseñadas no colapsen ante la presencia de un sismo severo tuvo que modificarse con el transcurrir de los años al presenciar grandes daños estructurales y cuantiosas pérdidas ante sismos con aceleraciones inclusive menores a las esperadas.

Esto nos demuestra que la seguridad ante el colapso a consecuencia de grandes sismos no implica necesariamente un comportamiento adecuado de la estructura ante sismos de menor intensidad. Es por ello que se ve necesario incluir un escenario con múltiples niveles de desempeño con el objetivo de tener alternativas aceptables de evaluación.

Es así que, desarrollando estos conceptos, surgen las propuestas presentadas por la Sociedad de Ingenieros Estructurales de California (SEAOC), el ATC-40 publicado en 1996, el programa HAZUS 99, FEMA 273 y 274, entre otros.

Las propuestas señaladas difieren en detalles, pero se basan en los mismos conceptos. Para el desarrollo del presente trabajo, se empleará la propuesta del SEAOC a través del Comité VISION 2000, la cual fue desarrollada en el año 1995 y aparece en el apéndice G del libro *Recommended Lateral Force Requirements and Commentary*.

Según esta propuesta, el desempeño sísmico de las edificaciones se establece sobre tres conceptos: la severidad del sismo, el nivel de desempeño esperado y la importancia que tenga la edificación, relacionándolos mediante la matriz de desempeño.

3.1.1 Niveles de Amenaza Sísmica.

La propuesta del Comité VISION 2000 (SEAOC, 1995) establece cuatro niveles de amenaza sísmica en función de su probabilidad de ocurrencia en un período de 50 años de exposición, o en función del período medio de retorno, los cuales se muestran en la tabla 3.1:

Sismo de Diseño	Probabilidad de excedencia en 50 años de exposición	Período de retorno
Sismos frecuentes	69%	43 años
Sismos ocasionales	50%	72 años
Sismos raros	10%	475 años
Sismos muy raros	5%	970 años

Tabla 3.1. Niveles de amenaza sísmica según la propuesta del SEAOC

3.1.2 Niveles de Desempeño.

La propuesta del SEAOC define cinco niveles de desempeño en base a tres aspectos fundamentales:

- Daño sufrido por el sistema estructural y por las componentes no estructurales.
- Amenaza de la seguridad de los ocupantes a raíz de los daños.
- Funcionalidad de la edificación luego del sismo.

La tabla 3.2 resume las principales características de los cinco niveles de desempeño propuestos y los relaciona con el daño general de la estructura.

Nivel de desempeño	Descripción de los daños	Estado de daño	Límite de desplazamiento del sistema
Totalmente Operacional	Daño estructural y no estructural despreciable o 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 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	$\Delta y + 1.00\Delta p$

Tabla 3.2. Niveles de desempeño según la propuesta del SEAOC

Una manera para calificar el nivel de desempeño se realiza mediante la sectorización de la curva de capacidad. En primer lugar, debe simplificarse la curva de capacidad, empleando un modelo bilineal, con el objetivo de determinar el punto de fluencia efectiva (Δy). A partir de este punto, queda definido el inicio del comportamiento inelástico, el cual se divide en cuatro sectores dependiendo del porcentaje de desplazamiento inelástico disponible (ΔP).

A continuación, se muestra la curva de capacidad sectorizada propuesta por el SEAOC:

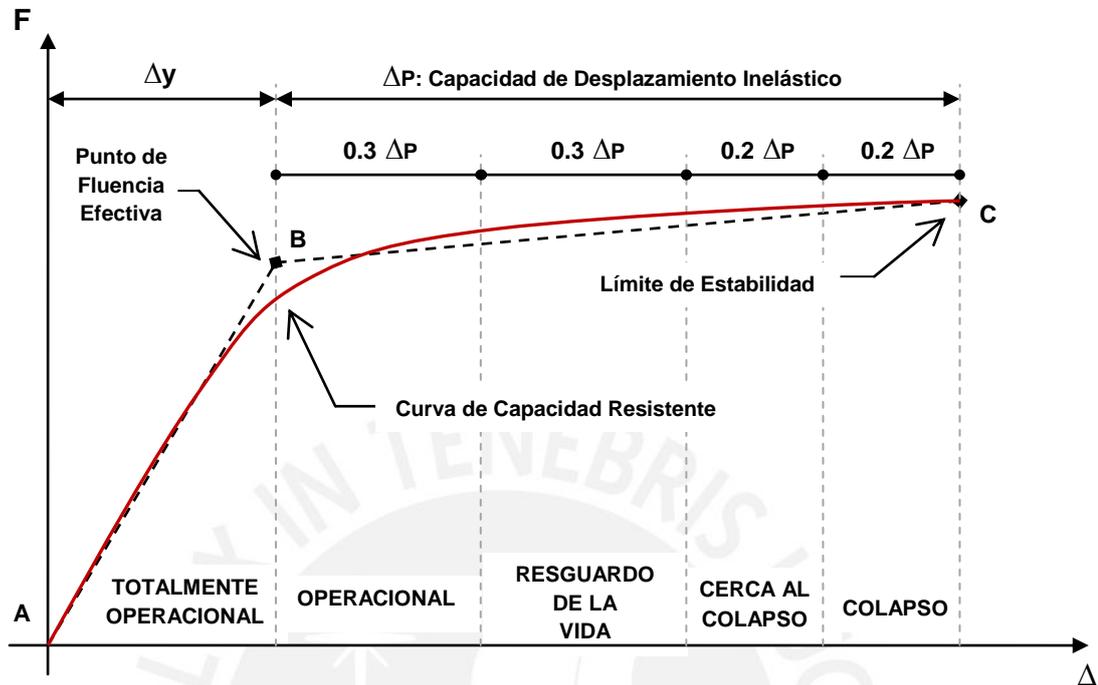


Figura 3.1. Curva de capacidad sectorizada propuesta por el SEAOC

3.1.3. Importancia de la Edificación.

De acuerdo al grado de importancia de la edificación, durante y después de un sismo, la propuesta del Comité VISION 2000 clasifica a las edificaciones en tres grandes grupos:

- Edificaciones Esenciales. Aquellas cuya función no debería interrumpirse luego de ocurrido el sismo. En este grupo tenemos: hospitales, cuarteles de bomberos, policía, etc.
- Edificaciones de Seguridad Crítica. Aquellas que contienen materiales peligrosos dañinos para la población. Aquí se encuentran: plantas industriales y centrales nucleares.
- Edificaciones Comunes. En este grupo se encuentran todas las edificaciones que no hayan sido incluidas anteriormente: edificios de viviendas, oficinas, hoteles, entre otras.

3.1.4. Objetivos múltiples de desempeño.

La propuesta establecida por el Comité VISION 2000, señala lo siguiente:

“Los objetivos del desempeño Sismorresistente se definen por la combinación entre los niveles de desempeño deseados y los niveles de amenaza sísmica esperada de acuerdo a la importancia de la edificación.” (SEAOC, 1995)

Estos objetivos se relacionan entre sí mediante la denominada matriz de desempeño, la cual establece los requerimientos mínimos sobre el desempeño sísmico antes los diferentes niveles de amenaza:

		Nivel de Desempeño de la Edificación			
		Totalmente Operacional	Operacional	Resguardo de vida	Cerca al colapso
Nivel de Demanda Sísmica	Sismos frecuentes (43 años)	Edificaciones Comunes	Edificaciones Esenciales	Edificaciones de Seguridad Crítica	Edificaciones de Seguridad Crítica
	Sismos ocasionales (72 años)	Edificaciones Comunes	Edificaciones Esenciales	Edificaciones de Seguridad Crítica	Edificaciones de Seguridad Crítica
	Sismos raros (475 años)	Edificaciones Comunes	Edificaciones Esenciales	Edificaciones de Seguridad Crítica	Edificaciones de Seguridad Crítica
	Sismos muy raros (970 años)	Edificaciones Comunes	Edificaciones Esenciales	Edificaciones de Seguridad Crítica	Edificaciones de Seguridad Crítica

	Edificaciones Comunes
	Edificaciones Esenciales
	Edificaciones de Seguridad Crítica

Tabla 3.3. Matriz de Desempeño

La visión del diseño sísmico de estructuras consiste en verificar el comportamiento de las edificaciones para cada uno de los sismos descritos líneas arriba; verificaciones que se realizarán sobre las derivas máximas permitidas y en base al daño local y global de la estructura.

Estudios de peligro asociados a los cuatro sismos de diseño en la costa oeste de América del Sur (A. Muñoz. *Ingeniería Sismorresistente*), en términos de aceleración pico en la base rocosa y probabilidad de excedencia en 50 años de exposición, concluyen que la aceleración tendría valores cercanos a los mostrados en la tabla 3.4.

Sismo de Diseño	Aceleración (g)	Comportamiento Estructural
Sismos frecuentes	0.20	Perfectamente Elástico
Sismos ocasionales	0.25	Prácticamente Elástico
Sismos raros	0.40	Importantes incursiones elásticas con pérdida de resistencia y rigidez. La estructura es reparable
Sismos muy raros	0.50	Severas incursiones inelásticas, pérdida casi total de rigidez y resistencia. No resulta práctico reparar la estructura

Tabla 3.4. Desempeño esperado para edificios comunes en la costa peruana

Actualmente, el Diseño Orientado al Desempeño nos permite desarrollar estrategias para lograr edificios con buen comportamiento en múltiples escenarios de peligro.

3.2. Deriva y Daño Estructural.

3.2.1. Relación Deriva - Daño.

La experiencia sísmica acumulada durante los últimos años ha demostrado que mientras mayores son los desplazamientos inelásticos en una estructura, mayor es el daño y la probabilidad de colapso.

El manual del HAZUS presenta curvas de fragilidad (figura 3.2) que describen la probabilidad de exceder diferentes estados de daño, dado un determinado parámetro de demanda que puede ser en términos de aceleración pico del suelo (PGA) o de la deformación permanente del suelo (PGD).

Estas curvas se han obtenido a partir de la elaboración de curvas de capacidad, las cuales se usaron para conocer las respuestas de un edificio en términos de la aceleración pico del suelo.

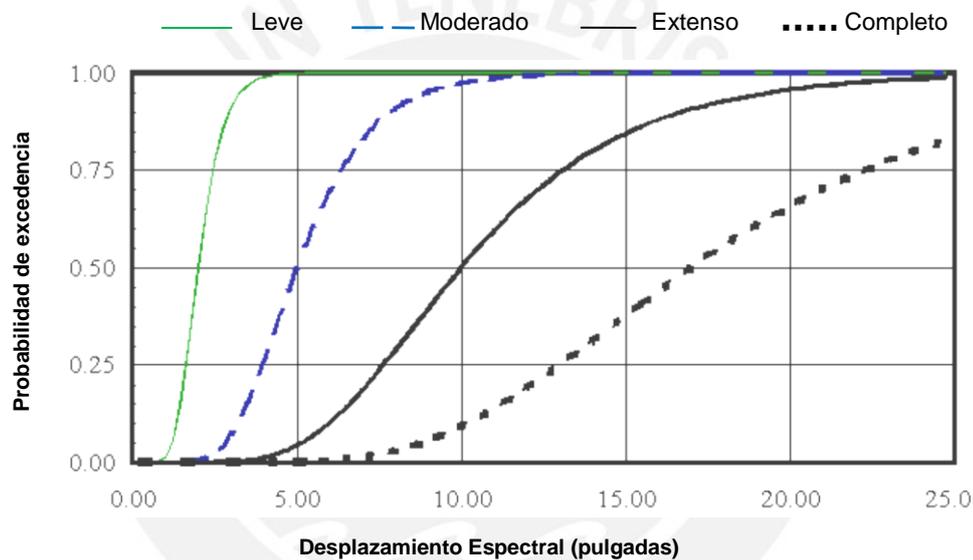


Figura 3.2. Curvas de fragilidad para 4 niveles de daño. (HAZUS)

Vemos que la probabilidad de alcanzar o exceder un determinado desplazamiento espectral dependerá del nivel de daño que se quiera tener. Así, para un nivel de daño leve, la probabilidad de alcanzar o exceder un desplazamiento espectral será mucho mayor a la probabilidad de exceder ese mismo desplazamiento para un nivel de daño completo.

3.2.2. Factores que influyen en la relación Deriva - Daño.

El manual de *Multihazard Loss Estimation Methodology* HAZUS, lista 16 sistemas estructurales y los subdivide de acuerdo a la altura de la edificación.

Para cada tipo de edificio establecido hay un nivel de daño estructural asociado: Leve, moderado, extenso, completo, similar a lo establecido por el SEAOC.

Existen 4 códigos que el manual del HAZUS usa: el pre-código, el código de nivel bajo, de nivel moderado y el de alto nivel. El código que se usa en el Perú es el "Moderate Code" o código de nivel moderado, puesto que es el que más se asemeja a las exigencias de la Norma Peruana actual.

3.2.3. Propuesta del Hazus para la relación Deriva - Daño.

Para cada estado de daño que se tiene se asocia una deriva objetivo tomando en cuenta los factores mencionados anteriormente. En la tabla 3.5 se muestra como ejemplo un resumen que describe el nivel de daño asociado a las derivas objetivo para edificios de mediana altura entre cuatro y siete pisos hechos de concreto armado denominados CM1.

Daño estructural	Descripción	Deriva Objetivo
Leve	Pueden observarse grietas de corte y de flexión cerca a la unión de algunas vigas y columnas.	0.33%
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.	0.58%
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.	1.58%
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.	4.00%

Tabla 3.5. Desempeño y derivas objetivo para edificios tipo CM1.

La Norma Peruana para edificios de concreto armado, independiente de la altura, fija la deriva máxima en 0.7%

CAPITULO 4

METODOLOGIA DE DISEÑO PARA SISTEMAS DE DISIPACION DE ENERGIA

Los requisitos mínimos para el diseño de amortiguadores de fluido-viscoso en disposición Chevron se establecen en el ASCE capítulo 18 sección 18.2.4.1 y son los siguientes:

- El sistema de amortiguamiento debe contar como mínimo de dos dispositivos por nivel en cada dirección de análisis y ubicados estratégicamente para no ocasionar efectos de torsión.
- El amortiguamiento efectivo total del modo fundamental en la dirección de interés no debe ser mayor que el 35% del amortiguamiento crítico.

4.1. Análisis Sísmico de la estructura sin Sistemas de Disipación de Energía.

Con el objetivo de establecer el comportamiento de la estructura, es necesario realizar un análisis sísmico espectral y tiempo – historia sin sistemas de disipación. La estructura se modelará siguiendo los criterios del ACI 318 M-05 artículo 10.11.1 con el fin de tomar en consideración la presencia de secciones agrietadas a lo largo del elemento.

$$\begin{array}{l}
 - \text{ Vigas} \quad : \quad 0.35 * l_g \\
 - \text{ Columnas} \quad : \quad 0.70 * l_g
 \end{array}
 \left. \vphantom{\begin{array}{l} - \text{ Vigas} \\ - \text{ Columnas} \end{array}} \right\} l_g : \text{ Sección bruta del elemento}$$

- Análisis espectral.

El análisis espectral nos permite estimar los desplazamientos laterales de la edificación para su posterior verificación con los valores permisibles de la NTE E.030 de Diseño Sismorresistente.

- Análisis tiempo - historia.

El análisis tiempo-historia, por su parte, nos permite calcular la respuesta en el tiempo de una estructura a lo largo de la duración de un sismo; es decir, es posible obtener la historia de desplazamientos, fuerzas y momentos de cada uno de los elementos estructurales.

La norma peruana establece que, para este tipo de análisis, se debe emplear como mínimo 5 registros sísmicos que posean un contenido de frecuencias representativo de las condiciones locales debidamente escalados a la aceleración máxima esperada en el sitio (Lima: 0.4g)

Para los diferentes registros sísmicos es necesario determinar el desplazamiento máximo en la estructura y, en consecuencia, la deriva máxima en ambas direcciones.

4.2. Elección del Desempeño.

La metodología continúa estableciendo los objetivos de desempeño sísmico mediante la elección del sismo de diseño y el daño aceptado para el mismo, según lo expuesto en el capítulo 2 “Deriva y Desempeño Sismorresistente en edificaciones”.

Por ejemplo, si se diseña para un sismo con período de retorno de 500 años, es posible elegir entre un estado de **daño moderado**; es decir, un nivel de desempeño de resguardo de vida o un estado de **daño leve**, el cual corresponde a un desempeño operacional.

La elección del daño aceptado implica, desde el punto de vista estructural, conseguir un nivel de deriva objetivo.

4.3. Definición de los Objetivos de Diseño.

- Deriva y amortiguamiento objetivo.

Con el nivel de daño aceptado para el sismo de diseño, se determina la deriva máxima asociada, denominada Deriva Objetivo (D_{obj}), tal como se establece en el acápite 3.2.3.

A continuación, se determina el cociente entre D_{max} y D_{obj} . Este cociente representa el factor por el cual se debería reducir la respuesta para llegar a la deriva objetivo.

Finalmente, con el factor de reducción (B) descrito en el acápite 2.4.3, se determina el amortiguamiento efectivo que se debe alcanzar.

4.4. Generación de alternativas.

Se propone una distribución de dispositivos y, en función del amortiguamiento efectivo necesario, se hace una estimación de las características de los disipadores.

4.4.1. Ubicación de dispositivos en el sistema estructural.

La ubicación y número de amortiguadores colocados a lo largo y alto de la estructura influyen significativamente en su efectividad. El concepto fundamental es ubicar los disipadores necesariamente en los entresijos que presentan mayor velocidad y desplazamiento relativo, dado que de ese modo se estarían optimizando los recursos.

Una cantidad mayor de disipadores ubicados sin criterio pueden dar los mismos resultados que un número menor de disipadores ubicados estratégicamente, el ASCE 7-10 exige como mínimo 2 dispositivos por dirección de análisis en cada piso y en arreglo, tal que no genere torsión.

La arquitectura establecida, así como el uso destinado de la edificación, son factores importantes al momento de decidir la ubicación final de los disipadores.

4.4.2. Propiedades de los disipadores.

- Coeficiente de Amortiguamiento (C).

Las ecuaciones de pre dimensionamiento del coeficiente de amortiguamiento C para disipadores lineales de ($\alpha = 1$) y no lineales ($\alpha < 1$) se encuentran en el acápite 2.5.4. El análisis se debe realizar para los dos primeros modos de la estructura (Dirección X e Y).

- Rigidez del Perfil Metálico (K).

El otro parámetro a definir es la rigidez de los disipadores, los cuales están conectados a perfiles metálicos. El análisis considera la rigidez de los perfiles y no la del disipador en sí por ser mucho menor. La rigidez de dicho perfil se calculará mediante la expresión: $K = E \cdot A/L$

4.5. Evaluación de la respuesta de cada alternativa.

Con las alternativas propuestas, se determina la respuesta de la estructura y se verifican los desplazamientos y derivas objetivos, así como el amortiguamiento presente en la estructura mediante un ensayo de vibración libre.

Además, se requiere evaluar las fuerzas máximas en los disipadores para cada configuración establecida y las fuerzas internas en los elementos adyacentes.

4.6 Elección de la mejor alternativa.

La elección de la mejor alternativa será básicamente la que presente menores fuerzas tanto en los dispositivos de amortiguamiento, como en los elementos adyacentes.

Adicionalmente, es necesario realizar una evaluación del mercado local, ya que probablemente la mejor alternativa estructural no sea la más económica.

Otros factores a considerar son el tiempo y costo de instalación, así como la factibilidad para el diseño de las uniones entre disipadores y elementos adyacentes (efectos locales).

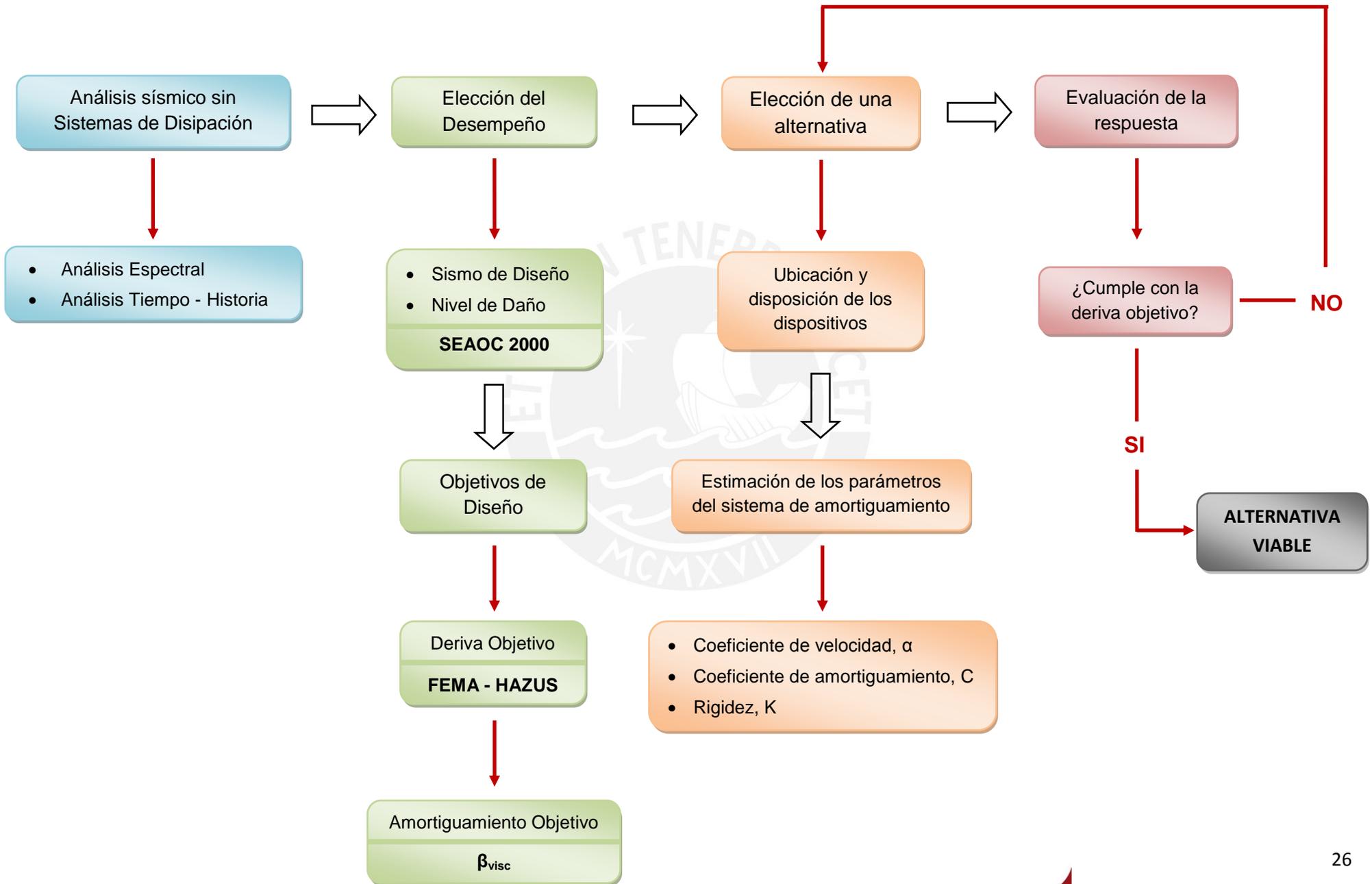
4.7 Diseño de los dispositivos de amortiguamiento.

Los dispositivos de amortiguamiento y las conexiones metálicas se diseñan con los esfuerzos críticos obtenidos del análisis tiempo – historia.

Posteriormente se agrupan los dispositivos de acuerdo a la magnitud de la fuerza de diseño obtenida.

Finalmente se procede a definir las propiedades de estos a partir de la información proporcionada por el fabricante.

4.8 Síntesis de la metodología.



CAPITULO 5

EJEMPLO DE APLICACIÓN

5.1. Descripción de la Estructura y objetivos de desempeño.

Para el ejemplo de aplicación se empleará el edificio de oficinas de concreto armado presentado en la tesis de Albarracín, Patricia y Gallo, Eduardo, mostrado en la figura 5.1.

El edificio cuenta con 7 pisos y presenta una configuración regular en elevación, la dimensión total en planta en el eje X es de 22m y en el eje Y, de 33m. Dicho edificio se ubica en la ciudad de Lima, en una zona donde el suelo es grava de buena calidad.

La estructura consta de un sistema aporticado conformado por vigas y columnas en ambas direcciones y losas macizas de 15cm de espesor en los entrepisos, las cuales actúan como diafragmas rígidos, transfiriendo las cargas de manera uniforme a toda la estructura. El primer piso del edificio presenta una altura de 3.50m y los seis restantes, de 2.70m; las columnas son de 45 x 45cm y las vigas de 25 x 50cm (no se considerará la forma de sección T).

El objetivo del edificio se orientará a lograr un daño moderado en un terremoto de 475 años de período de retorno.

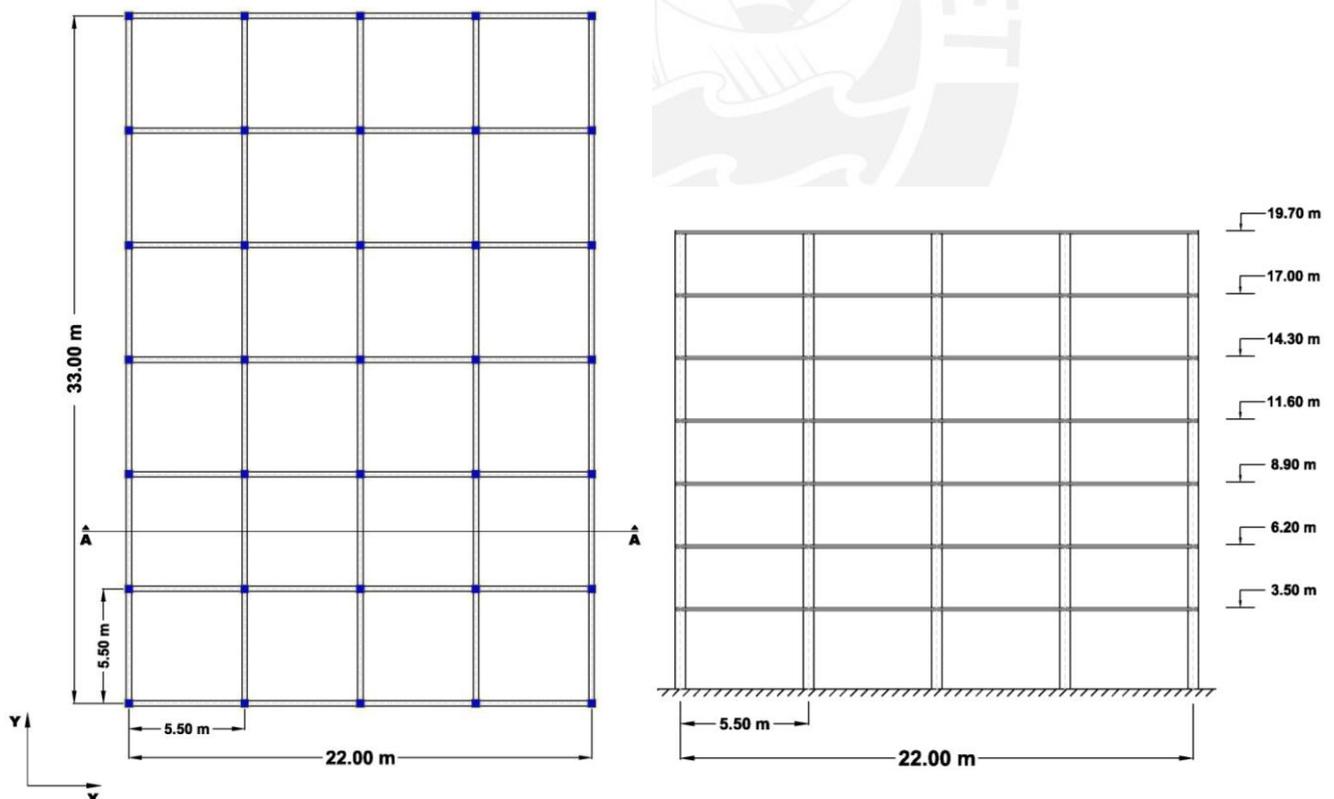


Figura 5.1. Planta típica y Corte A – A de la Edificación

Es importante mencionar que el edificio presentado tiene una altura de entrepiso no acorde a las exigencias de un edificio de oficinas actual.

Las características del concreto y del acero especificadas para el diseño son:

- Resistencia a compresión del concreto: $f'_c = 210 \text{ kg/cm}^2$
- Módulo de elasticidad del concreto: $E_c = 220000 \text{ kg/cm}^2$
- Peso específico del concreto: $\gamma = 2400 \text{ kg/m}^3$
- Coeficiente de Poisson: $\nu = 0,15$
- Esfuerzo de fluencia del acero: $f_y = 4200 \text{ kg/cm}^2$
- Módulo de elasticidad del acero: $E_s = 2000000 \text{ kg/cm}^2$

5.2. Análisis Sísmico de la estructura sin Sistema de Disipación de Energía.

El análisis sísmico tiene como objetivo determinar las fuerzas internas en los elementos estructurales con el propósito de diseñarlos. Así también, permite estimar los desplazamientos laterales de una edificación, lo cual será objeto de este capítulo, para su posterior verificación con los valores permisibles de la norma.

La Norma Peruana de Diseño Sismorresistente E.030 especifica que, para edificios de concreto armado, el límite permisible de desplazamiento lateral es de 0.7% de la altura de entrepiso, concepto conocido como deriva.

Para la elaboración del modelo estructural, se utilizó el programa ETABS en su versión 9.6.0.

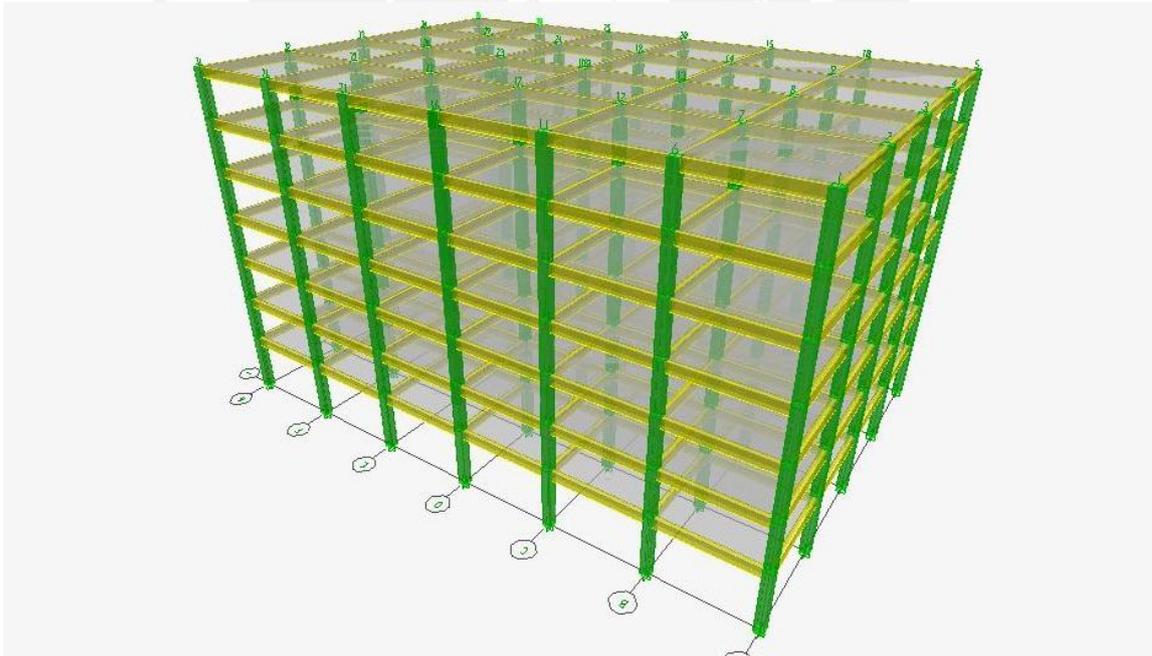


Figura 5.2. Modelo Estructural

El modelo se desarrolló considerando elementos unidimensionales con deformaciones por flexión, cortante y axial, considerando tres grados de libertad en cada nivel.

Se utilizaron brazos rígidos para modelar la unión entre las columnas y las vigas. Así mismo, se consideró en el modelo los diafragmas rígidos en el plano horizontal, utilizando este modelo se realizó el análisis espectral y el tiempo-historia.

5.2.1. Parámetros Sísmicos.

Las solicitaciones sísmicas se establecen en la Norma E.030:

- Zonificación Sísmica. (Z)

La edificación en estudio se encuentra en la Zona 3 (Lima), zona de mayor sismicidad, por consiguiente, le corresponde un factor de zonificación de **Z = 0.40g**.

- Condiciones Geotécnicas. (T_p y S)

La edificación se encuentra sobre grava de buena calidad, refiriéndose según la norma a los suelos tipo S1 (suelos muy rígidos), correspondiéndole el factor de amplificación **S = 1.0** y el período de corte **$T_p = 0.40\text{seg}$** .

- Factor de Amplificación Sísmica. (C)

Representa el cociente entre el valor máximo de la aceleración en la estructura y el valor pico de la aceleración en su base:

$$C = 2.5 \times \left(\frac{T_p}{T} \right) ; C \leq 2.5$$

Con ello, la aceleración máxima en la estructura se puede representar por el producto ZSC.

- Categoría de la Edificación. (U)

La edificación en evaluación está destinada a oficinas, lo que corresponden a edificaciones comunes con un factor de uso de **U = 1.0**.

- Configuración Estructural.

La estructura clasifica como una **estructura regular**, ya que no presenta discontinuidades significativas horizontales o verticales en su configuración resistente a cargas laterales.

- Sistema Estructural. (R)

A los edificios con un sistema estructural en base a pórticos les corresponde un factor **R = 8**.

5.2.2. Análisis por Combinación Espectral.

En el análisis dinámico se consideraron tres grados de libertad por piso, por lo tanto, para el análisis de este edificio de siete niveles, se tendrán 21 modos de vibración.

- Metrado de Cargas.

En el caso de cargas muertas se consideraron, además del peso de los elementos estructurales (calculado internamente por el programa ETABS), el peso de las losas macizas, el piso terminado y la tabiquería liviana, como se muestra a continuación:

Cargas Muertas	Piso Típico (ton/m ²)	Azotea (ton/m ²)
Peso losa maciza	0.36	0.36
Peso piso terminado	0.10	0.10
Peso tabiquería	0.10	-
	0.56	0.46

Tabla 5.1. Metrado de cargas muertas

Del mismo modo, se aplicaron las cargas vivas, 250 kg/m de sobrecarga para oficinas en los pisos típicos y 100 kg/m para la azotea, que establece la Norma de Metrado de cargas E020.

Cargas Vivas	Piso Típico (ton/m ²)	Azotea (ton/m ²)
Sobrecarga (Oficinas)	0.25	0.10
	0.25	0.10

Tabla 5.2. Metrado de cargas vivas

- Peso de la Edificación. (P)

Para edificaciones categoría C, el peso de la edificación se calcula adicionando a la carga permanente un 25% de la carga viva o sobrecarga. Con ello obtuvimos:

Nivel	Masa (ton)	Peso (ton.f)	P/A (ton/m ²)
Planta 1	60	593	0.82
Piso Típico	60	586	0.81
Azotea	47	463	0.64
Peso Edificación		3,987	

Tabla 5.3. Peso de la edificación

A continuación, se muestran todos los parámetros sísmicos establecidos:

Parámetros Sísmicos	
Z	0.40
U	1.00
S	1.00
P	3,987
$R_{xx} = R_{yy}$	8

Tabla 5.4. Parámetros sísmicos

- Espectro de Análisis.

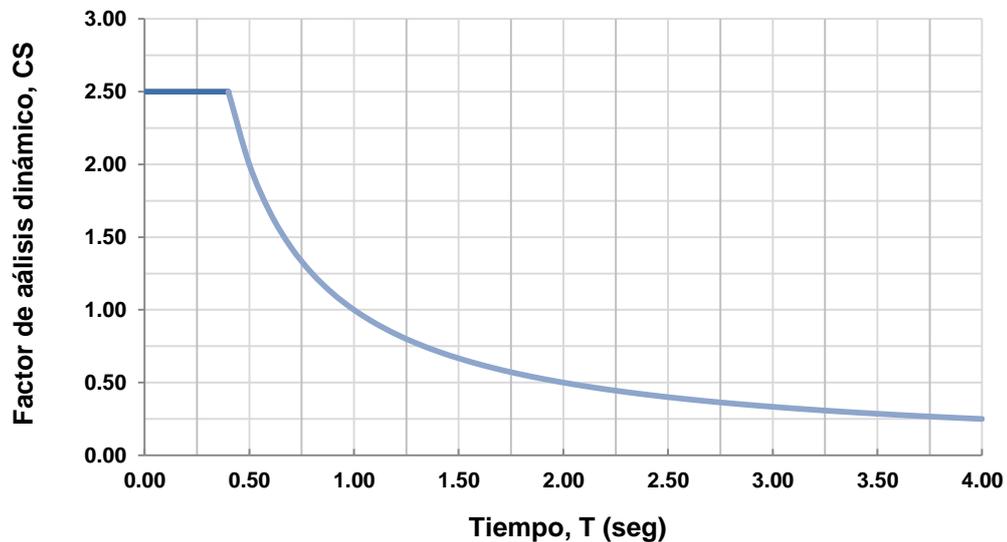
Con los parámetros sísmicos ya definidos, obtenemos el espectro de pseudo aceleraciones para el análisis sísmico, acorde a la Norma Peruana de Diseño Sismorresistente E.030, la cual se compone de una función espectral (CS) y un factor de escala:

$$S_a = \frac{Z \cdot U \cdot C \cdot S}{R} \cdot g$$

- Función Espectral. (CS)

Con el objetivo de obtener la función espectral se irá variando el período fundamental de la estructura de 0 a 4 segundos en intervalos de 0.1.

**Función Espectral
CS vs T**



- Factor de Escala.

Se define un factor de escala para el espectro.

$$\frac{Z \cdot U}{R} \cdot g = \frac{0.40 \times 1}{8} \times 9.81 = 0.491 \text{ m/s}^2$$

- Desplazamientos Laterales.

La Norma E.30 establece que los desplazamientos laterales se calculan multiplicando por $0.75 \cdot R$ los resultados obtenidos del análisis lineal con solicitaciones sísmicas reducidas. Esto se interpreta como los desplazamientos que tendría el edificio al entrar en régimen inelástico ante un sismo severo.

Se hallaron los siguientes resultados de desplazamientos inelásticos y derivas:

Nivel	hi (m)	Sismo X - X			Sismo Y - Y		
		Δ Relativo Entrepiso (cm)	Δ Inelástico (cm)	Deriva Δ / h_i (%)	Δ Relativo Entrepiso (cm)	Δ Inelástico (cm)	Deriva Δ / h_i (%)
Planta 7	2.70	0.09	0.54	0.20	0.08	0.48	0.18
Planta 6	2.70	0.16	0.96	0.36	0.14	0.84	0.31
Planta 5	2.70	0.24	1.44	0.53	0.21	1.26	0.47
Planta 4	2.70	0.29	1.74	0.64	0.26	1.56	0.58
Planta 3	2.70	0.35	2.10	0.78	0.30	1.80	0.67
Planta 2	2.70	0.39	2.34	0.87	0.35	2.10	0.78
Planta 1	3.50	0.44	2.64	0.75	0.39	2.34	0.67

Tabla 5.5. Derivas máximas del análisis espectral (%)

Se puede observar que en el segundo nivel se presentan, para ambas direcciones, derivas cercanas al 1%, mayores a la deriva máxima permisible por la Norma Peruana (0.7%).

5.2.3. Análisis Tiempo - Historia.

En esta investigación se utilizaron los registros sísmicos correspondientes a los años 1966, 1970 y 1974 en sus dos direcciones X e Y, las cuales fueron normalizadas con ayuda del software SeismoSignal a una aceleración máxima de 0.4g establecida en la norma E 0.30

Las características de estos sismos se muestran en la tabla 5.6.

Fecha	Componentes	Duración (seg)	Valores Máximos		
			Aceleración (cm/s ²)	Velocidad (cm/s)	Desplazamiento (cm)
17 de Octubre 1966	N82W	66	-180.60	13.20	7.40
	N08E		-269.30	-21.60	-16.60
31 de Mayo 1970	N82W	45	-104.80	4.70	1.60
	N08E		-97.80	7.00	2.60
3 de Octubre 1974	N82W	90	-192.50	14.50	6.40
	N08E		178.90	10.30	-5.30

Tabla 5.6. Descripción de sismos de diseño (Brady y Perez, 1977)

La figura 5.3 muestra los 3 pares de registros sísmicos utilizados en la investigación:

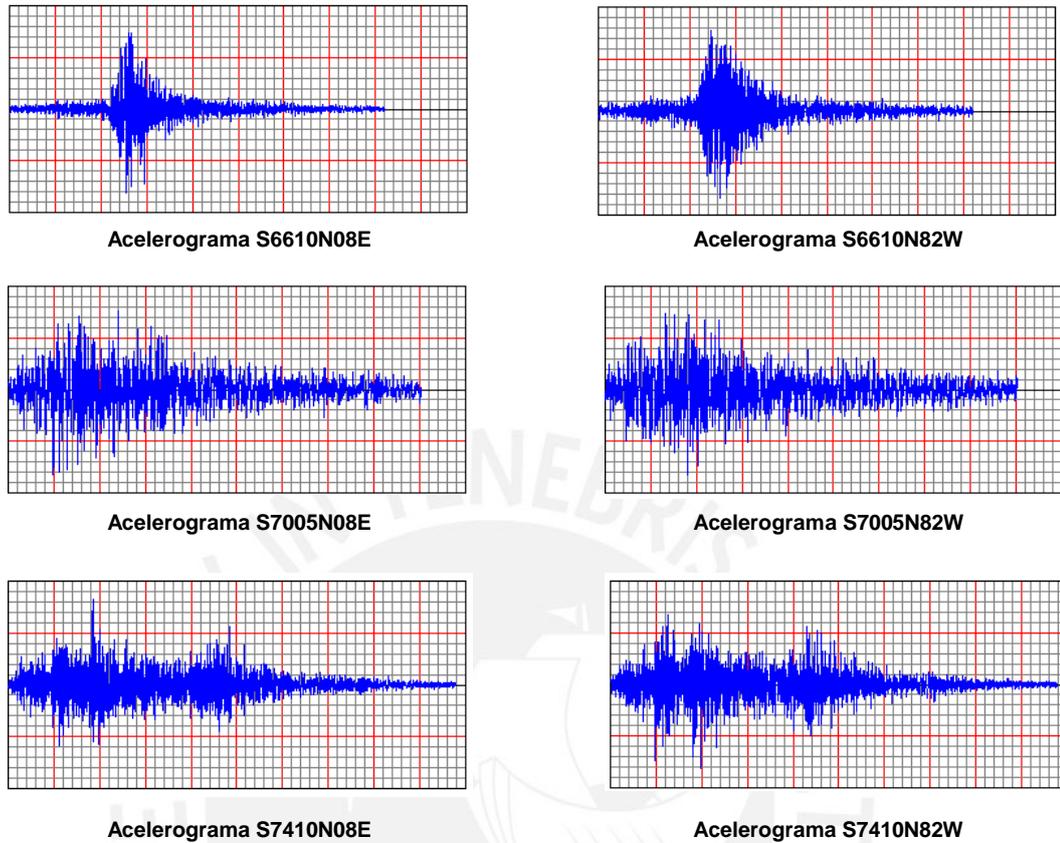


Figura 5.3. Registros sísmicos

- Respuesta del edificio sin amortiguadores.

En el modelamiento del edificio se emplean factores de reducción de rigidez de $0.35 * I_g$ para vigas y $0.70 * I_g$ para columnas, con el fin de tomar en consideración la presencia de secciones agrietadas a lo largo del elemento siguiendo las recomendaciones del ACI 318 M-05 Art. 10.11.1

A continuación, se muestran las derivas inelásticas de entrepiso obtenidas para cada registro sísmico en cada dirección:

	Sismo 66 17 de Octubre 1966		Sismo 70 31 de Mayo 1970		Sismo 74 3 de Octubre 1974	
	N08E	N82W	N08E	N82W	N08E	N82W
Planta 7	4.00	4.47	3.51	3.55	4.58	4.98
Planta 6	5.16	5.90	5.05	4.49	5.77	6.77
Planta 5	5.38	5.38	5.56	5.69	5.70	8.13
Planta 4	5.44	5.00	4.57	6.03	4.99	8.35
Planta 3	5.42	5.41	4.41	5.88	4.90	8.62
Planta 2	5.61	5.50	5.47	6.39	5.28	9.15
Planta 1	4.93	3.88	4.67	4.87	4.89	6.94

Tabla 5.7. Derivas máximas del análisis tiempo – historia (%) en la dirección x

	Sismo 66 17 de Octubre 1966		Sismo 70 31 de Mayo 1970		Sismo 74 3 de Octubre 1974	
	N08E	N82W	N08E	N82W	N08E	N82W
Planta 7	3.75	4.11	3.48	3.64	4.44	4.85
Planta 6	4.61	5.54	5.10	4.53	5.72	6.66
Planta 5	4.89	4.93	5.71	4.73	5.54	7.47
Planta 4	5.06	5.45	4.75	5.00	4.72	7.93
Planta 3	4.93	6.18	4.13	5.77	4.54	8.56
Planta 2	5.20	6.32	5.44	6.24	5.34	8.66
Planta 1	4.65	4.49	4.65	4.48	4.28	6.72

Tabla 5.8. Derivas máximas del análisis tiempo – historia (‰) en la dirección y

Las derivas inelásticas máximas en la dirección X e Y se presentan para el sismo de 1974 con un valor de **0.92** y **0.87** % respectivamente.

5.3. Elección del Objetivo de Desempeño.

Según la importancia de la edificación, establecido por el SEAOC, nuestra estructura califica como una **edificación común**.

Así mismo, elegimos como sismo de diseño un sismo con 475 años de período de retorno, el cual representa un nivel de desempeño de **resguardo de vida** o dicho de otra manera, se acepta un estado de **daño moderado**.

5.4. Definición de los Objetivos de Diseño.

- Deriva y amortiguamiento objetivo.

Según el capítulo 5 de *Multihazard Loss Estimation Methodology* HAZUS nuestra edificación en estudio clasifica como “Edificio aporticado de Concreto Armado de mediana altura”, descrito bajo la abreviatura de CM1.

Si se desea alcanzar un estado de **daño moderado** luego de ocurrido el sismo raro; desde el punto de vista estructural, debemos conseguir que la deriva máxima de nuestra edificación sea alrededor de **0.58%** siguiendo las recomendaciones del HAZUS para un código sísmico moderado.

El amortiguamiento viscoso de la demanda última se obtiene descontando el amortiguamiento inherente de la estructura de 5%. Se muestra, a continuación, una tabla con los factores hallados para lograr el desempeño deseado, de acuerdo a lo establecido en el capítulo 2.

Adicionalmente se muestra el amortiguamiento objetivo para un estado de **daño leve**, es decir que nuestra edificación logre un nivel de desempeño operacional.

Nivel de Daño Aceptado	Deriva Objetivo (‰)	Factor de Reducción (B)	Amortiguamiento Efectivo (β_{eff})	Amortiguamiento Viscoso (β_{visc})
Moderado	5.80	1.58	21.90%	16.90%
Leve	3.30	2.77	65.44%	60.44%

Tabla 5.9. Amortiguamiento efectivo y viscoso requerido en la dirección x

Nivel de Daño Aceptado	Deriva Objetivo (‰)	Factor de Reducción (B)	Amortiguamiento Efectivo (β_{eff})	Amortiguamiento Viscoso (β_{visc})
Moderado	5.80	1.49	18.78%	13.78%
Leve	3.30	2.62	60.21%	55.21%

Tabla 5.10. Amortiguamiento efectivo y viscoso requerido en la dirección y

Conseguir un amortiguamiento viscoso para daño leve del 60% no resulta factible en términos prácticos y económicos, por lo que decidimos elegir como sismo de diseño un sismo de 475 años de período de retorno con un **nivel aceptado de daño moderado**.

Por simplicidad en el procedimiento de cálculo estableceremos los siguientes porcentajes de amortiguamiento viscoso requerido:

$$\beta_{visc. X-X} = 18.0\% \quad ; \quad \beta_{visc. Y-Y} = 15.0\%$$

5.5. Ubicación de los dispositivos de amortiguamiento.

La presente tesis propone una disposición inicial tal que dos pórticos por cada dirección lleven dos columnas de amortiguadores Chevron en todos los niveles. Los pórticos a considerar son los más alejados del centro de masa, principalmente para controlar los efectos de torsión.

A continuación se muestran la distribución propuesta mediante gráficos obtenidos del programa ETABS:

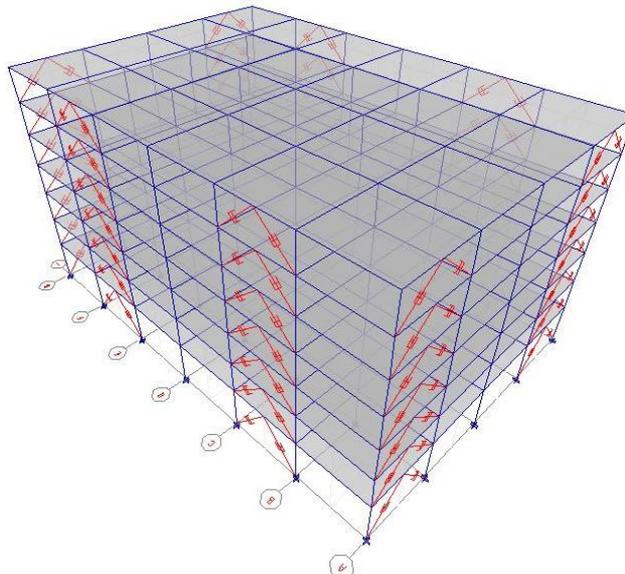


Figura 5.4. Ubicación de disipadores en disposición Chevron

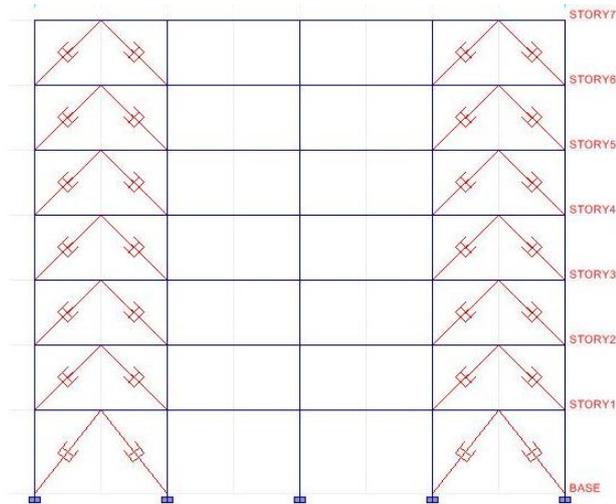


Figura 5.5. Ubicación de los disipadores en los pórticos A y G, dirección x

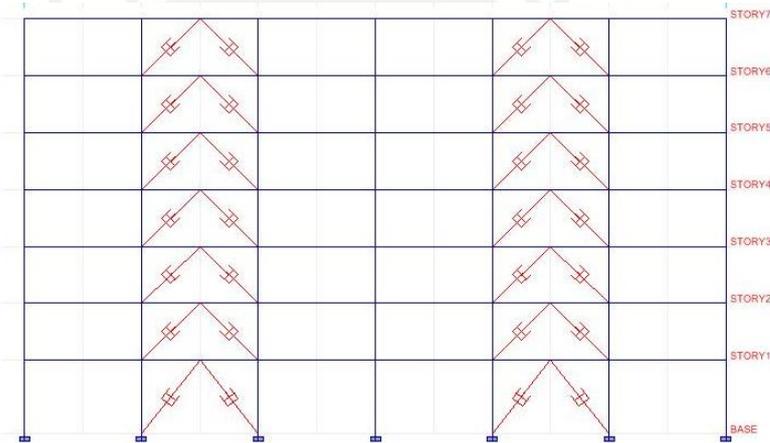


Figura 5.6. Ubicación de los Disipadores en los pórticos 1 y 5, dirección y

5.6. Estimación de los parámetros del sistema de amortiguamiento.

- Cálculo de rigidez “K”.

Se considera en el modelo inicial un perfil metálico para el brazo que contiene al amortiguador Round HSS 7.50 x 0.500, las propiedades se muestran en la tabla 5.11:

Dimensiones y Propiedades					
Perfil Metálico	Diám. Exterior (in)	Diám. Interior (in)	Espesor, t (in)	Area, A (in ²)	Inercia, I (in ⁴)
HSS 7.50 x 0.500	7.50	7.04	0.465	10.30	63.90

Tabla 5.11. Propiedades del perfil metálico

Con los datos del perfil se procede a calcular la rigidez del brazo metálico mediante la siguiente expresión:

$$K = \frac{E \cdot A}{L}$$

Las características especificadas para el cálculo son:

- Módulo de elasticidad del acero: $E_{ac} = 29\,000 \text{ ksi} = 20.0 \times 10^6 \text{ tn/m}^2$
- Área del perfil metálico: $A = 10.3 \text{ in}^2 = 66.45 \times 10^{-4} \text{ m}^2$

- Longitudes:
 - $L_{1^\circ \text{ nivel}} = 175.24 \text{ in} = 4.45 \text{ m}$
 - $L_{2^\circ-7^\circ \text{ nivel}} = 151.73 \text{ in} = 3.85 \text{ m}$

Con ello la rigidez del brazo metálico es:

$$K_{1^\circ \text{ nivel}} = 1,705 \text{ kip/in} = 29,966 \text{ tn/m}$$

$$K_{2^\circ-7^\circ \text{ nivel}} = 1,969 \text{ kip/in} = 34,607 \text{ tn/m}$$

- Coeficiente de Amortiguamiento.

De las ecuaciones presentadas en el acápite 2.5.4 para calcular el amortiguamiento efectivo se despejará el valor del Coeficiente de amortiguamiento C. El análisis se realizará para los dos primeros modos de vibración de la estructura considerando una disposición en Chevron.

Para valores de amortiguamiento $\beta_{\text{visc } X-X} = 18.0 \%$ y $\beta_{\text{visc } Y-Y} = 15.0\%$ y diferentes valores de coeficientes de velocidad α se obtuvieron los valores de C mostrados en la tabla a continuación:

Tipo de amortiguador	α	C $\text{tn} - (\text{s/m})^{1/\alpha}$
Lineal	1.00	500
No lineal	0.75	200
	0.50	80
	0.25	30

Tabla 5.12. Coeficiente de amortiguamiento del disipador en función de α

Los valores de C para $\alpha < 1$ se consideran iguales en las dos direcciones x e y a manera de simplificar el modelo y estandarizar los dispositivos. El formato de cálculo de los valores C_j se detallan a continuación:

Coefficiente de Amortiguamiento Lineal $\alpha = 1.0$

Modo Fundamental en X - X

T = 1.56 seg

Nivel	Forma Modal (Φ)	Masa (tn)	Cos θ ($\theta_1 = 51.84^\circ$; $\theta_2 = 44.47^\circ$)	$\sum \text{Cos}^2 \theta_j \times \Phi_{ij}^2$	$\sum m_i \times \Phi_i^2$
1	0.181	47	0.618	0.0124	1.54
2	0.375	60	0.714	0.0193	8.42
3	0.563	60	0.714	0.0179	18.94
4	0.726	60	0.714	0.0136	31.52
5	0.855	60	0.714	0.0085	43.71
6	0.946	60	0.714	0.0041	53.42
7	1.000	60	0.714	0.0015	60.44
				0.0774	218.0

$\beta_{\text{eff}} = 21.90\%$

$\beta_{\text{inh}} = 5.00\%$

$\beta_{\text{visc}} = 16.90\%$ **18.00%**

T = 1.56 seg

$\sum C = 4092 \text{ tn} \cdot (\text{s/m})$

Nº disipadores por nivel = 8 disipadores

$C_{\text{amortiguamiento}} = 512$ **500 tn · (s/m)**

Modo Fundamental en Y - Y

T = 1.51 seg

Nivel	Forma Modal (Φ)	Masa (tn)	Cos θ ($\theta_1 = 51.84^\circ$; $\theta_2 = 44.47^\circ$)	$\sum \text{Cos}^2 \theta_j \times \Phi_{ij}^2$	$\sum m_i \times \Phi_i^2$
1	0.184	47	0.618	0.0129	1.60
2	0.379	60	0.714	0.0194	8.60
3	0.568	60	0.714	0.0180	19.24
4	0.730	60	0.714	0.0134	31.83
5	0.858	60	0.714	0.0083	43.96
6	0.947	60	0.714	0.0040	53.56
7	1.000	60	0.714	0.0014	60.44
				0.0776	219.2

$\beta_{\text{eff}} = 18.78\%$

$\beta_{\text{inh}} = 5.00\%$

$\beta_{\text{visc}} = 13.78\%$ **15.00%**

T = 1.51 seg

$\sum C = 3518 \text{ tn} \cdot (\text{s/m})$

Nº disipadores por nivel = 8 disipadores

$C_{\text{amortiguamiento}} = 440$ **500 tn · (s/m)**

Coefficiente de Amortiguamiento No Lineal $\alpha = 0.50$

Modo Fundamental en X - X

T = 1.56 seg

Nivel	Forma Modal (Φ)	Masa (tn)	Cos θ ($\theta_1= 51.84^\circ$; $\theta_2=44.47^\circ$)	$\sum \text{Cos}^{(1+\alpha)} \theta_j \times \Phi_{ij}^{(1+\alpha)}$	$\sum m_i \times \Phi_i^2$
1	0.181	47	0.618	0.0372	1.54
2	0.375	60	0.714	0.0518	8.42
3	0.563	60	0.714	0.0490	18.94
4	0.726	60	0.714	0.0398	31.52
5	0.855	60	0.714	0.0279	43.71
6	0.946	60	0.714	0.0163	53.42
7	1.000	60	0.714	0.0077	60.44
				0.230	218.0

$\alpha = 0.50$
 $\beta_{\text{eff}} = 21.90\%$
 $\beta_{\text{inh}} = 5.00\%$
 $\beta_{\text{visc}} = 16.90\%$ **18.00%**
T = 1.56 seg
 $\omega^{(2-\alpha)} = 8.111 \text{ rad/seg}$
 $A^{(1-\alpha)} = 0.264$
 $\lambda = 3.496$
 $\sum C = 658 \text{ tn} - (\text{s/m})^{1/0.5}$
N° disipadores por nivel = 8 disipadores
 $C_{\text{amortiguamiento}} = 82$ **80 tn - (s/m)^{1/0.5}**

Modo Fundamental en Y - Y

T = 1.51 seg

Nivel	Forma Modal (Φ)	Masa (tn)	Cos θ ($\theta_1= 51.84^\circ$; $\theta_2=44.47^\circ$)	$\sum \text{Cos}^{(1+\alpha)} \theta_j \times \Phi_{ij}^{(1+\alpha)}$	$\sum m_i \times \Phi_i^2$
1	0.184	47	0.618	0.0383	1.60
2	0.379	60	0.714	0.0521	8.60
3	0.568	60	0.714	0.0492	19.24
4	0.730	60	0.714	0.0394	31.83
5	0.858	60	0.714	0.0276	43.96
6	0.947	60	0.714	0.0160	53.56
7	1.000	60	0.714	0.0074	60.44
				0.230	219.2

$\alpha = 0.50$
 $\beta_{\text{eff}} = 18.78\%$
 $\beta_{\text{inh}} = 5.00\%$
 $\beta_{\text{visc}} = 13.78\%$ **15.00%**
T = 1.51 seg
 $\omega^{(2-\alpha)} = 8.461 \text{ rad/seg}$
 $A^{(1-\alpha)} = 0.264$
 $\lambda = 3.496$
 $\sum C = 574 \text{ tn} - (\text{s/m})^{1/0.5}$
N° disipadores por nivel = 8 disipadores
 $C_{\text{amortiguamiento}} = 72$ **80 tn - (s/m)^{1/0.5}**

5.7. Respuesta de la estructura con sistemas de amortiguamiento.

5.7.1. Amortiguadores Lineales.

Reducción de derivas.

Se procede a verificar si los disipadores propuestos en cantidad, ubicación y características cumplieron efectivamente en reducir la deriva.

Las tablas 5.13 y 5.14 muestran las derivas obtenidas para los amortiguadores lineales $\alpha = 1$ con un valor de $C = 500$ para cada dirección.

	Sismo 66 17 de Octubre 1966		Sismo 70 31 de Mayo 1970		Sismo 74 3 de Octubre 1974	
	N08E	N82W	N08E	N82W	N08E	N82W
Planta 7	0.85	0.71	0.96	0.79	0.81	1.49
Planta 6	1.56	1.31	1.75	1.49	1.51	2.65
Planta 5	2.21	1.90	2.52	2.14	2.09	3.86
Planta 4	2.65	2.33	3.07	2.54	2.46	4.84
Planta 3	3.00	2.58	3.34	2.92	2.65	5.45
Planta 2	3.41	2.76	3.50	3.07	2.79	5.54
Planta 1	2.91	2.03	2.67	2.52	2.42	3.99

Tabla 5.13. Derivas (‰) en la dirección x para amortiguadores lineales con $\alpha = 1.00$

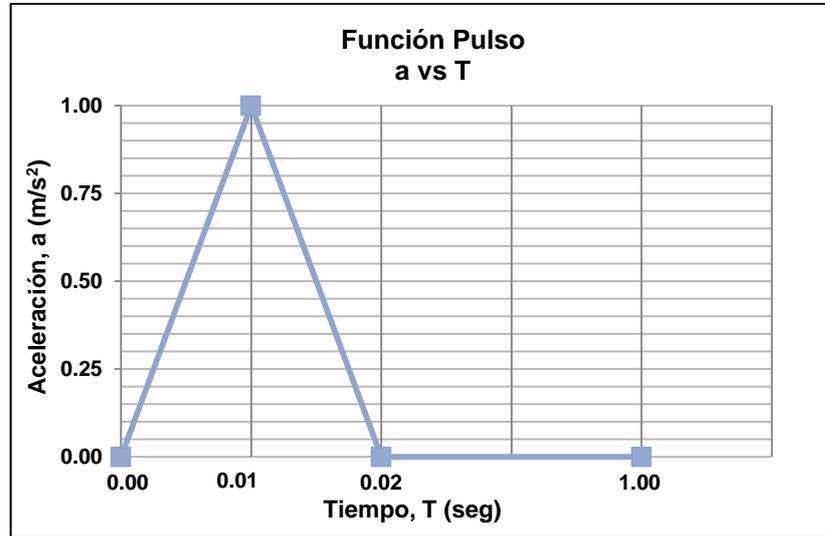
	Sismo 66 17 de Octubre 1966		Sismo 70 31 de Mayo 1970		Sismo 74 3 de Octubre 1974	
	N08E	N82W	N08E	N82W	N08E	N82W
Planta 7	0.80	0.68	0.91	0.79	0.79	1.43
Planta 6	1.50	1.28	1.68	1.51	1.50	2.58
Planta 5	2.13	1.87	2.45	2.19	2.09	3.79
Planta 4	2.56	2.29	2.98	2.62	2.47	4.77
Planta 3	2.90	2.51	3.28	2.86	2.68	5.41
Planta 2	3.30	2.66	3.46	2.98	2.81	5.59
Planta 1	2.87	2.00	2.69	2.47	2.47	4.11

Tabla 5.14. Derivas (‰) en la dirección y para amortiguadores lineales con $\alpha = 1.00$

Se aprecia que los valores máximos de derivas para amortiguadores lineales son de **0.56%** en ambas direcciones, valor inclusive menor a la deriva objetivo establecida para daño moderado de **0.58%**.

- Ensayo de vibración libre.

Sometemos a la estructura a una prueba de vibración libre con el fin de verificar que el amortiguamiento viscoso resultante sea el amortiguamiento que se estableció como objetivo.



Se calcula el decremento logarítmico δ para obtener el amortiguamiento efectivo.

Expresando los desplazamientos obtenidos para la función pulso en relación al tiempo t_i y $t_i + nT$ y relacionándolos con la ecuación de decremento logarítmico podemos obtener el porcentaje de amortiguamiento:

$$\delta = \ln \left(\frac{x(t_i)}{x(t_i + nT)} \right) = \frac{2n\pi\varepsilon}{\sqrt{1 - \varepsilon^2}}$$

En la figura 5.7 se muestra la curva tiempo vs desplazamiento en el último nivel de la estructura para amortiguadores lineales.

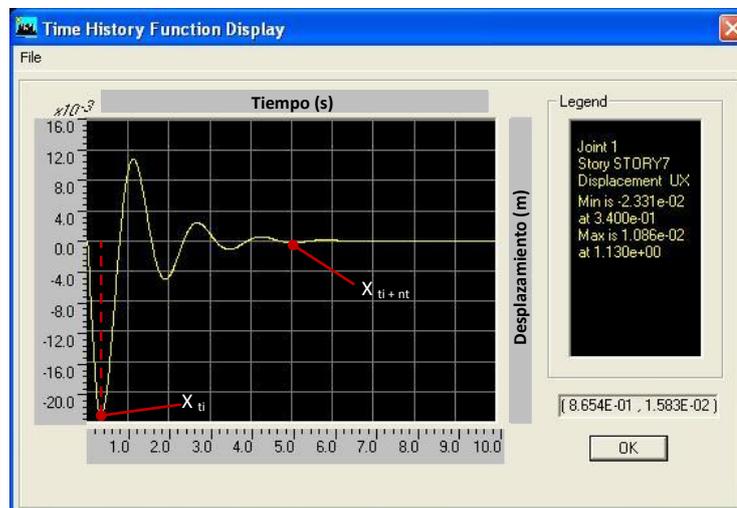


Figura 5.7. Curva tiempo vs desplazamiento para amortiguadores lineales con $\alpha = 1.00$

De la gráfica anterior se obtienen los valores $x(t_i)$ y $x(t_i + nt)$ para un número de ciclos “n” de 3; con estos valores y la fórmula mostrada se obtuvo un valor de amortiguamiento efectivo de:

$$\beta_{eff} = 24.06\%$$

Finalmente, considerando 5% de amortiguamiento inherente (β_0) se obtuvo:

$$\beta_{viscx-x} = \beta_{eff} - \beta_0 = 19.06\%$$

Con ello se comprueba que la estructura tiene un amortiguamiento inclusive mayor al objetivo de 18%, de esta manera se da por verificado el diseño del coeficiente “C”.

- Balance de Energía:

El porcentaje de disipación de energía del sistema de amortiguamiento se estima mediante la siguiente relación:

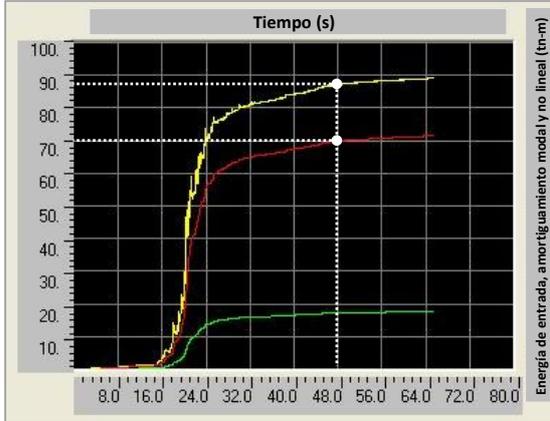
$$\% \text{ disipación de energía} = \frac{E. \text{ del sistema de amortiguamiento}}{E. \text{ del sismo}}$$

Los valores a extraer de las deben ser representativos siguiendo la tendencia de las curvas para un determinado tiempo t.

A continuación se presentan los gráficos de energía para cada uno de los registros sísmicos; así como, los porcentajes de disipación respectivos. La energía de entrada viene representada por el color amarillo, y las energías de amortiguamiento inherente a la estructura y la de los dispositivos adicionados mediante los colores verde y rojo respectivamente.

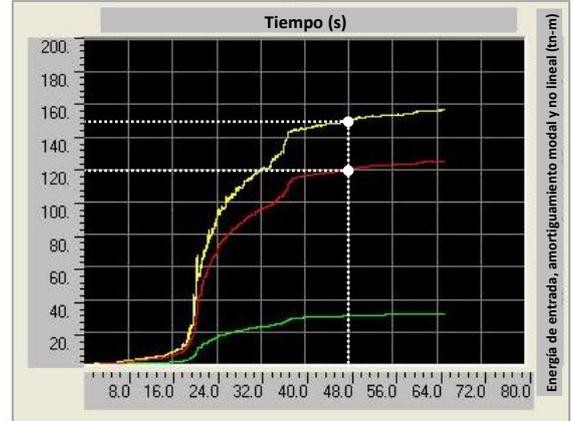
Se concluye de estos que la disipación de energía promedio con amortiguadores lineales se aproxima al 80%. Este alto porcentaje de disipación se debe principalmente a la numerosa cantidad de amortiguadores fluido – viscosos con los que se cuenta en la estructura y afirma la efectividad de los mismos ante un evento sísmico.

Porcentaje de disipación: $\frac{70.7}{88.4} = 80.0\%$



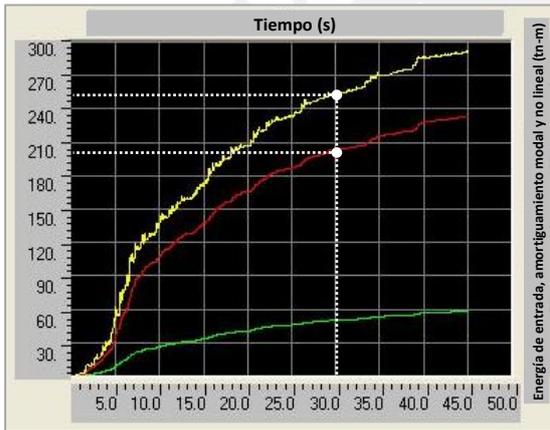
Registro S6610N08E

Porcentaje de disipación: $\frac{121.6}{151.7} = 80.1\%$



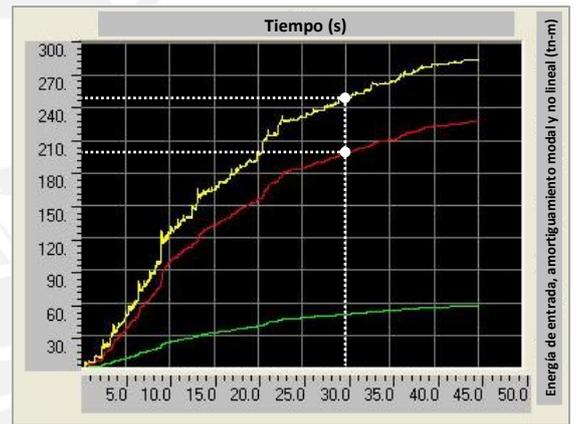
Registro S6610N82W

Porcentaje de disipación: $\frac{203.0}{254.7} = 79.7\%$



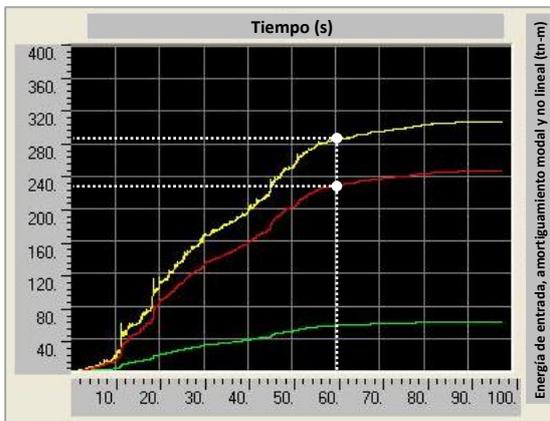
Registro S7005N08E

Porcentaje de disipación: $\frac{210.8}{263.8} = 79.9\%$



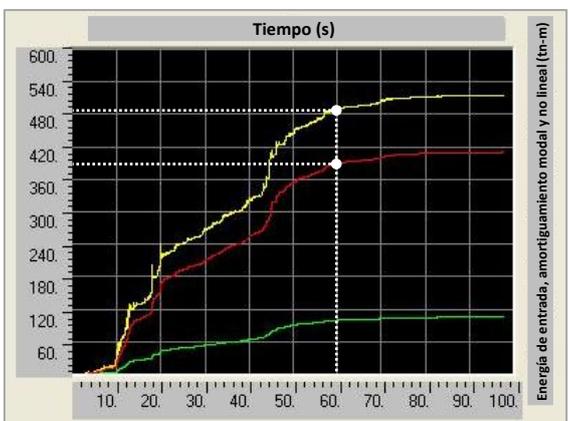
Registro S7005N82W

Porcentaje de disipación: $\frac{236.2}{294.8} = 80.1\%$



Registro S7410N08E

Porcentaje de disipación: $\frac{408.6}{512.1} = 79.8\%$



Registro S7410N82W

Figura 5.8. Gráficos de energía para amortiguadores lineales con $\alpha = 1.00$

- Comportamiento Histerético.

A continuación se muestra la curva de histéresis del amortiguador lineal con el objetivo de mostrar su tendencia elíptica. Así también, mediante el área de la curva, se puede observar la importante disipación de energía que proporcionan los disipadores fluido-viscosos.

Los gráficos mostrados en la figura 5.9 pertenecen al disipador ubicado en el pórtico A segundo nivel para cada registro sísmico.

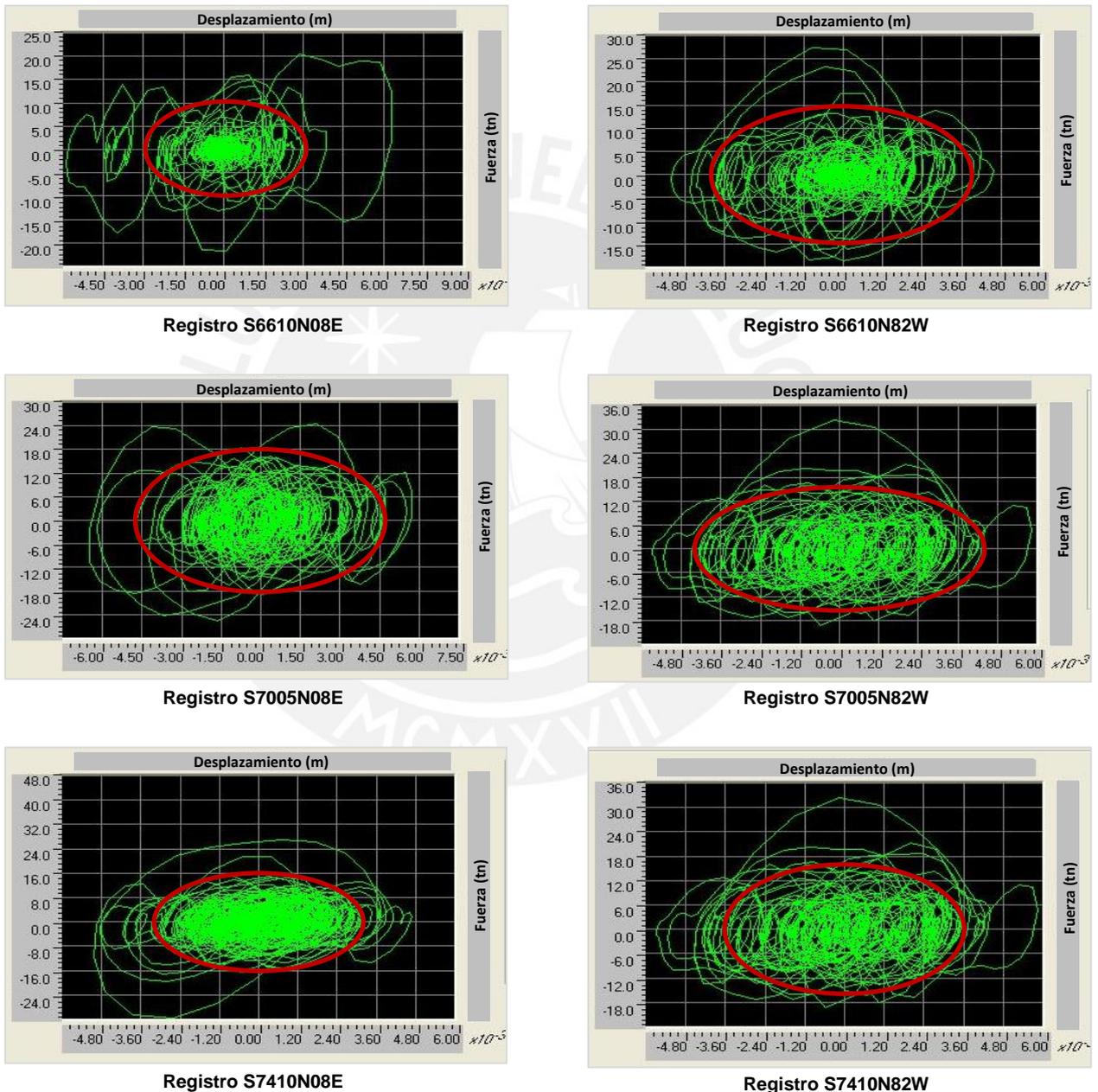


Figura 5.9. Curvas de histéresis para amortiguadores lineales con $\alpha = 1.00$

5.7.2. Amortiguadores No - Lineales.

- Reducción de derivas.

Las tablas 5.15 y 5.16 muestran las derivas obtenidas para los amortiguadores no lineales $\alpha = 0.50$ con un valor de $C = 80$ para cada dirección.

	Sismo 66 17 de Octubre 1966		Sismo 70 31 de Mayo 1970		Sismo 74 3 de Octubre 1974	
	N08E	N82W	N08E	N82W	N08E	N82W
Planta 7	0.80	0.64	0.94	0.89	0.89	1.52
Planta 6	1.57	1.25	1.80	1.77	1.64	2.79
Planta 5	2.30	1.82	2.62	2.51	2.33	4.08
Planta 4	2.74	2.27	3.10	2.88	2.71	5.03
Planta 3	3.02	2.52	3.58	2.89	2.80	5.59
Planta 2	3.44	2.53	3.82	2.97	2.98	5.72
Planta 1	2.98	1.79	2.87	2.24	2.52	4.07

Tabla 5.15. Derivas (‰) en la dirección x para amortiguadores no lineales con $\alpha = 0.50$

	Sismo 66 17 de Octubre 1966		Sismo 70 31 de Mayo 1970		Sismo 74 3 de Octubre 1974	
	N08E	N82W	N08E	N82W	N08E	N82W
Planta 7	0.71	0.57	0.84	0.84	0.82	1.39
Planta 6	1.49	1.18	1.69	1.74	1.59	2.66
Planta 5	2.23	1.77	2.50	2.54	2.29	3.94
Planta 4	2.66	2.24	3.01	2.97	2.69	4.94
Planta 3	2.92	2.52	3.55	3.04	2.82	5.58
Planta 2	3.31	2.55	3.84	3.01	2.97	5.75
Planta 1	2.88	1.85	2.93	2.21	2.49	4.20

Tabla 5.16. Derivas (‰) en la dirección y para amortiguadores no lineales con $\alpha = 0.50$

Se aprecia que los valores máximos de derivas para amortiguadores no lineales con $\alpha = 0.50$ son de aproximadamente **0.58%** en ambas direcciones.

Se concluye que tanto para amortiguadores lineales y no lineales se consigue prácticamente la misma reducción en la deriva.

- Ensayo de vibración libre.

Sometemos a la estructura a una prueba de vibración libre con el fin de verificar que el amortiguamiento viscoso resultante sea el amortiguamiento que se estableció como objetivo como en el caso de amortiguadores lineales.

En la figura 5.10 se muestra la curva tiempo vs desplazamiento en el último nivel de la estructura para amortiguadores no lineales con $\alpha = 0.50$.

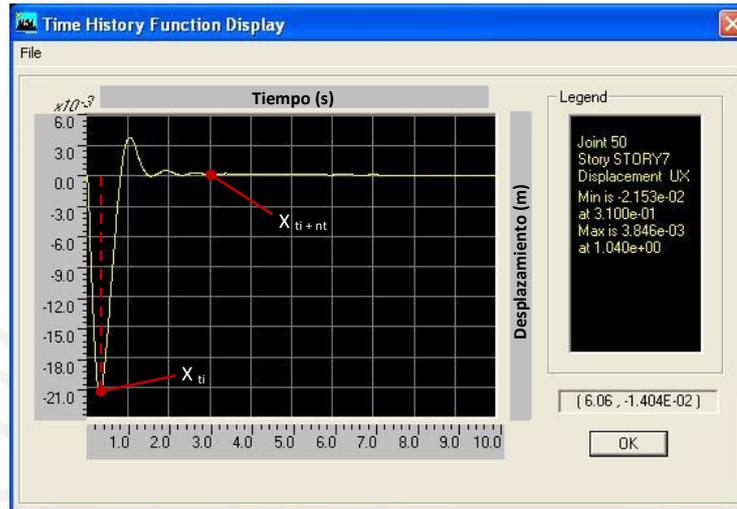


Figura 5.10. Curva tiempo vs desplazamiento para amortiguadores no lineales con $\alpha = 0.50$

De la gráfica anterior se obtienen los valores $x(t_i)$ y $x(t_i + nt)$ para un número de ciclos “n” de 3; con estos valores se obtuvo un valor de amortiguamiento efectivo de:

$$\beta_{eff} = 26.1\%$$

Finalmente, considerando 5% de amortiguamiento inherente (β_0) se obtuvo:

$$\beta_{viscx-x} = \beta_{eff} - \beta_0 = 21.01\%$$

Con ello se comprueba positivamente que la estructura tiene un amortiguamiento inclusive mayor al objetivo de 18%.

- Balance de Energía:

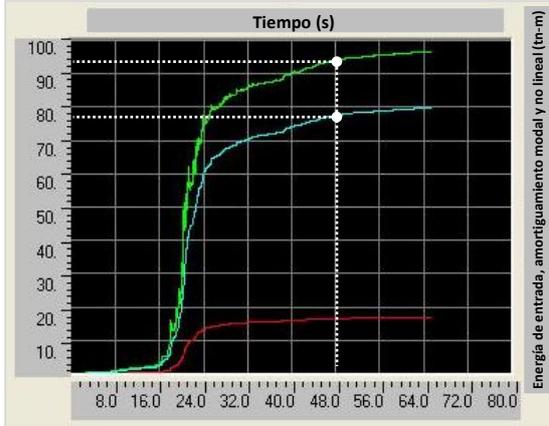
La participación de los dispositivos en la disipación de energía de entrada se analiza a través de los gráficos de energía.

La energía de entrada viene representada por el color verde, y las energías de amortiguamiento inherente a la estructura y la de los dispositivos adicionales mediante los colores rojo y celeste respectivamente.

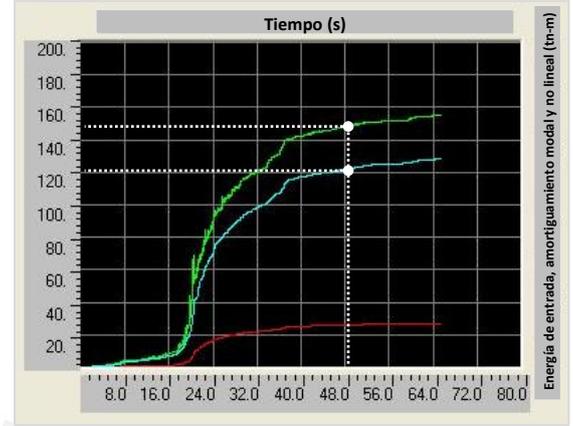
A continuación se presentan estos gráficos para cada uno de los registros sísmicos; así como, los porcentajes de disipación respectivos. Se aprecia que son los dispositivos adicionales los que toman la mayor cantidad de energía de entrada.

Porcentaje de disipación: $\frac{77.2}{94.0} = 82.1\%$

Porcentaje de disipación: $\frac{122.4}{148.3} = 82.6\%$



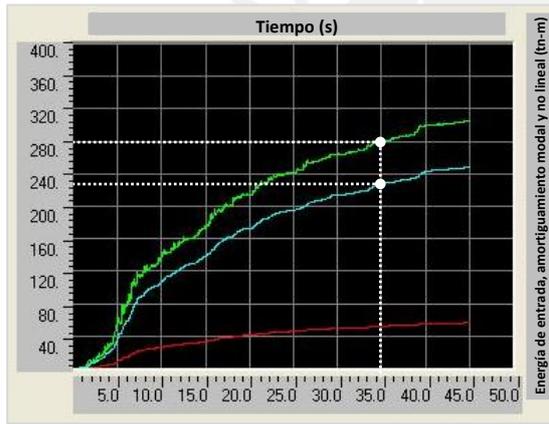
Registro S6610N08E



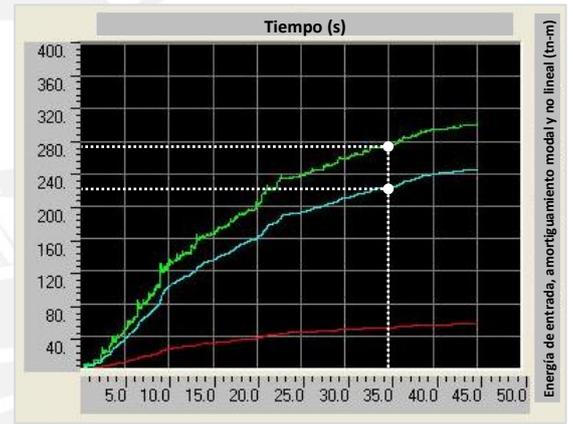
Registro S6610N82W

Porcentaje de disipación: $\frac{227.6}{279.3} = 81.5\%$

Porcentaje de disipación: $\frac{222.4}{274.1} = 81.1\%$



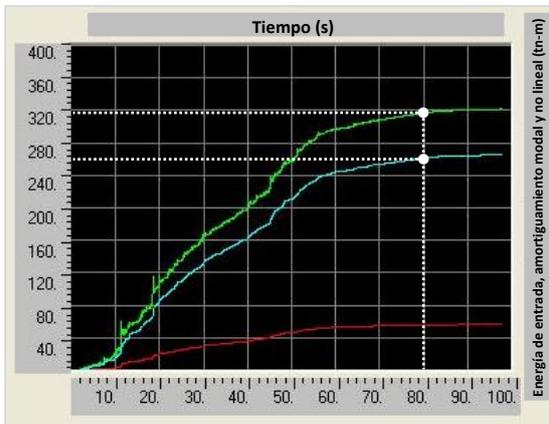
Registro S7005N08E



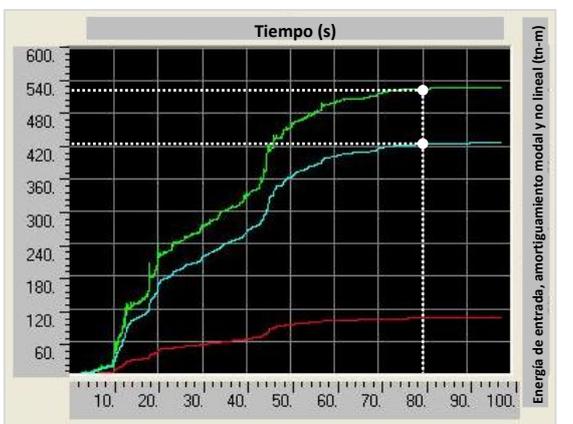
Registro S7005N82W

Porcentaje de disipación: $\frac{262.1}{315.5} = 83.1\%$

Porcentaje de disipación: $\frac{424.1}{525.0} = 80.8\%$



Registro S7410N08E



Registro S7410N82W

Figura 5.11. Gráficos de energía para amortiguadores no lineales con $\alpha = 0.50$

- Comportamiento Histerético.

A continuación se muestra la curva de histéresis del amortiguador no lineal $\alpha = 0.50$ con el objetivo de mostrar su tendencia semi - elíptica. Así también, mediante el área de la curva, se puede observar la importante disipación de energía que proporcionan los disipadores fluido-viscosos.

Los gráficos mostrados en la figura 5.12 pertenecen al disipador ubicado en el segundo nivel del pórtico A para cada registro sísmico.

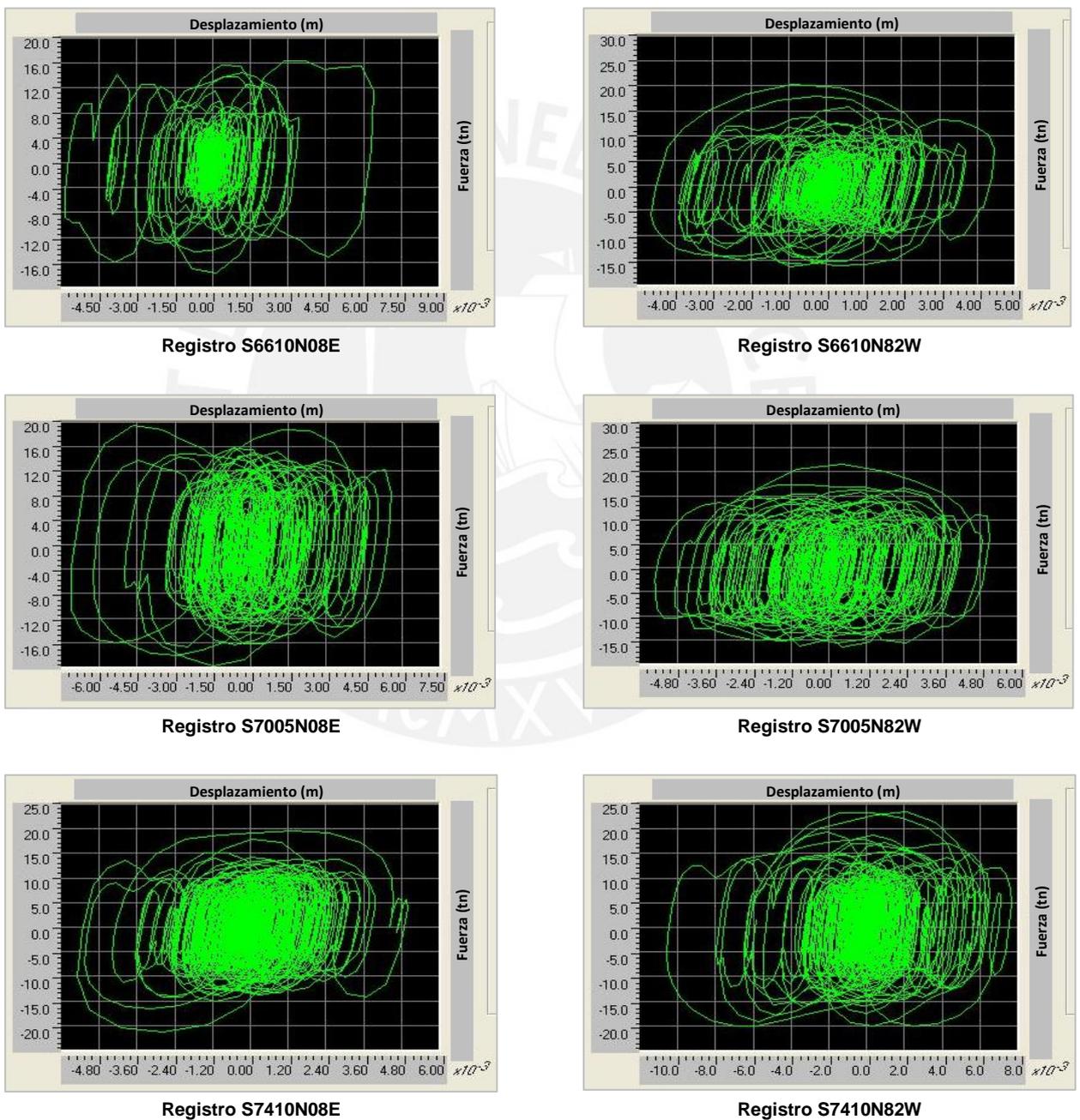


Figura 5.12. Curvas de histéresis para amortiguadores no lineales con $\alpha = 0.50$

5.8. Evaluación de resultados.

Se presentan resultados comparativos para todas las alternativas; es decir, amortiguadores lineales y no lineales referentes al sismo de 1974 por ser el que ocasiona la mayor deriva en la estructura.

- Derivas de entrepiso.

El porcentaje de reducción de derivas es similar tanto para amortiguadores lineales como no lineales, logrando su más alto valor en el último nivel de aprox. 70% y disminuyendo conforme la altura del edificio desciende hasta un aprox. de 40% en ambas direcciones.

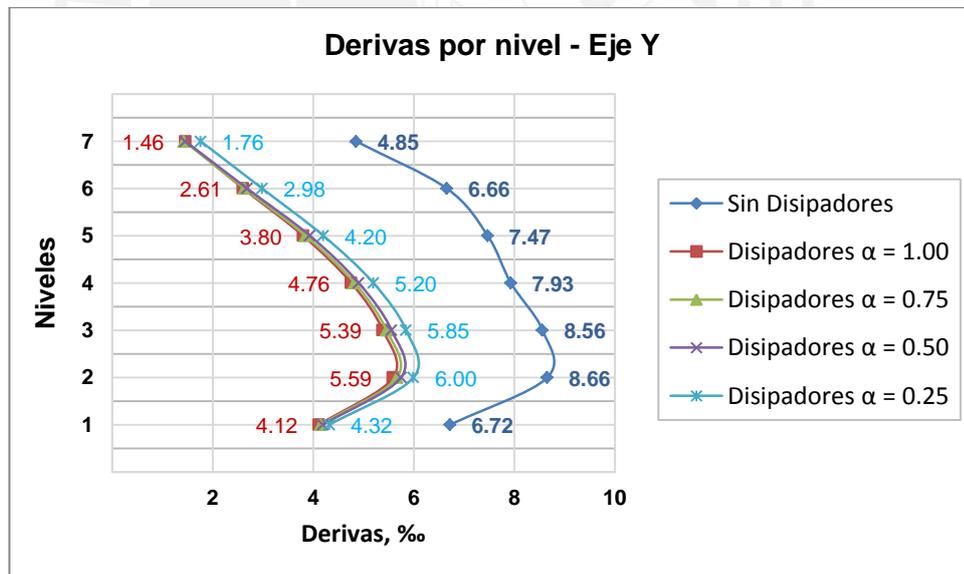
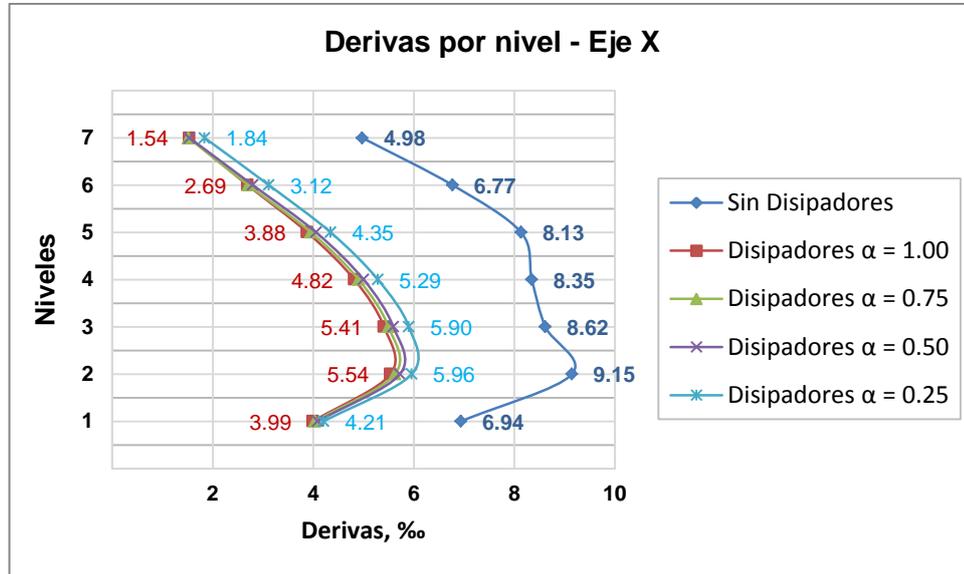
Nivel	Sin Disipador	Disipadores Lineales		Disipadores No Lineales					
		$\alpha = 1.00$	% Reduc.	$\alpha = 0.75$	% Reduc.	$\alpha = 0.50$	% Reduc.	$\alpha = 0.25$	% Reduc.
7	4.98	1.54	69%	1.52	70%	1.54	69%	1.84	63%
6	6.77	2.69	60%	2.71	60%	2.80	59%	3.12	54%
5	8.13	3.88	52%	3.95	51%	4.06	50%	4.35	47%
4	8.35	4.82	42%	4.90	41%	5.00	40%	5.29	37%
3	8.62	5.41	37%	5.50	36%	5.59	35%	5.90	32%
2	9.15	5.54	39%	5.62	39%	5.72	37%	5.96	35%
1	6.94	3.99	42%	4.04	42%	4.09	41%	4.21	39%

Tabla 5.17. Porcentaje de reducción de derivas en la dirección x para el sismo de 1974

Nivel	Sin Disipador	Disipadores Lineales		Disipadores No Lineales					
		$\alpha = 1.00$	% Reduc.	$\alpha = 0.75$	% Reduc.	$\alpha = 0.50$	% Reduc.	$\alpha = 0.25$	% Reduc.
7	4.85	1.46	70%	1.43	71%	1.45	70%	1.76	64%
6	6.66	2.61	61%	2.63	61%	2.69	60%	2.98	55%
5	7.47	3.80	49%	3.85	48%	3.93	47%	4.20	44%
4	7.93	4.76	40%	4.82	39%	4.91	38%	5.20	34%
3	8.56	5.39	37%	5.46	36%	5.56	35%	5.85	32%
2	8.66	5.59	35%	5.67	35%	5.75	34%	6.00	31%
1	6.72	4.12	39%	4.15	38%	4.19	38%	4.32	36%

Tabla 5.18. Porcentaje de reducción de derivas en la dirección y para el sismo de 1974

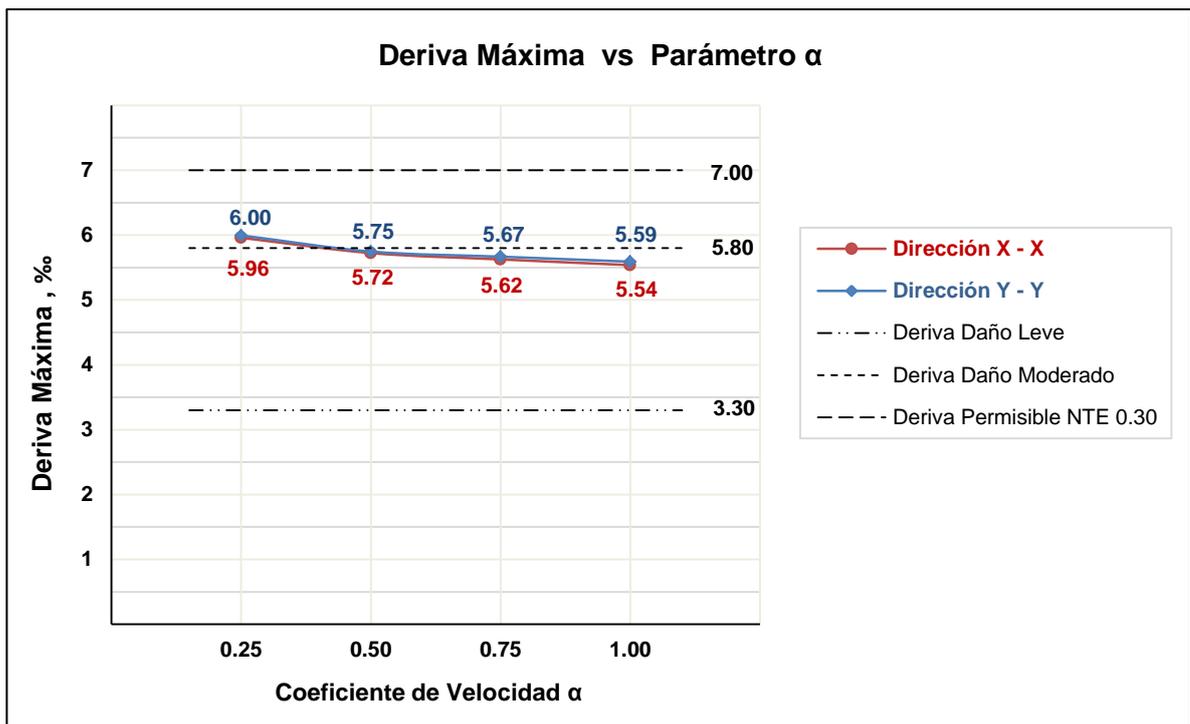
En el siguiente gráfico se puede apreciar un comparativo entre las derivas por piso para el edificio sin y con sistema de amortiguamiento para las diferentes alternativas propuestas



Con respecto a las derivas máximas se observa que con el uso de amortiguadores fluido-viscosos lineales o no lineales estas son muy cercanas a la deriva objetivo de 0.58%.

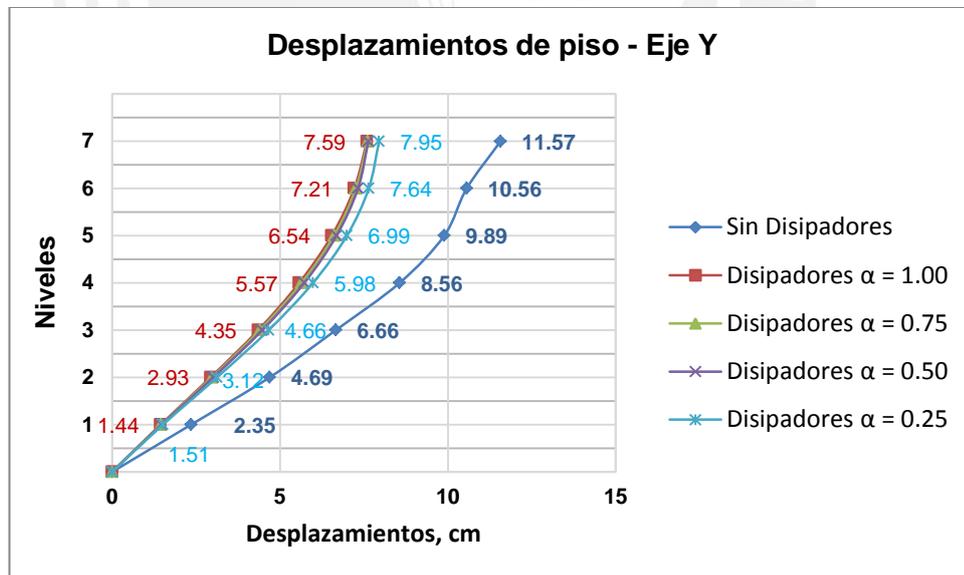
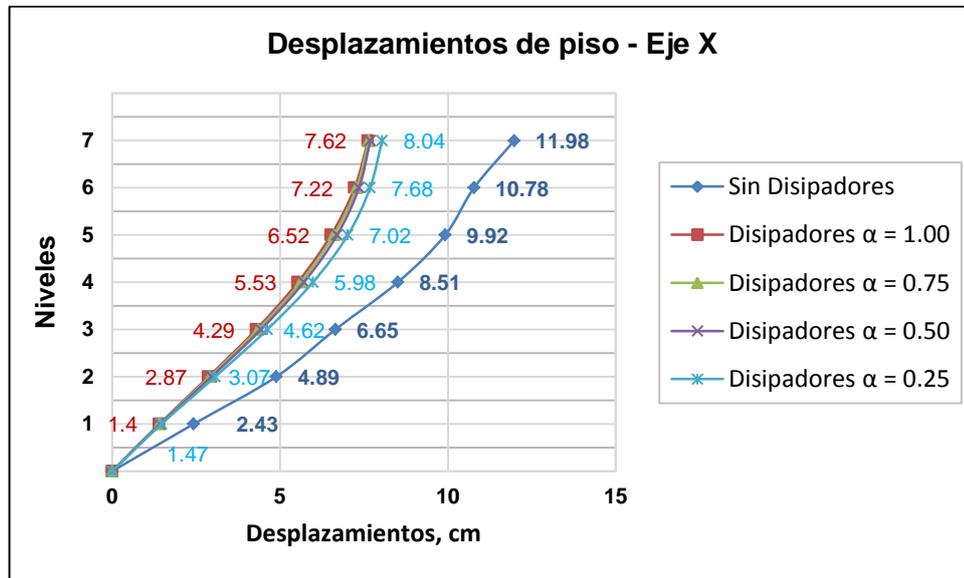
La tendencia de la curva se aproxima a una línea recta y se debe a que la fórmula de amortiguamiento efectivo relaciona el coeficiente de velocidad α con el valor de la constante de amortiguamiento C, por lo que si variamos el valor de α , el valor de C también varía.

Así para diferentes valores de α se tendrán derivas máximas muy cercanas entre sí.

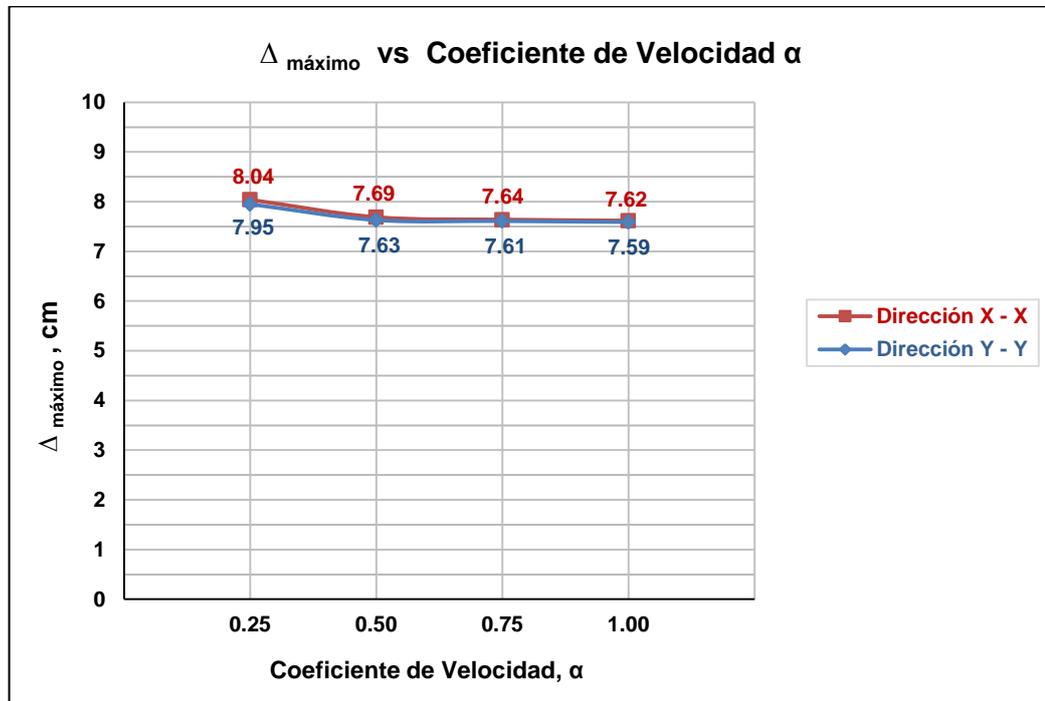


- Desplazamientos de piso.

La aplicación de amortiguadores reduce los desplazamientos de piso en un rango de 36% a 40% para ambas direcciones como se puede apreciar en las gráficas a continuación.



Se muestra también una gráfica con los desplazamientos máximos en función del coeficiente de velocidad α , donde se observa la misma tendencia lineal.



- Disipación de energía.

Según lo muestran los gráficos de energía para amortiguadores lineales como no lineales es similar, el porcentaje de disipación es similar en ambos casos.

Para el caso de amortiguadores lineales la disipación de energía es en promedio 80% mientras que para amortiguadores no lineales del 82%, en ambos casos los altos porcentajes de disipación se deben a la gran cantidad de dispositivos en la estructura, es por ello que se recomienda la optimización del diseño.

- Fuerza vs velocidad.

Las siguientes gráficas muestran que para un valor de $\alpha = 1.0$ (Amortiguador Lineal), la velocidad relativa de los extremos del dissipador es proporcional a la fuerza del amortiguador y demuestran la eficiencia de amortiguadores no lineales con $\alpha < 1.0$ puesto que para una pequeña velocidad relativa estos pueden aumentar la fuerza de amortiguamiento.

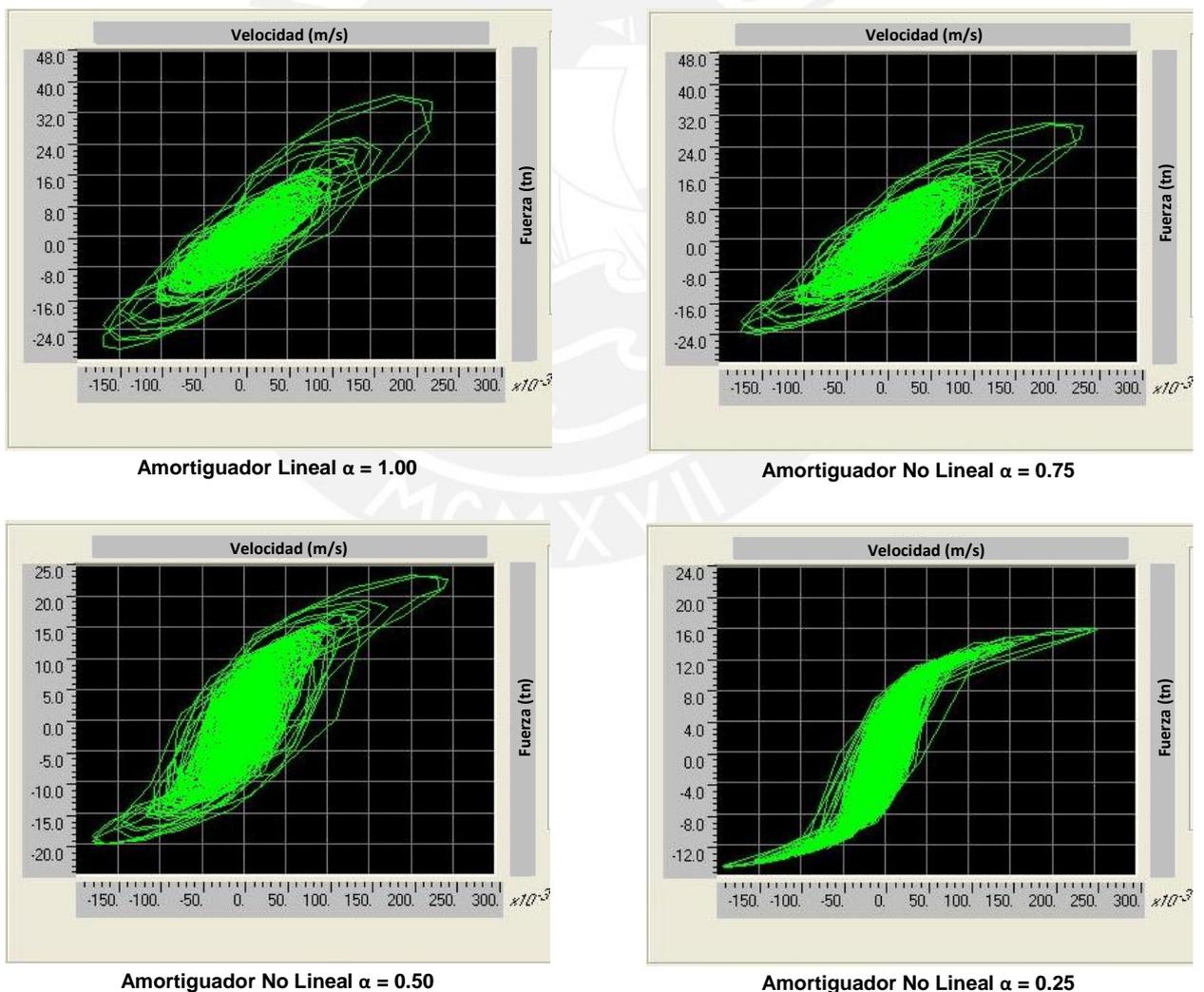
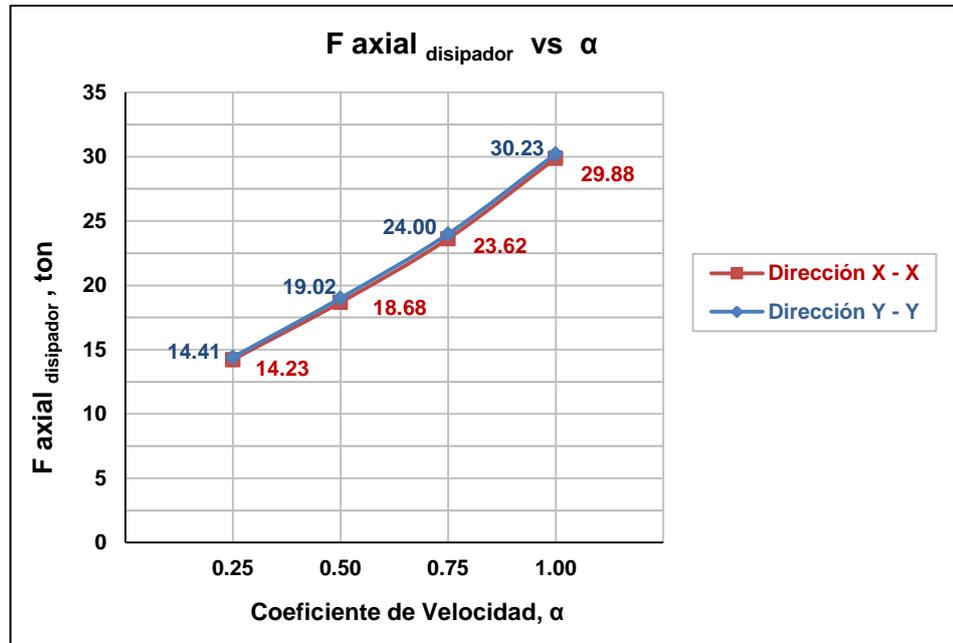


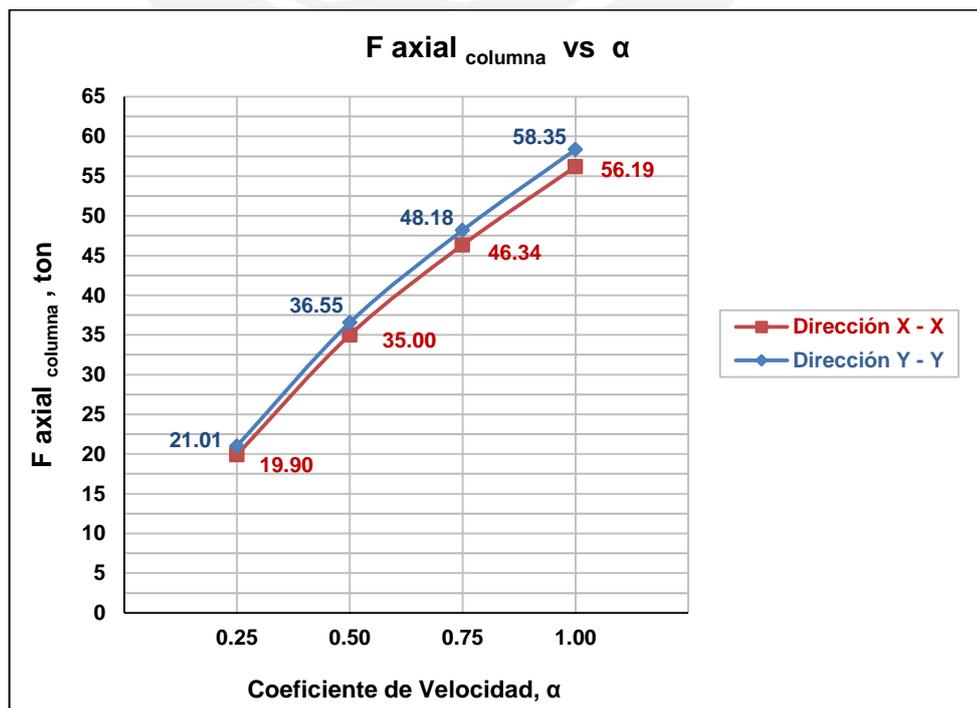
Figura 5.13. Curvas de fuerza vs velocidad

- Fuerzas máximas en disipadores y elementos adyacentes.

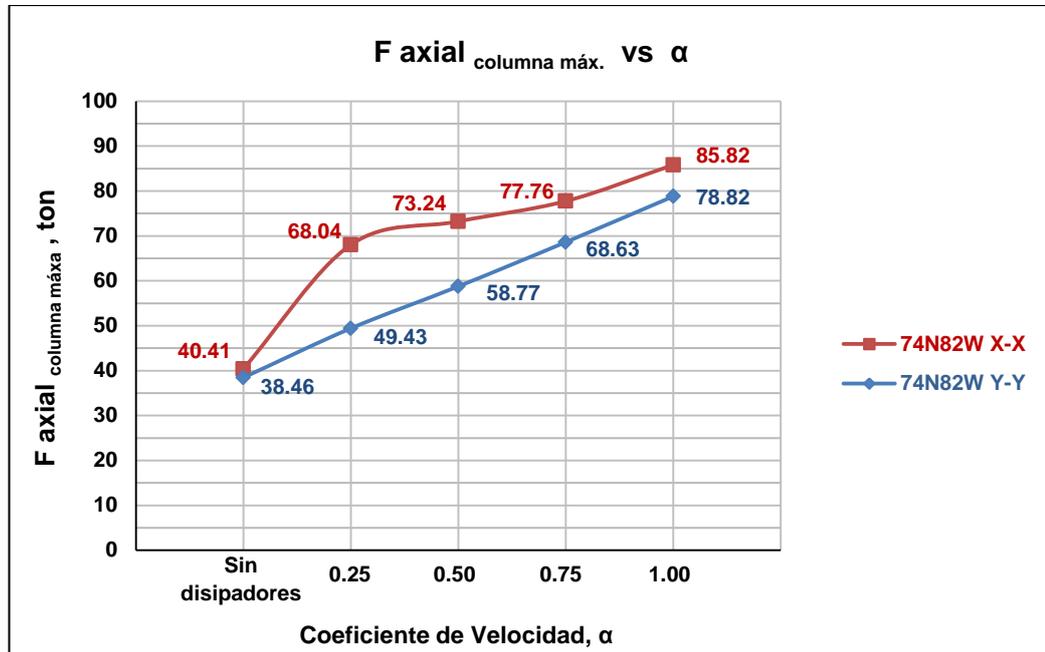
Se tomaron las fuerzas máximas en un disipador de la estructura del primer nivel y los esfuerzos en la columna adyacente al mismo; se observa en la gráfica que a menores valores de α se presentan menores fuerzas en los dispositivos, demostrando que un sistema no-lineal presenta una mejora en el desempeño sismo-resistente con una mayor eficiencia.



Adicionalmente es importante ver que se cumple el equilibrio en la estructura y que las columnas absorben las fuerzas que transmiten los disipadores. Estas fuerzas para el valor de α elegido permiten que no haya un sobredimensionamiento de las columnas y de esta manera un ahorro económico.

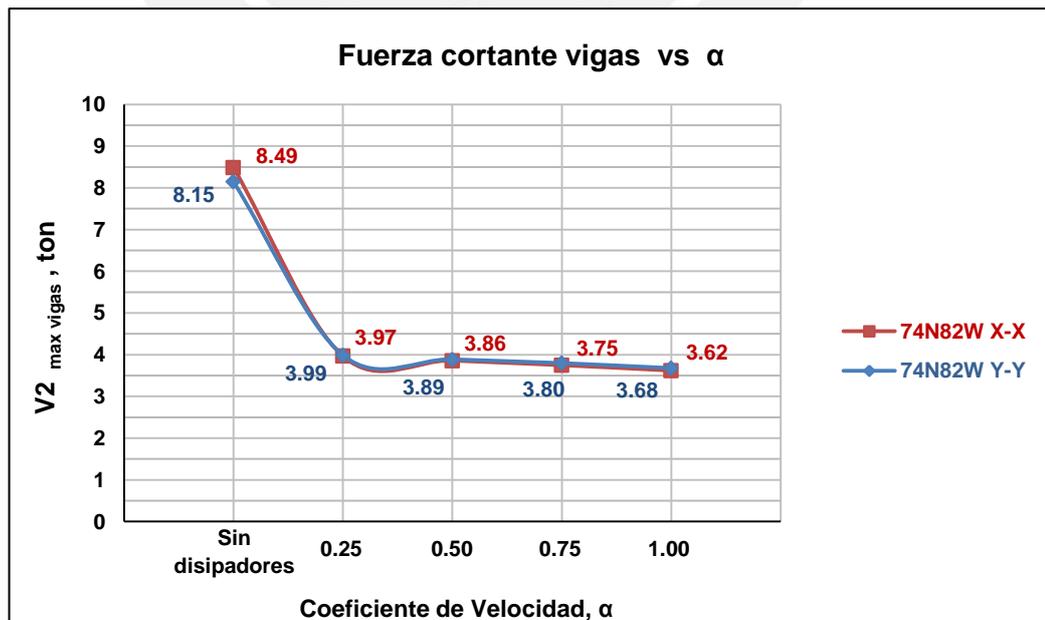


Finalmente, se muestra la gráfica con la fuerza máxima en una columna durante todo el evento sísmico para cada alternativa propuesta incluyendo la del edificio sin disipadores. Las fuerzas mencionadas se producen en el primer nivel de la estructura.

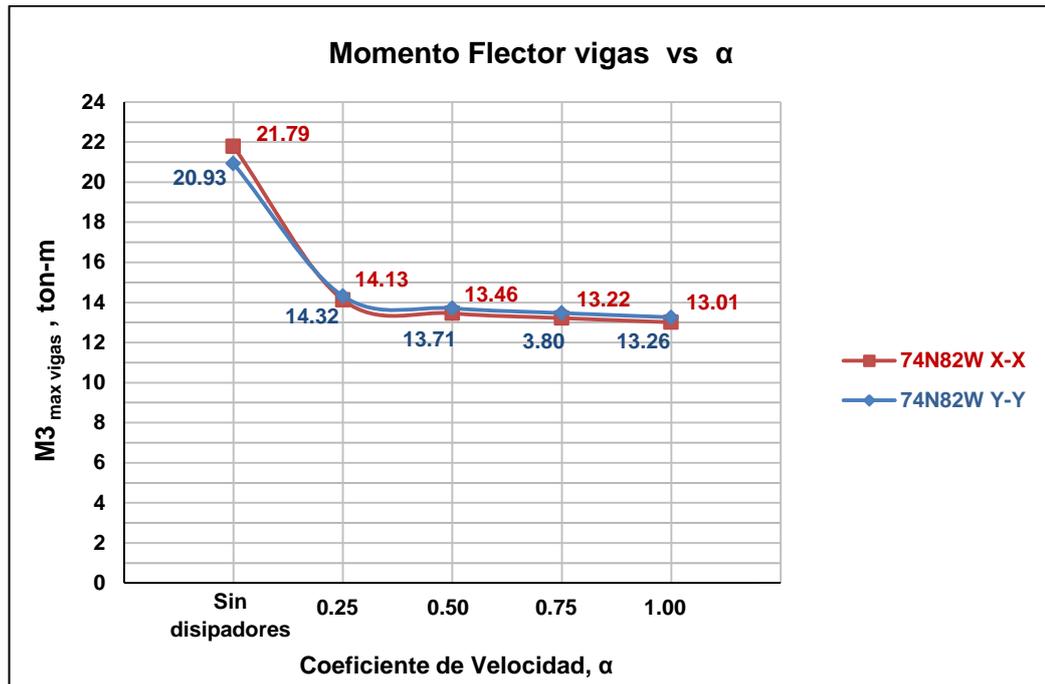


La efectividad de los amortiguadores no-lineales se verifica con la reducción del 24% de la fuerza máxima axial en columnas en comparación con el uso de amortiguadores lineales.

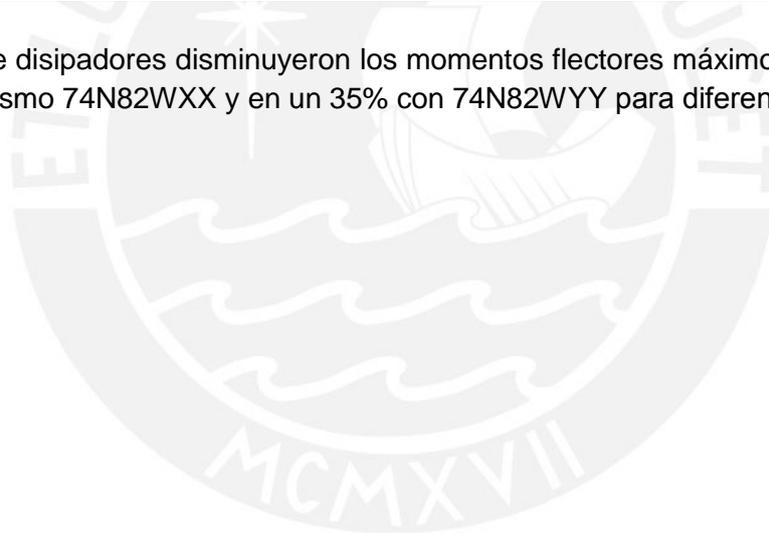
A continuación se presentan las fuerzas cortantes y momentos flectores máximos durante todo el evento sísmico en una viga del segundo nivel.



Con el uso de disipadores disminuyeron las fuerzas cortantes máximas en aproximadamente 55% con el sismo 74N82WXX y en un 53% con 74N82WYY para diferentes valores de α.



Con el uso de disipadores disminuyeron los momentos flectores máximos en aproximadamente 38% con el sismo 74N82WXX y en un 35% con 74N82WYY para diferentes valores de α .



5.9. Propuesta diseño final.

La elección de la mejor alternativa será básicamente la que presente menores fuerzas tanto en los dispositivos de amortiguamiento como en los elementos adyacentes. Según lo expuesto en el acápite anterior, esto se consigue mediante el empleo de amortiguadores no lineales ($\alpha < 1$)

Para las alternativas presentadas correspondería utilizar amortiguadores no lineales con un valor de $\alpha = 0.25$. Con el objeto de optimizar nuestro diseño, luego de varias iteraciones, se reduce la cantidad de dispositivos a 4 por nivel con un incremento en el coeficiente de amortiguamiento C a $90 \text{ tn} - (\text{s/m})^2$.

- Ubicación de dispositivos.

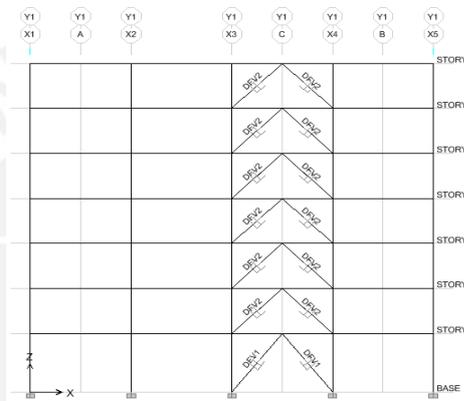


Figura 5.14. Ubicación de los disipadores en los pórticos A y G. Dirección X-X

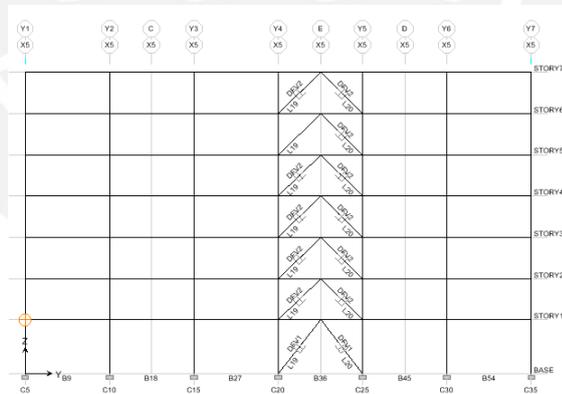


Figura 5.15. Ubicación de los Disipadores en los pórticos 1 y 5. Dirección Y-Y

- Características de los dispositivos.

Coeficiente de velocidad: $\alpha = 0.25$
 Coeficiente de amortiguamiento: $C = 90 \text{ tn} - (\text{s/m})^{1/0.5}$
 Brazo metálico: HSS 7.50 x 0.375

Con ello la rigidez del brazo metálico es:

$$\begin{aligned}
 K_{1^\circ \text{ nivel}} &= 1,297 \text{ kip/in} = 23,187 \text{ tn/m} \\
 K_{2^\circ-7^\circ \text{ nivel}} &= 1,498 \text{ kip/in} = 26,801 \text{ tn/m}
 \end{aligned}$$

- Derivas Máximas.

Dirección X - X: 5.6 ‰

Dirección Y - Y: 5.5 ‰

- Agrupación de dispositivos por niveles de fuerza.

Dirección X-X	Disipador	Fuerza Axial (Ton)	Fuerza Axial (KN)	Fuerza de diseño	
				(KN)	(Kip)
Nivel 7	L21 y L22	32.9	329	500	110
	L23 y L24	33.0	330	500	110
Nivel 6	L21 y L22	40.1	401	500	110
	L23 y L24	40.1	401	500	110
Nivel 5	L21 y L22	45.6	456	500	110
	L23 y L24	45.6	456	500	110
Nivel 4	L21 y L22	47.1	471	500	110
	L23 y L24	47.1	471	500	110
Nivel 3	L21 y L22	48.9	489	500	110
	L23 y L24	49.1	491	500	110
Nivel 2	L21 y L22	48.5	485	500	110
	L23 y L24	48.6	486	500	110
Nivel 1	L21 y L22	48.5	485	500	110
	L23 y L24	48.6	486	500	110

Tabla 5.19. Fuerzas de diseño para los disipadores. Dirección X-X

Dirección Y-Y	Disipador	Fuerza Axial (ton)	Fuerza Axial (KN)	Fuerza de diseño	
				(KN)	(Kip)
Nivel 7	L17 y L18	32.6	326	500	110
	L19 Y L20	32.6	326	500	110
Nivel 6	L17 y L18	39.7	397	500	110
	L19 Y L20	40.1	401	500	110
Nivel 5	L17 y L18	46.1	461	500	110
	L19 Y L20	46.1	461	500	110
Nivel 4	L17 y L18	46.8	468	500	110
	L19 Y L20	46.9	469	500	110
Nivel 3	L17 y L18	48.5	485	500	110
	L19 Y L20	48.4	484	500	110
Nivel 2	L17 y L18	48.5	485	500	110
	L19 Y L20	48.5	485	500	110
Nivel 1	L17 y L18	48.4	484	500	110
	L19 Y L20	48.3	483	500	110

Tabla 5.20. Fuerzas de diseño para los disipadores. Dirección Y-Y

Se están usando **56** disipadores fluido viscosos en disposición Chevron con una fuerza de diseño de **500 KN**.

Según la información proporcionada por fabricantes locales, el costo de los disipadores fluido – viscosos hoy en día en el Perú tiene un valor aproximado de 30 dólares por m².

5.10. Diseño de los dispositivos de Amortiguamiento.

Tomando en consideración los resultados del diseño final propuesto y con la información obtenida de la tabla 5.21 podemos definir las propiedades de los dispositivos con ayuda de la información proporcionada por los diversos fabricantes.

El principal fabricante de los dispositivos de amortiguamiento es la marca de origen estadounidense TAYLOR DEVICES INC, líder desde 1955 en tecnología de shock y absorción, la cual produce y distribuye en todo el mundo sus exclusivos amortiguadores fluido – viscosos para ingeniería estructural antisísmica para la protección de edificios, puentes, estructuras de carácter patrimonial entre otras.

A continuación se muestra un formato propuesto por TAYLOR el cual incluye también las dimensiones necesarias para el uso de la placa base de los dispositivos.

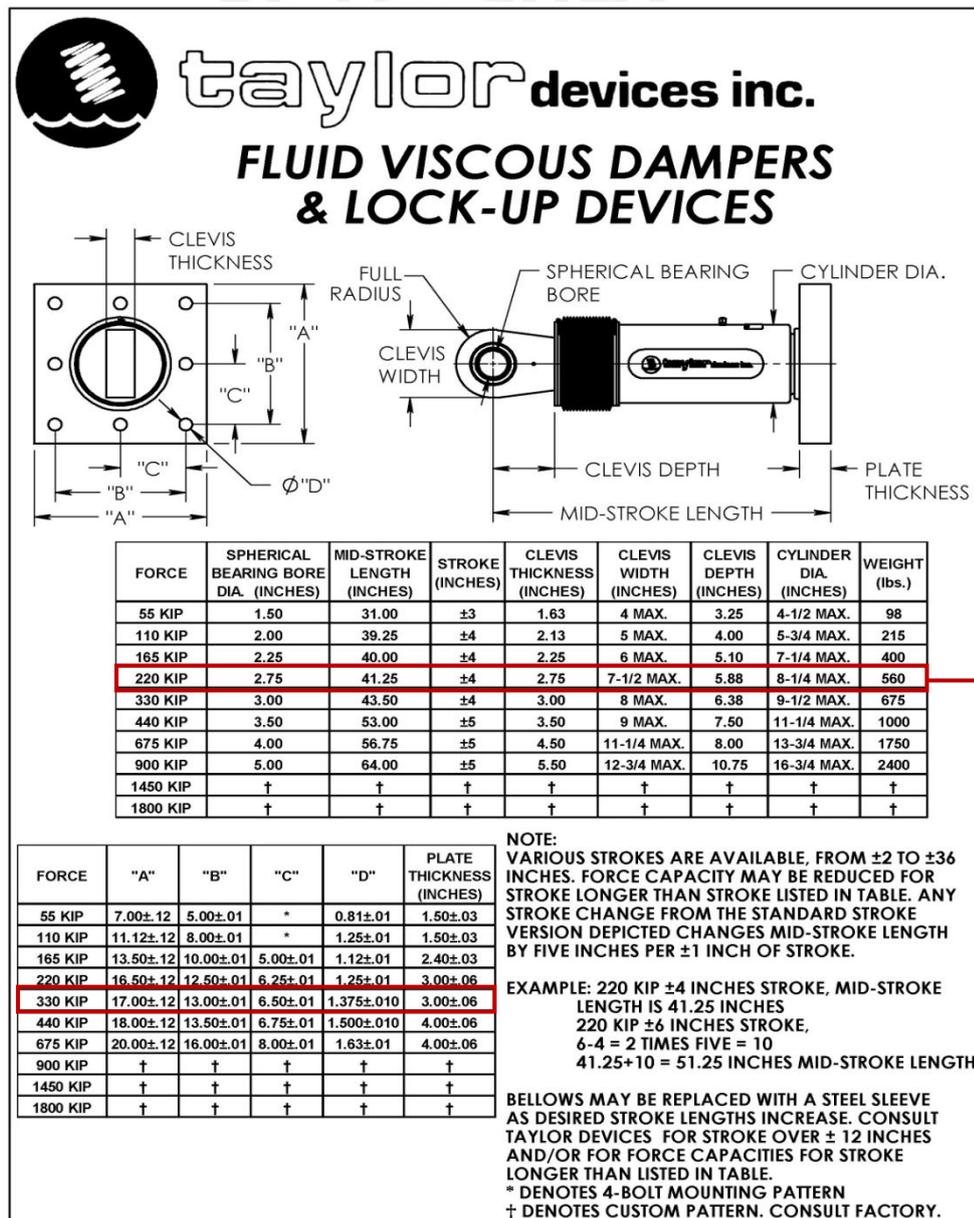


Tabla 5.21. Propiedades de los dispositivos y dimensiones de la placa base. TAYLOR DEVICES

El diseñador deberá brindar los valores de fuerzas obtenidas normalizadas a los valores estándar del mercado (500KN) los cuales cuentan con su propio Factor de Seguridad con lo que no se requerirá de ninguna amplificación adicional.

Force	Spherical Bearing Bore Dia. (inches)	Mid – Stroke Length (inches)	Stroke (inches)	Clevis Thickness (inches)	Clevis Width (inches)	Clevis Depth (inches)	Cylinder. Dia. (inches)	Weight (lbs)
110 KIP	2.00	39.25	± 4	2.13	5 MAX	4.00	5 - 3/4 MAX	215.00

Tabla 5.22. Propiedades del dispositivo de amortiguación

Force	"A" (inches)	"B" (inches)	"C" (inches)	"D" (inches)	PLATE THICKNESS (inches)
110 KIP	11.12 ± 12	8.00 ± 01	*	1.25 ± 01	1.50 ± 03

* Corresponde a una disposición de cuatro pernos.

Tabla 5.23. Características de la placa base

5.11. Diseño del Brazo Metálico.

Los disipadores fluido-viscosos se encuentran contenidos dentro de perfiles metálicos, su importancia de diseño radica en la variable “K” a emplear dentro del modelamiento. Se considera la rigidez del brazo metálico como la rigidez del sistema de amortiguamiento por ser mucho mayor a la rigidez de la diagonal del disipador.

A continuación se muestra una tabla con las propiedades del brazo metálico seleccionado:



DIMENSIONS AND SECTION PROPERTIES OF ROUND HSS




Nominal Size		Weight per Foot	Wall Thickness t	D/t	Cross Sectional Area					Torsional Stiffness Constant J	Torsional Shear Constant C	Surface Area Per Foot
Outside Diameter	Wall					I	S	r	Z			
in.	in.	lb.	in.		in. ²	in. ⁴	in. ³	in.	in. ³	in. ⁴	in. ³	ft. ²
7.625	x 0.375	29.06	0.349	21.8	7.98	52.9	13.9	2.58	18.5	106	27.8	2.00
	0.328	25.59	0.305	25.0	7.01	47.1	12.3	2.59	16.4	94.1	24.7	2.00
	0.125	10.02	0.116	65.7	2.74	19.3	5.06	2.66	6.54	38.6	10.1	2.00
7.500	x 0.500	37.42	0.465	16.1	10.3	63.9	17.0	2.49	23.0	128	34.1	1.96
	0.375	28.56	0.349	21.5	7.84	50.2	13.4	2.53	17.9	100	26.8	1.96
	0.312	23.97	0.291	25.8	6.59	42.9	11.4	2.55	15.1	85.8	22.9	1.96
	0.250	19.38	0.233	32.2	5.32	35.2	9.37	2.57	12.3	70.3	18.7	1.96
7.000	x 0.500	34.74	0.465	15.1	9.55	51.2	14.6	2.32	19.9	102	29.3	1.83
	0.375	26.56	0.349	20.1	7.29	40.4	11.6	2.35	15.5	80.9	23.1	1.83
	0.312	22.31	0.291	24.1	6.13	34.6	9.88	2.37	13.1	69.1	19.8	1.83
	0.250	18.04	0.233	30.0	4.95	28.4	8.11	2.39	10.7	56.8	16.2	1.83
	0.188	13.69	0.174	40.2	3.73	21.7	6.21	2.41	8.11	43.5	12.4	1.83
0.125	9.19	0.116	60.3	2.51	14.9	4.25	2.43	5.50	29.7	8.49	1.83	

Tabla 5.24. Propiedades geométricas del perfil HSS 7.500 x 0.375

Las características especificadas para el diseño son:

- Área del perfil metálico: $A = 7.84 \text{ in}^2$
- Radio del perfil metálico: $r = 2.49 \text{ in}$
- Longitud de diseño: $L_{2^{\circ}\text{-}7^{\circ} \text{ nivel}} = 151.7 \text{ in}$
- Módulo de elasticidad del acero: $E_{ac} = 29\,000 \text{ ksi}$
- Esfuerzo de fluencia: $F_y = 35 \text{ ksi}$
- Resistencia en tensión: $F_u = 50 \text{ ksi}$

Con ello tenemos:

$$F_e = \frac{\pi^2 * E}{\left(\frac{L}{r}\right)^2} = \frac{\pi^2 * 29000}{\left(\frac{151.7}{2.49}\right)^2} = 77.1 \text{ ksi}$$

$$F_{cr} = \left(0.658 \frac{F_y}{F_e}\right) * F_y = \left(0.658 \frac{35}{77.11}\right) * 35 = 28.9 \text{ ksi}$$

$$\phi P_n = \phi * F_{cr} * A = 0.9 * 28.9 * 7.84 = 204.2 \text{ kips} = 92.6 \text{ Tn}$$

$$\phi T_n = \phi * F_y * A = 0.9 * 35 * 7.84 = 246.9 \text{ kips} = 112 \text{ Tn}$$

Con estos valores se comprueba satisfactoriamente:

$$\phi P_n = 92.6 \text{ Tn} > P_u = 50 \text{ Tn}$$

$$\phi T_n = 112 \text{ Tn} > T_u = 50 \text{ Tn}$$

Adicionalmente se requerirá el diseño de planchas y/o anclajes destinados a las uniones del sistema. Si bien es cierto aún no se cuenta con mano de obra especializada que pueda instalar los dispositivos, a la fecha hay compañías que se contactan del extranjero que brindan asesoría al respecto, por lo que comprobamos la factibilidad de su uso.

CAPITULO 6 CONCLUSIONES

Respecto de la metodología.

- En este trabajo se empleó una metodología de diseño basada en el control del daño por medio del control de los desplazamientos laterales.

Respecto al desempeño y la deriva

- Según la información existente y las características del edificio estudiado, la deriva asociada a daño leve y moderado es del orden de 0.33% y 0.58% respectivamente.
- Los resultados del estudio muestran que para mantener la deriva del edificio en un sismo raro, por debajo del umbral de daño leve (0.33%), sería necesario incluir en el sistema un amortiguamiento del orden del 60%. Este nivel de amortiguamiento es imposible de conseguir en términos prácticos y normativos.
- Como objetivo de desempeño se fijó que el daño estuviera por debajo del umbral de daño moderado. Esto se logró incorporando al edificio un amortiguamiento adicional del 18% y 15% en la dirección X y Y respectivamente.

Respecto de modelo analítico.

- Para calcular la respuesta en el tiempo fue necesario obtener las propiedades dinámicas del edificio empleando Vectores de Ritz en lugar de vectores y valores propios. Esto se debe a que para capturar los efectos locales es necesario incorporar las tendencias de vibración propias de los dispositivos. El sistema se trató con 3 coordenadas dinámicas por piso además de las correspondientes a movimiento de los disipadores.
- Para estimar el amortiguamiento general se empleó un ensayo de vibración libre simulado en el computador mediante un pulso inicial muy corto. Los resultados son coincidentes con las expresiones empleadas para definir las constantes de los dispositivos.

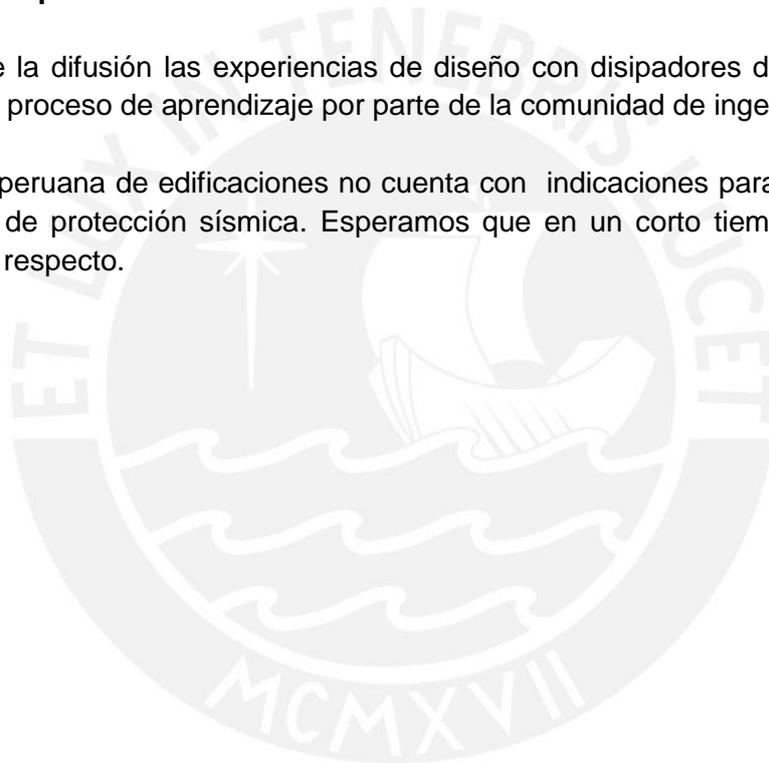
Respecto a los resultados del diseño.

- Se probaron disipadores lineales ($\alpha = 1$) y no lineales ($\alpha = 0.25, 0.50, 0.75$). Para cada valor de α se obtuvo el valor de la constante de amortiguamiento C necesaria para lograr la deriva objetivo. En todos los casos se logró reducir la deriva de 0.92% a 0.59% para el sismo de diseño de 475 años de periodo de retorno.
- Para el rango de valores $\alpha = 1$ a 0.25 las fuerzas axiales en los disipadores variaron de 30 a 14 ton. Para este mismo rango de valores de α , los desplazamientos se mantuvieron prácticamente constantes en 7.7 cm debido a que en todos los casos las constantes C se calcularon para lograr el mismo desplazamiento objetivo.

- Para el rango de valores $\alpha = 1$ a 0.25 las fuerzas axiales máximas en las columnas variaron de 86 a 40 ton. Para este mismo rango de valores de α , las fuerzas cortantes y momentos flectores en vigas se reducen en un 50% y 35% respectivamente en comparación con una edificación sin disipadores de energía.
- Para los amortiguadores no lineales con $\alpha = 0.25$ se obtuvieron los menores fuerzas tanto en los disipadores como en las columnas adyacentes a estos dispositivos.
- Para estimar el coeficiente de amortiguamiento en los disipadores (C) se emplearon expresiones sencillas basadas en el modo fundamental de vibración. Los resultados del análisis tiempo - historia, mostraron que los valores de "C" así obtenidos fueron apropiados.

Respecto a las posibilidades futuras

- Se sugiere la difusión las experiencias de diseño con disipadores de energía con el fin de acelerar el proceso de aprendizaje por parte de la comunidad de ingenieros en el país.
- La norma peruana de edificaciones no cuenta con indicaciones para el diseño de sistemas modernos de protección sísmica. Esperamos que en un corto tiempo se pueda incluir un capítulo al respecto.



REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

1. ALBARRACÍN, Patricia y Eduardo Jesús GALLO. *Desempeño Sísmico de un edificio aporticado de siete pisos diseñado con el reglamento nacional de construcciones y aceptando una deriva máxima de 1%*. Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú, 2010 (Tesis).
2. CHEN, Franklin et al. *Smart Structures, Innovative Systems for Seismic Response Control*. New York: Taylor & Francis Group, 2008.
3. DOUGLAS, Taylor. *Seismic Dampers for the Torre Mayor Project*. New York: Taylor Devices Inc.
4. Engineers, American Society of Civil ASCE 7-10. *Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures*. Reston, 2010.
5. Federal Emergency Management Agency FEMA . *Commentary on the Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings – NEHRP*. FEMA273 - 274. Washington, D.C., 1997.
6. Federal Emergency Management Agency FEMA. *Multihazard Loss Estimation Methodology Hazus*. Washington, D.C.
7. HWANG, Jenn-Shin. *Seismic Design of Structures with Viscous Dampers*. Taiwan.
8. MUÑOZ PELAEZ, Alejandro. *Ingeniería Sismorresistente*. Lima: Fondo Editorial de la Pontificia Universidad Católica del Perú, 2009.
9. OVIEDO, Juan Andrés y María del Pilar DUQUE. *Sistemas de control de respuesta sísmica en edificaciones*. EIA, 2006. pp. 105-120.
10. OVIEDO, Ricardo. *Dispositivos pasivos de disipación de energía para diseño sismorresistente de estructuras*. Lima: UNI, 2008 (Tesis de Maestría).
11. Reglamento Nacional de Construcciones RNC. *Norma Técnica de Edificación NTE-E.020. Norma de Cargas*. Lima: 2006.
12. Servicio Nacional de Normalización, Capacitación e Investigación para la Industria de la Construcción SENCICO. *Norma Técnica de Edificación NTE-E030. Diseño Sismorresistente*. Lima: 2006.
13. Structural Engineers Association of California SEAOC. *Recommended Lateral Force Requirements and Commentary (The Blue Book)*. California: 1995.
14. Taboada, José. *Análisis de diseño asistido por computadoras*. Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú, 2009 (Tesis).
15. ZEVALLOS, Javier, Marcial BLONDET y Alejandro MUÑOZ. *Estado del Arte en protección sísmica*. Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú. pp. 1-11.