



UNIVERSIDAD DON VASCO A.C.

Incorporación No. 8727-15
a la Universidad Nacional Autónoma de México.

Escuela de Ingeniería Civil.

**DISEÑO DE DISIPADORES TIPO ADAS PARA UN
EDIFICIO CLASE "A" EN LA CIUDAD DE URUAPAN**

Tesis

que para obtener el título de

Ingeniero Civil

Presenta:

José Carlos Ceja Marín.

Asesor: M.I. Enrique Omar Navarro Caballero

Uruapan, Michoacán a 5 de Octubre de 2012



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

“No necesito saberlo todo, tan solo necesito saber dónde encontrar aquello que me hace falta cuando lo necesite”

Albert Einstein

Este es el momento culminante de mi vida académica, 17 años de estudio se resumen en este escrito, 17 años llenos de victorias y derrotas, siempre acompañado por:

Mi madre, Elvia, quién jamás se aparto de mí, sacrificando sus breves momentos de libertad y tranquilidad, privándose de lujos y noches de descanso por brindarme un mejor porvenir. A su lado, mi padre, Melchor, que con sus exigencias y disciplina me hizo madurar no sin antes cultivar en mí el deseo de triunfar.

También mis abuelos, Fernando y Elvia, las más honestas y amorosas personas que jamás haya conocido, son y serán siempre el ejemplo de que el amor es eterno y que no conoce límites. Junto a ellos, sus hijos, Pilar, Juan y Fernando, que fueron como mis segundos y terceros padres, siempre al pendiente de mis necesidades, acompañando su trato con un gesto de apoyo y palabras de aliento.

Mis hermanos, Sofía y Fer, personitas siempre dispuestas a enseñarme cosas nuevas de la vida y siempre preparados a ser cómplices en mis ideas. El tío Charly, ejemplo del trabajo arduo y abnegado para el bienestar de los suyos y los demás.

Los hermanos de mi padre, Rodolfo, José Luis, Manuel, Jorge, Sergio y Diego, me demostraron que vale la pena luchar por un mejor futuro, no importando en donde se encuentre y siempre atesorando los sacrificios hechos.

Mi chaparra, Marilu, siempre a mí lado en estos últimos 5 años, brindándome su apoyo y amor por encima de todo. Sus padres, Pepe y Lulú, que me siempre me trataron como un miembro de su familia.

Mis amigos, Arturo, Juan, Valter, Sixto, Choco, Diego, Willy, Vocho, Alberto, Daniel, José Luis, Gonzalo y Shantal, que con ellos compartí a carcajadas los mejores momentos de mi vida.

Mis coaches, Pozolito y Tyson, que me enseñaron el significado de disciplina, esfuerzo y perseverancia.

Al final, este momento, el futuro y esta tesis son el resultado de las historias de todas las personas que se entrelazaron con la mía, y no me queda más que decir: Gracias totales.

ÍNDICE

Introducción

Antecedentes.....	1
Planteamiento del problema.....	3
Objetivos.....	4
Pregunta de investigación.....	4
Justificación.....	5
Marco de referencia.....	6

Capítulo 1.- Clasificación de sistemas de control

1.1. Conceptos de dinámica estructural.....	8
1.1.1. Grados de libertad.....	9
1.1.2. Rigidez.....	9
1.1.3. Amortiguamiento.....	9
1.1.3.1. Amortiguamiento viscoso.....	10
1.1.3.2. Amortiguamiento de Coulomb o en seco.....	10
1.1.3.3. Amortiguamiento histérico.....	11
1.1.4. Ecuación de balance de energía.....	12
1.1.5. Movimiento oscilatorio: vibración de una sola partícula.....	14
1.2. Clasificación de sistemas de control.....	15

1.2.1. Dispositivos de control pasivo.....	17
1.2.1.1. Disipadores de energía.....	17
1.2.1.1.1. Dispositivos dependientes del desplazamiento.....	18
1.2.1.1.2. Amortiguadores de extrusión de plomo.....	19
1.2.1.1.3. Disipadores histeréticos.....	19
1.2.1.1.4. Amortiguadores por fricción.	23
1.2.1.2. Dispositivos dependientes de la velocidad.....	25
1.2.1.2.1. Sistema viscoelástico sólido.....	25
1.2.1.2.2. Amortiguadores de fluido viscoelástico.....	26
1.2.1.2.3. Amortiguadores de fluido viscoso.....	28
1.2.1.3. Sistemas de amortiguadores con memoria de forma.....	29
1.2.2. Sistemas aisladores de base.....	30
1.2.2.1. Aisladores elastoméricos.....	32
1.2.2.1.1. Apoyos de caucho de alto amortiguamiento (HDR).....	33
1.2.2.1.2. Apoyos laminados con núcleo de plomo (LBR).....	34
1.2.2.2. Apoyos laminados deslizantes o péndulos de fricción (FPS).....	35
1.2.3. Amortiguadores de masa (TDM).....	37
1.2.4. Control activo.....	40
1.2.4.1. Masa activa.....	41
1.2.4.2. Tendones activos.....	41
1.2.5. Control semiactivo.....	42
1.2.6. Sistema de control híbrido.....	43
1.3. Colocación, inspección y mantenimiento de sistemas de control sísmico.....	44
1.3.1. Características y anclajes de los dispositivos.....	46

1.3.2. Verificación experimental.....	46
1.3.3. Ensayes en dispositivos disipadores de energía.....	47
1.3.4. Ensayes en sistemas de aislación.....	49

Capítulo 2.- Comportamiento sísmico de estructuras con sistemas de disipación de energía.

2.1. Comportamiento de sistemas de disipación ante cargas sísmicas.....	52
2.2. Comportamiento sísmico de amortiguadores por plastificación de metales....	54
2.3. Modelamiento matemático.....	57
2.4. Criterios de diseño.....	65
2.5. Métodos de diseño.....	67
2.5.1. Análisis estático lineal (AEL).....	68
2.5.2. Análisis dinámico modal (ADM).....	69
2.5.2.1. Espectros de diseño.....	70
2.5.2.1.1. Aceleración máxima del terreno a_0	71
2.5.2.1.2. Ordenada espectral máxima o coeficiente de diseño “c”.....	71
2.5.2.1.3. Periodos característicos del espectro T_a y T_b	71
2.5.2.1.4. Caída de la rama espectral descendente “k”.....	72
2.5.2.1.5. Factor de amortiguamiento (β).....	72
2.5.2.2. Espectros de diseño para estructuras del Grupo A.....	73
2.5.2.3. Espectros de diseño para estado límite de servicio.....	73
2.5.2.4. Espectro de desplazamiento S_d	74

2.5.3. Análisis estático no lineal (AENL) o Pushover.....	75
2.5.3.1. Determinación del periodo fundamental de la estructura (T_e).....	76
2.5.3.2. Desplazamiento tope o base (δ_T).....	76
2.5.4. Análisis paso a paso (APAP).....	79
2.6. Método N2.....	80
2.6.1. Descripción del método N2.....	81

Capítulo 3.- Resumen ejecutivo de macro y micro localización

3.1. Generalidades.....	86
3.2. Entorno geográfico.....	90
3.3. Informe fotográfico.....	90

Capítulo 4.- Metodología.

4.1. Método empleado.....	93
4.2. Enfoque de investigación.....	93
4.2.1. Alcance de la investigación.....	94
4.3. Diseño de la investigación.....	95
4.3.1. Diseño con preprueba-posprueba y grupo de control.....	96
4.4. Instrumentos de recopilación de datos.....	97
4.5. Descripción del proceso de investigación.....	97

Capítulo 5.- Análisis e interpretación de resultados.

5.1. Modelo estructural.....100

5.2. Diseño de disipadores y respuesta sísmica del SE1GL con disipadores.....107

Conclusiones.....126

Bibliografía.....129

INTRODUCCIÓN

Antecedentes.

Un sismo es la liberación de energía potencial en forma de ondas hacia la superficie de la corteza terrestre producto del movimiento de las placas tectónicas. Para medir la energía liberada durante el sismo se utiliza la magnitud, la cual únicamente depende de la cantidad de energía potencial acumulada y liberada desde el interior de la Tierra, por lo que su estudio, para el diseño sísmico, es irrelevante debido a que el ser humano no puede alterarla.

Por otra parte, se cuenta con una medición cualitativa de los sismos, denominada intensidad. La intensidad cataloga la severidad de la energía sísmica liberada, es decir, mide el grado en que se afecta al terreno, las estructuras y a la población. Diferente a la magnitud, la intensidad es el valor más importante para el diseño sísmico, debido a que puede variar según la rigidez de las estructuras y el tipo de suelo en donde se desplantan.

En México, los requisitos de diseño plasmados en los diferentes reglamentos de construcción, entre ellos, el Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal, tienen como propósito obtener un grado de seguridad adecuada, tal que, bajo la presencia de un sismo de intensidad máxima probable, no habrá fallas estructurales fatales, disipando la energía sísmica transmitida del suelo a la superestructura mediante el daño aceptable sobre los elementos estructurales. Aunque estos daños pudiesen llegar a afectar el correcto funcionamiento del edificio y requerir reparaciones importantes.

Por ende, ante la ocurrencia de un sismo de mayor intensidad a la de diseño es de esperarse que las estructuras presenten mayores daños a los permisibles o que lleguen a colapsar. Sismos de gran intensidad, como los ocurridos en México en 1985, Kobe en 1995, Chile y Haití en el 2010 y Japón en el 2011, han demostrado que es necesario la previsión de daños mayores a los permisibles o el colapso de los edificios cuyo funcionamiento es esencial a raíz de una emergencia urbana o pueden constituir un peligro significativo.

Países como Italia, Estados Unidos, Nueva Zelanda, Japón y México han dado solución a dichos problemas con el uso de dispositivos de control en los edificios. Los dispositivos de control son aparatos mecánicos capaces de modificar el comportamiento sísmico de un edificio disminuyendo la cantidad de desplazamientos a los que es sometido el edificio durante un sismo o disipando el cortante que deberá ser absorbido por la estructura.

En el diseño sísmico intervienen diversas variables, entre las cuales se encuentra el factor de comportamiento sísmico denominado Q , este factor, permite al diseñador aumentar o disminuir la rigidez del edificio según su clasificación. En su tesis de licenciatura del año 2006 Laura Lucía Parra Macías, realizó un estudio detallado sobre el uso y calculo de este factor, de tal modo que estableció un método para el cálculo preciso del factor Q para una zona sísmica y tipo de suelo determinado.

Cabe mencionar que la información requerida para el desarrollo de esta tesis sólo se encuentra en bitácoras de cursos de Sismología, Diseño Sismorresistente y

tesis para adquirir el título de Maestro o Doctor en Ingeniería en la rama de Estructuras, por lo que no se encontraron fuentes de información en la Biblioteca de la Universidad Don Vasco A.C. además de la ya antes mencionada.

Planteamiento del problema.

Tal y como se mencionó anteriormente, las NTC-2004 del RCDF permiten que una estructura presente un margen de daño aceptable después de un sismo, consecuentemente se tiene conocimiento que, ante un sismo de gran intensidad, este deberá de ser reparado para permitir que pueda ser operado sin riesgo para sus usuarios. Entonces, ¿Qué pasaría si el edificio en cuestión fuera un hospital o una estación de generación de energía eléctrica, cuyo funcionamiento después de un sismo es vital?

El funcionamiento de dichos edificios, clasificados en el Grupo A según el Reglamento para Construcciones del Distrito Federal, es primordial después de un sismo de gran intensidad por lo que no es aceptable su desuso debido a los daños que pudiera presentar. Aquí radica la importancia de buscar una respuesta técnico-económica factible para mitigar los daños que puedan ser causados y contar con una estructura segura. La respuesta a dicho problema es el uso dispositivos de control.

Sin embargo, la adición de sistemas de control sísmico a edificios es una técnica relativamente nueva y pese a que en México se cuentan con algunos puentes y edificios con dispositivos de control, su diseño sigue siendo un proceso poco conocido.

Objetivos.

Objetivo general:

Realizar el diseño sísmico de un edificio adicionado con un sistema disipador con comportamiento histerético conocido como ADAS.

Objetivos particulares:

- Definir los diferentes dispositivos de control, así como sus ventajas y desventajas.
- Analizar el comportamiento sísmico de un edificio de 10 niveles clasificado como una estructura tipo A con y sin disipadores.
- Definir las características geométricas de los elementos estructurales del edificio según las NTC-2004 Concreto del RCDF.
- Definir los requisitos y etapas para el diseño sísmico de una estructura con disipadores tipo ADAS.
- Determinar un modelo matemático para el diseño de un edificio con disipadores por fluencia de metales.
- Determinar la geometría más conveniente del disipador según las necesidades del edificio.

Pregunta de investigación.

México es un país situado sobre una zona de gran intensidad sísmica, de tal manera que se debe de contar con técnicas eficientes y económicas para evitar

daños en las estructuras después de un sismo. Siendo una de estas técnicas, la adición de sistemas de control sísmico a las estructuras.

Aunque, debido a que esta técnica es implementada hace apenas 20 años en algunos países y dada la complejidad en el diseño de los sistemas de control surge la siguiente pregunta de investigación que habrá de guiar el presente estudio: ¿Cómo se realiza el diseño sísmico de un edificio con dispositivos de control?

Justificación.

La importancia de esta tesis radica en la necesidad de adoptar y dar a conocer métodos diferentes a los previstos en los Reglamentos de Construcción para la mitigación de daños producto de un sismo sobre una estructura, concretamente la aplicación de dispositivos de control sísmico.

La falta de información y apoyo para la implementación de esta técnica ha provocado el rezago en las tecnologías de la construcción en México, por lo que con esta tesis se pretende ayudar a corto plazo a todo el alumnado de la Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad Don Vasco A.C. en sus investigaciones sobre los sistemas de control sísmico y diseño de estructuras con ellos.

Así mismo, a mediano y largo plazo se verán beneficiados los investigadores, constructores y población en general que estén interesados en la implementación de dispositivos de control.

Marco de referencia.

En el presente estudio se emplearán datos de actividad sísmica y características del suelo de la ciudad de Uruapan, Michoacán. El terreno donde se pretende ubicar el edificio se encuentra en la Avenida Latinoamericana esquina con Manuel Pérez Coronado. Cabe mencionar que pese al uso de datos del suelo y actividad sísmica de la ciudad de Uruapan el procedimiento de diseño no es únicamente aplicable para esta ciudad.

Para fines de diseño sísmico, la República Mexicana está dividida en 4 regiones sísmicas según su actividad. Las regiones están denominadas por las letras A, B, C y D siendo la zona A la que menor actividad sísmica presenta y la letra D la de mayor actividad. El estado de Michoacán, según la clasificación previamente mencionada, cuenta con 3 regiones sísmicas; la zona D en la costa del estado, la zona C en el centro del estado y la zona B en el norte.

A su vez, los suelos de territorio nacional se clasifican en 3 tipos según su resistencia:

Terreno tipo I. Terreno firme, como tepetate, arenisca medianamente cementada, arcilla pre consolidada muy compacta o suelos de características similares.

Terreno Tipo II. Suelo de baja rigidez, tal como arenas no cementadas, limos de mediana a alta capacidad, arcillas pre consolidadas de compacidad media y suelos de características similares.

Terreno Tipo III. Suelo suave, tal como arenas y limos de baja compacidad o arcillas blandas muy compresibles.

Según las clasificaciones anteriores, la ciudad de Uruapan está situada en una zona sísmica C y por la ubicación del terreno en la ciudad se clasifica como un terreno Tipo II.

CAPÍTULO 1

CLASIFICACIÓN DE SISTEMAS DE CONTROL

Debido a las enormes pérdidas económicas y humanas a causa de los sismos múltiples análisis teóricos y experimentales han sido llevados a cabo para comprender de mejor manera el desempeño sísmico de una estructura. A partir de estos estudios se han encontrado múltiples soluciones, de las cuales, la adición de sistemas de control sísmico a las estructuras es la respuesta de mayor aceptación.

Se conocen como sistemas de control a todo aquel elemento adicionado a una estructura con el propósito de mejorar su respuesta sísmica mediante la reducción de desplazamientos o la disminución del cortante que absorbe un edificio ante una excitación sísmica. Por sus características y funcionamiento los sistemas de control se clasifican en sistemas activos, pasivos, semiactivos e híbridos.

El diseño de sistemas de control, sin importar su clasificación, parte de los conceptos básicos de la dinámica estructural tales como grado de libertad de una estructura, rigidez, amortiguamiento, movimiento oscilatorio y balance de energía.

1.1. Conceptos de dinámica estructural.

La dinámica, dentro del contexto de la mecánica, es el estudio de los cuerpos o conjuntos de partículas en movimiento. La dinámica se divide en dos campos: la cinemática, la cual estudia la geometría del movimiento, relacionando el desplazamiento, la velocidad, la aceleración y el tiempo, sin hacer referencia a las causas del movimiento; y la cinética, la cual estudia la relación entre las fuerzas que

actúan sobre el cuerpo, la masa del cuerpo y su movimiento, permitiendo predecir los movimientos que causan las fuerzas o determinar las fuerzas necesarias para producir un movimiento dado.

Por tanto, la dinámica estructural, estudia las vibraciones de cuerpos flexibles, aunque en muchos casos las deformaciones relativas entre algunas partes de la estructura de un orden de magnitud tan pequeño, que pueden aplicarse principios de la dinámica de cuerpos rígidos en algunas porciones de la estructura.

1.1.1. Grados de libertad.

Autores como García Reyes (1998), Bazán y Meli (2002) definen al grado de libertad de una estructura como el número de coordenadas necesarias para definir la posición en el espacio y tiempo de todas las partículas de masa del sistema.

1.1.2. Rigidez.

La rigidez se define como la relación entre fuerzas externas aplicadas a un elemento y las deformaciones que estas inducen al elemento. Matemáticamente puede expresarse de la siguiente manera:

$$K=F/D \quad (1.1)$$

Donde K es la rigidez, F es la fuerza externa y D los desplazamientos.

1.1.3. Amortiguamiento.

Todo cuerpo en movimiento tiende a detenerse debido a la pérdida de energía presente en el sistema, esta pérdida de energía es debida a las fuerzas de

amortiguamiento o fricción inherentes en el sistema. Esta fuerza siempre actúa tangencialmente a la superficie en los puntos de contacto con otros cuerpos y tiene sentido contrario al que tendrá el desplazamiento. Según el medio en el que se encuentren los elementos cuyo roce provoque amortiguamiento, éste se clasifica en: amortiguamiento viscoso, de Coulomb o en seco e histérico.

1.1.3.1. Amortiguamiento viscoso.

Este tipo de amortiguamiento se da cuando un cuerpo en movimiento dentro de un fluido pierde energía cinética debido a la viscosidad del fluido, la cual se opone al movimiento. Esta pérdida de energía cinética está asociada de manera directa con la velocidad del movimiento.

1.1.3.2. Amortiguamiento de Coulomb o en seco.

Para la explicación de este tipo de amortiguamiento se considerarán los efectos producidos al tirar horizontalmente un bloque de peso uniforme mg que descansa sobre una superficie horizontal rugosa. Deberán considerarse las superficies de contacto entre el bloque y la superficie rugosa como deformables; la parte comprendida desde la superficie de contacto del bloque hasta su cima deberá considerarse como rígida o no deformable. El diagrama de cuerpo libre de la figura 1.1 ilustra como la superficie rugosa ejerce una distribución de la fuerza normal N , como de la fuerza de fricción f sobre la superficie de contacto del bloque.

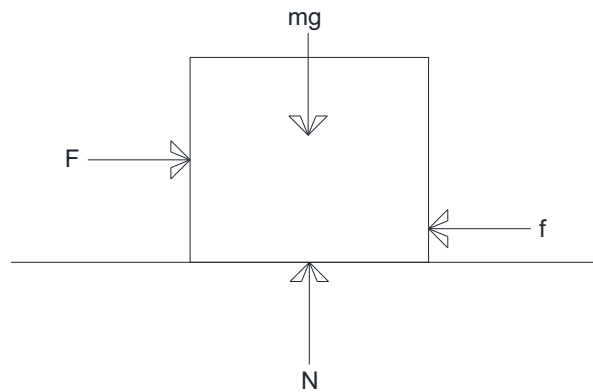


Imagen 1.1. Diagrama de cuerpo libre para fricción en seco. (Fuente: propia)

Las fuerzas normales producto de la superficie rugosa actúan hacia arriba de tal manera que se mantienen en balance con el peso del bloque mg y las fuerzas de fricción o amortiguamiento, para este caso, actúan hacia la izquierda, impidiendo que la fuerza F mueva el bloque hacia la derecha.

1.1.3.3. Amortiguamiento histérico.

Al aplicar una fuerza de variación senoidal a lo largo del tiempo en una estructura con comportamiento elastoplástico, se obtienen curvas fuerza-desplazamiento. Cuando la carga comienza a aplicarse, se tiene un comportamiento elástico del material, hasta llegar al límite máximo de fluencia del material. Cuando se ha llegado a este límite y se continua con la carga se obtendrán deformaciones inelásticas, cuando esto ocurre se procede a la descarga. La diferencia entre el área de la curva al momento de cargar y descargar es la cantidad de energía disipada de modo histérico.

1.1.4. Ecuación de balance de energía.

Ante la ocurrencia de un sismo, una cantidad finita de energía es transmitida del suelo a la cimentación y ésta a su vez la transmite a la superestructura. Dicha energía de entrada es transformada por la superestructura en energía cinética y energía potencial, este tipo de energías son las causantes de los desplazamientos y deformaciones en la estructura. A su vez, las propiedades geométricas de la estructura brindan un cierto nivel de amortiguamiento de la energía de entrada y la disipa a través de todos sus elementos llegando a producir fallas en algunos de ellos. Si a este sistema se le añade algún dispositivo de absorción de energía de entrada el desempeño de la estructura se verá mejorado, dando como resultado menos desplazamientos en la estructura y por ende menos daño a esta.

Lo dicho anteriormente es representado con la ecuación de balance de energía. Esta ecuación integra en sus miembros la cantidad de energía de entrada a una estructura producto de un sismo.

$$E_I = E_S + E_D \quad (1)$$

En donde:

E_I = Energía absoluta de entrada.

E_S = Energía almacenada.

E_D = Energía disipada.

Así mismo, la energía almacenada está compuesta por dos tipos de energía, la energía de deformación estática recuperable E_E y la energía cinética E_K . De tal modo que:

$$E_S = E_E + E_K \quad (2)$$

Análogamente, la energía disipada se compone de otros dos tipos de energía, la primera de ellas es la energía disipada por amortiguamiento viscoso E_V , la cual depende de la velocidad de oscilación. La segunda, es la energía disipada por mecanismos histéricos E_H y depende de las deformaciones que se pudieran presentar en una estructura.

$$E_D = E_V + E_H \quad (3)$$

De tal manera que si se sustituyen los valores de las ecuaciones 2 y 3 en la ecuación 1, se obtienen la demanda y capacidad que presenta la estructura. La demanda, parte izquierda de la ecuación 4, puede definirse como la cantidad de fuerzas actuantes sobre la estructura y la capacidad, parte derecha de la ecuación 4, es la respuesta que pueda presentar la estructura ante las fuerzas que actúan en ella. Por lo tanto, para el diseño sismorresistente, la demanda siempre deberá de ser menor a la capacidad.

$$E_I = E_E + E_K + E_V + E_H \quad (4)$$

Demanda < Capacidades

1.1.5. Movimiento oscilatorio: vibración de una sola partícula.

La vibración es el movimiento oscilatorio de partículas y cuerpos rígidos y elásticos, bajo acción de fuerzas fluctuantes. Estas fuerzas fluctuantes pueden ser inherentes a los sistemas, o pueden aplicarse exteriormente a dichos sistemas. Los problemas de vibración se presentan en muchos aspectos de la ingeniería. En la figura 1.1 se definen algunos términos que componen el fenómeno de la vibración.

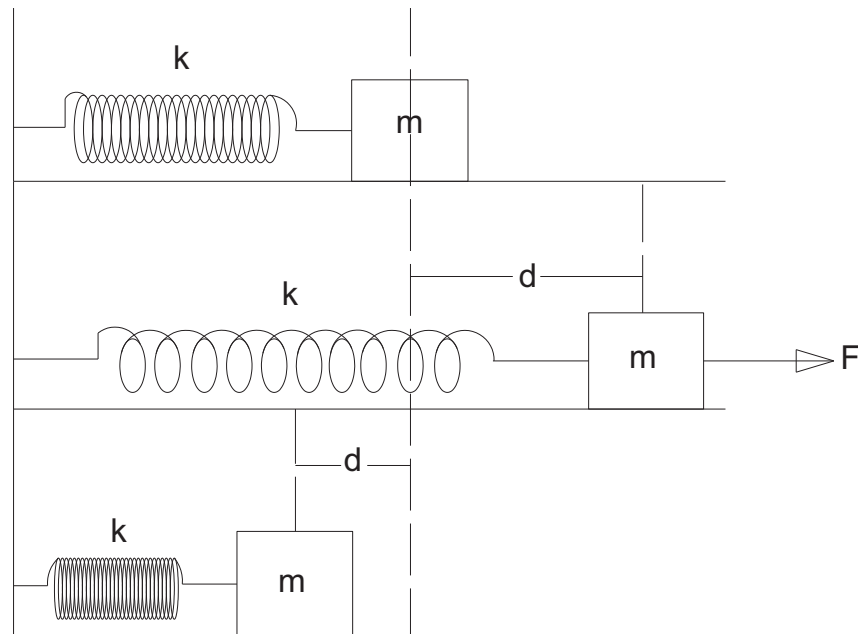


Imagen 1.2. Modelo del movimiento vibratorio. (Fuente: propia)

La masa es designada con la letra m y el resorte por la letra k . Cuando al resorte se le agrega un peso este tiende a alargarse, siendo d el alargamiento o desplazamiento. La oscilación ascendente y descendente de la masa está indicada por la gráfica. Del presente modelo pueden ser definidos los siguientes momentos durante la vibración:

1. La constante de resorte o k , es la fuerza necesaria para alargar o comprimir el resorte una unidad de longitud.
2. Posición de equilibrio ó posición neutra, es la posición en la cual m está bajo la acción de dos fuerzas de misma magnitud aplicadas en sentidos contrarios una de otra. A esto también se le denomina equilibrio estático.
3. Posiciones extremas, son las posiciones más alejadas de la posición neutra en donde las velocidades serán iguales a cero.
4. Amplitud, es el valor numérico del máximo desplazamiento hacia cualquier lado de equilibrio. Generalmente las dos amplitudes son iguales.
5. Desplazamiento total, es la suma de las dos amplitudes.
6. Movimientos periódicos, son movimientos que se repiten en intervalos de tiempos iguales.
7. Periodo, es el tiempo que transcurre mientras el movimiento se repite.
8. Ciclo, es el movimiento ejecutado durante un periodo.
9. Frecuencia, es el número de ciclos completos efectuados en una unidad de tiempo.
10. Movimiento armónico, es la forma más simple de movimiento periódico y se representa mediante una función seno o coseno, Todos los movimientos armónicos son periódicos, sin que esto implique que todos los movimientos periódicos sean armónicos.

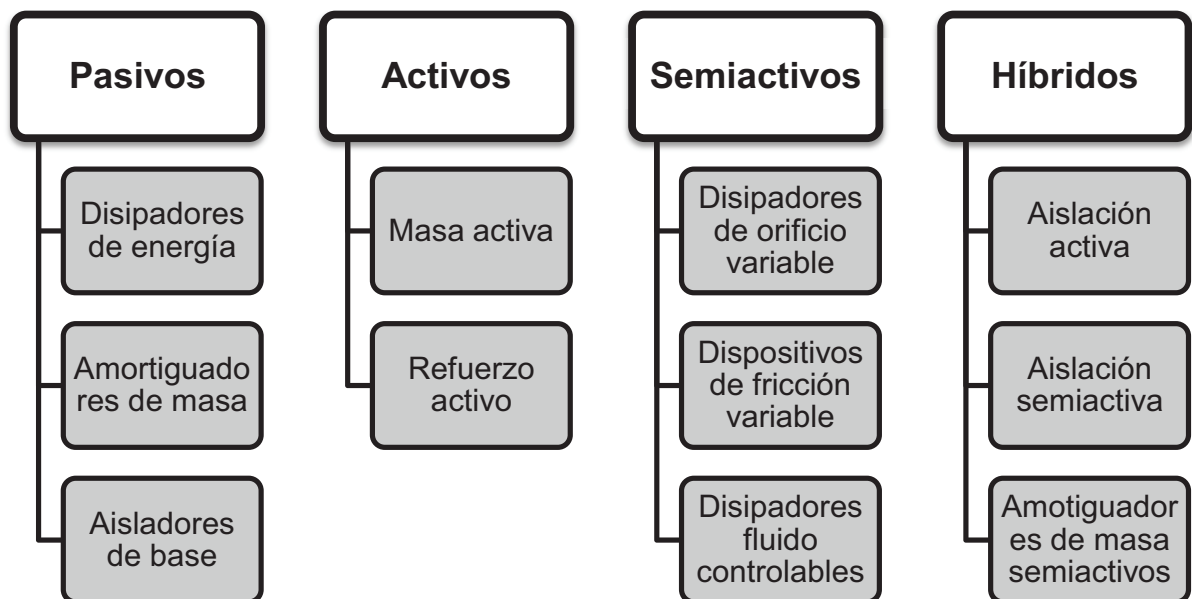
1.2. Clasificación de sistemas de control.

El control estructural ante acciones sísmicas se plantea como una alternativa al diseño sismorresistente convencional, el cual se basa en la ductilidad e

hiperestatismo de la estructura. El objetivo de estos sistemas es controlar los desplazamientos de la estructura haciendo uso de los siguientes recursos:

- a) La modificación de las propiedades dinámicas del edificio, de tal manera que se eviten movimientos resonantes.
- b) La disipación de energía introducida al sistema a partir de dispositivos mecánicos.
- c) El control con dispositivos que ejerzan fuerzas que contrarresten la acción sísmica.

Por la forma como los sistemas de control trabajan, es posible clasificarlos como activos, pasivos, semiactivo e híbridos.



Esquema 1.1. Sistemas de control (Fuente: propia).

1.2.1. Dispositivos de control pasivo.

Como se menciona en la Esquema 1.1 los dispositivos pasivos se clasifican en 3 grupos según su forma de trabajo. Los disipadores de energía modifican las propiedades dinámicas de amortiguamiento del sistema estructural de modo que las vibraciones inducidas por la excitación son absorbidas y disipadas por estos dispositivos. Los amortiguadores de masa, según Jara (2006) son una o varias masas adicionales, generalmente sobre el último nivel de la estructura con ciertas propiedades dinámicas que reducen la respuesta estructural. Los aisladores de base, son elementos cuya función es servir como unión entre la cimentación y la superestructura para aislar el movimiento del terreno de la estructura.

1.2.1.1. Disipadores de energía.

El manual de FEMA-273 (1997) clasifica a los sistemas disipadores de energía en sistemas dependientes del desplazamiento, sistemas dependientes de la velocidad y otros. Siendo que los sistemas que dependen del desplazamiento pueden presentar rigidez plástica (sistemas que funcionan por fricción), ciclos bilineales (sistemas que trabajan bajo fluencia de metales) o ciclos trilineales en las relaciones fuerza desplazamiento.

Por otra parte, los sistemas dependientes de la velocidad incluyen a los sistemas sólidos y líquidos viscoelásticos, así como a los sistemas de fluidos viscosos. Los sistemas clasificados como otros comprenden a todos los dispositivos que no pueden ser clasificados en los grupos mencionados anteriormente, un ejemplo de estos son los dispositivos con memoria de forma.

En su mayoría los sistemas disipadores de energía son fabricados de acero y plomo colocados como o sobre contravientos cuyo propósito primordial es disminuir los desplazamientos de la estructura incrementando la rigidez en esta.

1.2.1.1.1. Dispositivos dependientes del desplazamiento.

La respuesta fuerza-desplazamiento de los dispositivos dependientes del desplazamiento está principalmente en función de los desplazamientos relativos entre cada extremo del dispositivo. Así mismo, su respuesta sísmica es independiente a la velocidad relativa entre cada extremo del dispositivo y/o la frecuencia de excitación.

Para el propósito de evaluar la respuesta de los dispositivos dependientes del desplazamiento dicha relación puede ser expresada de la siguiente manera:

$$F = k_{eff} D \quad (1.2)$$

De la cual k_{eff} es la rigidez efectiva, ecuación 1.2, F es la fuerza del dispositivo y D el desplazamiento entre los extremos del dispositivo.

$$k_{eff} = \frac{|F^+| + |F^-|}{|D^+| + |D^-|} \quad (1.3)$$

Donde las fuerzas del dispositivo, F^+ y F^- son evaluadas en desplazamientos D^+ y D^- respectivamente.

Los dispositivos dependientes del desplazamiento ofrecen 2 ventajas principalmente: 1) incrementan la rigidez del edificio a un costo relativamente bajo y 2) reducen los desplazamientos al reducir el periodo fundamental del edificio (T_e).

1.2.1.1.2. Amortiguadores de extrusión de plomo.

El amortiguador de extrusión de plomo, es un mecanismo en el cual el plomo es extruido cíclicamente, es decir, el material que se encuentra en el cuerpo cilíndrico de acero del amortiguador, por medio de un émbolo, se fuerza a fluir a través de un orificio.

El proceso de recuperación de las propiedades mecánicas después y durante la deformación plástica es rápido, vía el proceso interrelacionado de recuperación, recristalización y crecimiento granular. Estos procesos son particularmente eficientes a temperatura ambiente a causa del bajo punto de fusión del plomo. En otras palabras, la fluencia del plomo a un nivel bajo de tensiones, implica un aumento en el amortiguamiento efectivo del sistema.

1.2.1.1.3. Disipadores histeréticos.

Esos dispositivos se caracterizan por tener un comportamiento histerético dúctil e independiente a la velocidad de deformación de la estructura.

Uno de los disipadores más conocidos y estudiados es el sistema de rigidez y amortiguación añadido ó ADAS por sus siglas en inglés (Added Dampig and Stiffness). Son dispositivos conformados por placas de acero en paralelo, de espesor constante y sección variable en forma de X. El número frontal de placas en paralelo resulta variable, permitiendo ajustar el disipador a las necesidades de la estructura a la que se incorpora. En cada placa del dispositivo se restringe el giro en ambos extremos, de forma que un desplazamiento relativo entre estos en dirección

perpendicular al plano de la placa produce una distribución de momentos flectores lineales, simétricos y con doble curvatura.

El ancho del disipador se proporciona linealmente con la distribución de momentos flectores, lo cual deriva en una generalización de la plastificación en un corto intervalo de desplazamiento, La plastificación se produce de forma uniforme y estable, optimizando el proceso de disipación de energía.

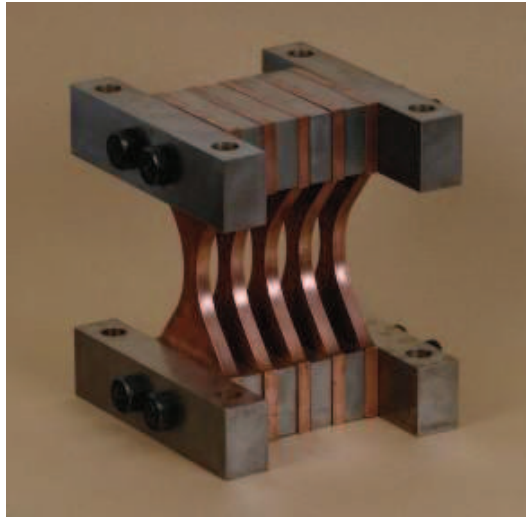


Imagen 1.3. Disipador de energía ADAS. (Fuente: <http://sirve.cl/wp-content/uploads/Disipador-ADAS-cobre1-295x287.jpg>)

Otro dispositivo es el TADAS, que al igual que el ADAS, está formado por un conjunto de placas de acero paralelas y de espesor constante, El hecho de que las placas se encuentren con un lado articulado y otro empotrado, condiciona la forma trapezoidal, que posibilita también un distribución global de la plastificación. La base menor de la placa se conecta al nivel de viga del marco, mientras la otra sección se articula dando una unión de abulón a dos contravientos dirigidos a la base de los

pilares del marco. Con un desplazamiento relativo entre extremos de la placa perpendicular a su plano, se consigue la plastificación por flexión por curvatura simple.

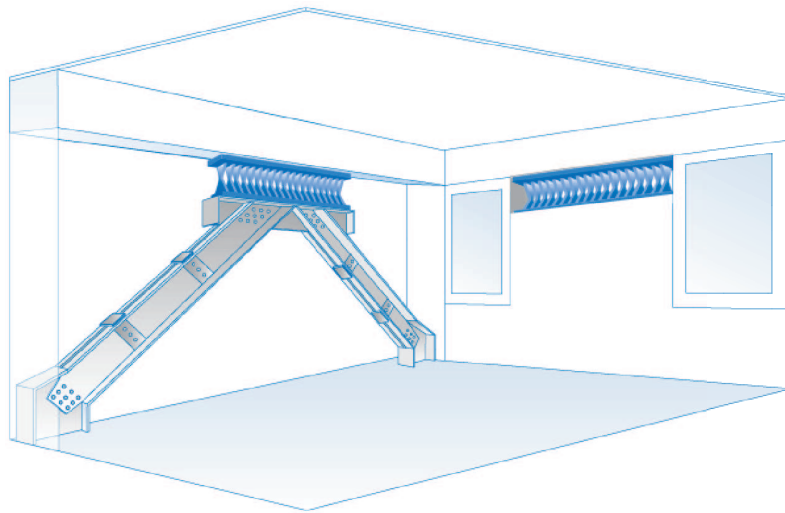


Imagen 1.4. Sistema de disipación ADAS. (Fuente: www.sigweb.cl)

También se ha investigado el comportamiento de un disipador construido en una placa de acero mecanizada con la geometría tal como lo indica la Figura 1.7. Debido a los espacios vacíos que deja entre disipadores se le conoce genéricamente como disipador tipo panal y se comercializa con el nombre de Honeycomb. Su geometría tiene como objeto la plastificación lo más uniforme posible en la zona de disipación. Su comportamiento histérico es muy estable y de forma casi rectangular, con una respuesta más próxima a la rígida-plástica que es el caso ADAS, la cual es más flexible.

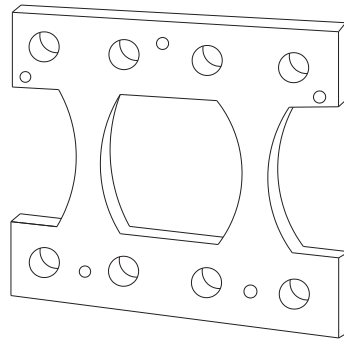


Imagen 1.5. Sistema Honeycomb. (Fuente: Bozzo Rotondo, Luis M., 2004)

También se han desarrollado dos disipadores, uno a través de la flexión de pernos y el otro basado en la plastificación por cortante, que permiten ser colocados como diagonales de arriostramiento, logrando así unos elementos prácticamente independientes de las acciones verticales y que resultan muy fáciles de instalar. Los disipadores están avalados por una amplia campaña de ensayos, a partir de la cual se establecen modelos de predicción del comportamiento y su capacidad de disipación bajo acciones sísmicas.

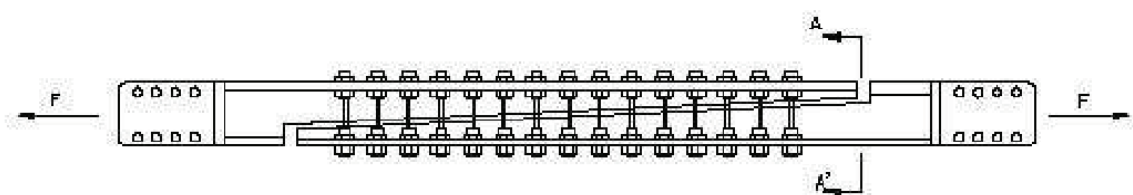


Imagen 1.6. Sistema DUR. (Fuente: Castro, Genner, 2008)

Una rama de los disipadores históricos son los dispositivos a cortante, la mayoría de estos dispositivos adoptan una sección similar a la de un sistema estructural de brazos excéntricos, este sistema tiene una sección en doble T con

alma rígida. Estos tipos de disipadores son de gran ductilidad y permiten ciclos histéricos estables.

Los paneles de cortante son placas de acero rigidizadas. Su estructura, con rigidizadores distanciados, obliga a espesores relativamente importantes para evitar el problema de la abolladura en su alma. En 1997 se ensayó un diseño preliminar de este disipador de cortante, su cuerpo estaba constituido a partir de un solo bloque de acero de construcción mecanizado por fresado, lo que le permitió incluir rigidizadores de pequeñas dimensiones y sin necesidad de soldadura en la zona de plastificación. Los primeros resultados obtenidos señalaban una elevada rigidez bajo comportamiento elástico, un desplazamiento de inicio de plastificación de unos 0.5 mm y disipación de energía a partir de ciclos histéricos estables.

Existen también los disipadores basados en la extrusión de plomo, estos sistemas trabajan cuando el plomo pasa por un orificio y es forzado a un cambio de sección, disipando así la energía sísmica. Su respuesta histórica resulta muy estable tras muchos ciclos de desplazamiento.

1.2.1.1.4. Amortiguadores por fricción.

Los sistemas de fricción disipan energía, basándose en el rozamiento existente entre dos superficies de contacto bajo presión y en el deslizamiento entre ellas. La fuerza de fricción en cada conexión es igual al producto de la fuerza normal por el coeficiente de rozamiento.

Existen diversos dispositivos basados en la disipación por fricción. Por ejemplo, el dispositivo de la imagen 1.9, permite ser emplazado en la intersección de un arriostramiento en X. Sus curvas históricas son prácticamente rectangulares, con lo cual, la energía disipada por ciclo es máxima para un determinado valor de la fuerza de desplazamiento. El mecanismo desliza ante una carga predeterminada, regulable a partir de la presión ejercida por pernos a través de una llave dinamométrica.

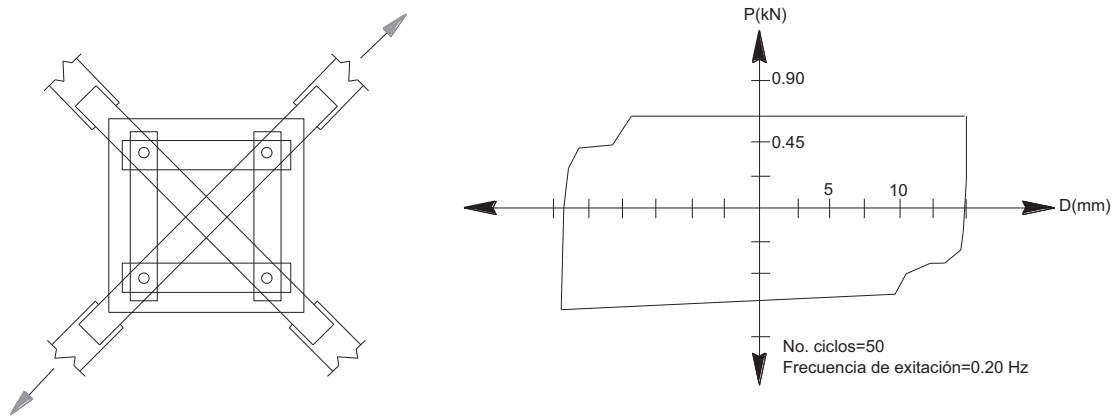


Imagen 1.7. Disipador por fricción y curva histerética. (Castro, Genner, 2008)

El mayor inconveniente que presentan estos dispositivos disipadores es que el coeficiente de fricción, durante el desplazamiento, depende de la velocidad, la presión normal y de las condiciones de las superficies en contacto. Consecuentemente resulta difícil garantizar un coeficiente de fricción independiente del tiempo y de las condiciones de los disipadores. Sin embargo, se ha observado que la variación del coeficiente de fricción durante el desplazamiento no afecta significativamente a la respuesta estructural si la estructura permanece en rango lineal, mientras que la fluencia puede ser significativa si esta en rango no lineal.

1.2.1.2. Dispositivos dependientes de la velocidad.

En este tipo de dispositivo la respuesta sísmica es en función de la velocidad relativa entre los extremos del sistema, inducida por una excitación sísmica. Por los materiales que son empleados en su fabricación es posible clasificar estos dispositivos en 3 categorías: sistema viscoelástico sólido, sistema de fluido viscoelástico y sistema de fluido viscoso; de tal manera que su comportamiento y método de diseño estarán en función del material elegido para su fabricación.

1.2.1.2.1. Sistema viscoelástico sólido.

En estos sistemas los ciclos de su respuesta sísmica generalmente dependen de la frecuencia y amplitud del movimiento, así como de la temperatura durante su operación. Para su diseño, pueden ser modelados como un resorte y amortiguador en paralelo según el modelo de Kelvin; dicho modelo debe representar adecuadamente la frecuencia y temperatura de operación del sistema.

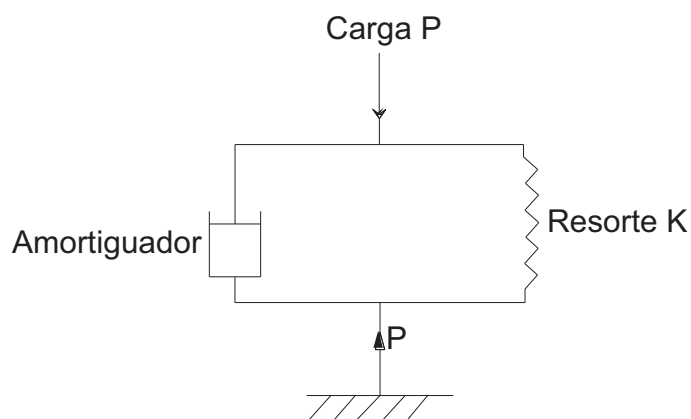


Imagen 1.8. Modelo de Kelvin con resorte y amortiguador en paralelo. (Fuente: propia)

En caso que las propiedades del sistema no puedan ser representadas precisamente en el modelo, es posible estimar la respuesta sísmica del edificio con el amortiguador mediante múltiples estudios en donde se hagan variar los valores de las constantes correspondientes a los amortiguadores y resortes. La fuerza del sistema se puede estimar de la manera siguiente:

$$F = k_{eff}D + C\dot{D} \quad (1.4)$$

Donde C es el coeficiente de amortiguamiento del sistema (ecuación 1.5), D es el desplazamiento relativo entre los extremos del dispositivo, \dot{D} corresponde a la velocidad relativa entre los extremos del dispositivo, k_{eff} es la rigidez efectiva (ecuación 1.4).

$$k_{eff} = \frac{|F^+| + |F^-|}{|D^+| + |D^-|} = k' \quad (1.5) \quad C = \frac{W_D}{\pi\omega_1 D_{ave}^2} = \frac{k''}{\omega_1} \quad (1.6)$$

De la cual k'' es la rigidez perdida por el sistema, ω_1 es la frecuencia angular que es igual a $2\pi f_1$, D_{ave} es el promedio del valor absoluto de los desplazamientos registrados en la estructura y W_D es el área encerrada en un ciclo completo de la respuesta fuerza-desplazamiento del sistema.

1.2.1.2.2. Amortiguadores de fluido viscoelástico.

Son elementos cuya configuración consta de capas intercaladas entre placas de acero y placas de material viscoelástico unidos mediante un proceso de vulcanización; dicho material viscoelástico, generalmente es un polímero altamente disipativos. Los materiales con los que se fabrican estos dispositivos deben tener

características dinámicas estables, ser químicamente inertes y poseer buenas propiedades de envejecimiento.

El comportamiento del material viscoelástico queda definido por tres propiedades importantes: el módulo de pérdida del sistema, el módulo de almacenamiento del sistema y el factor de pérdida. Estas propiedades son sensibles a la frecuencia de excitación, cambios de temperatura y al nivel de tensión de deformación.

Estos amortiguadores disipan la energía al producirse cierta deformación por cortante en las capas viscoelásticas. Su comportamiento ante cargas dinámicas depende de la frecuencia de vibración, del nivel de deformación y la temperatura del ambiente, tal y como los sistemas de sólido viscoelástico con la diferencia que para su diseño debe adoptarse el modelo de Maxwell que consiste en un resorte y un disipador dispuestos en serie.

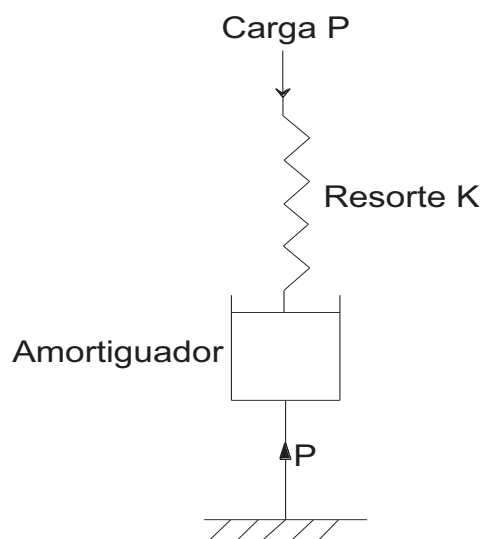


Imagen 1.9. Modelo de Maxwell con resorte y amortiguador en serie. (Fuente: propia)

Cabe mencionar que estos disipadores no alteran el comportamiento lineal del sistema y sólo incrementan el amortiguamiento viscoso y la rigidez lateral, lo que significa una simplificación importante en el análisis y diseño de los mismos.

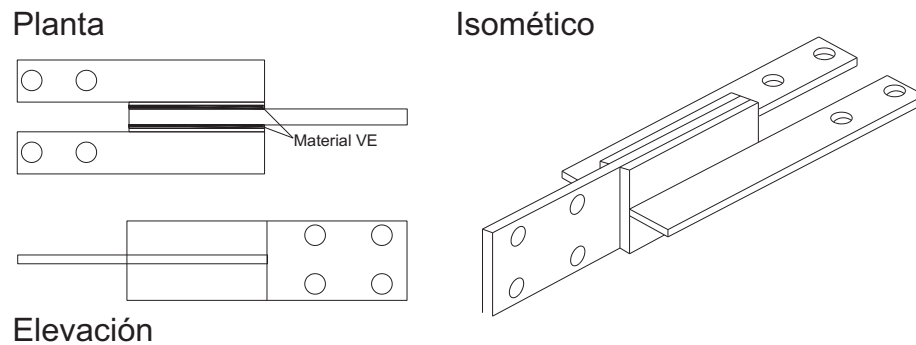


Imagen 1.10. Amortiguador viscoelástico. (Fuente: www.sigweb.cl)

1.2.1.2.3. Amortiguadores de fluido viscoso.

Los disipadores del tipo fluido viscoso son dispositivos cilíndricos compuestos por un pistón rodeado por aceite o silicona dentro de una cámara interna seccionada en dos partes. Son elementos capaces de mantenerse en servicio durante largos periodos de tiempo sin necesidad de mantenimiento debido a que los materiales con los que se fabrican son resistentes a la corrosión y al despostillamiento; a su vez, las piezas con las que se fabrican dichos dispositivos deben estar libres de esfuerzos de ruptura y contar con alta resistencia al impacto.

Este tipo de disipadores son capaces de reducir simultáneamente los esfuerzos y las deflexiones de la estructura producto de las fuerzas horizontales que se le aplican. La eficiencia en el amortiguamiento es lograda por el movimiento relativo del pistón y la resistencia del fluido que pasa por las válvulas de control de

presión que conectan ambas cámaras de silicona de manera que genera una gran fuerza de amortiguamiento por un pequeño golpe de pistón.

El mecanismo de funcionamiento de estos dispositivos es análogo al de un amortiguador para la suspensión de los automóviles, ante la aparición de una carga sobre la estructura, el pistón dentro del cilindro del disipador comenzará a comprimir la silicona o el aceite, obligándole a fluir hacia la otra sección de la cámara. El paso de la silicona de una cámara a otra es lento, por lo que amortigua el impacto de la carga horizontal aplicada.

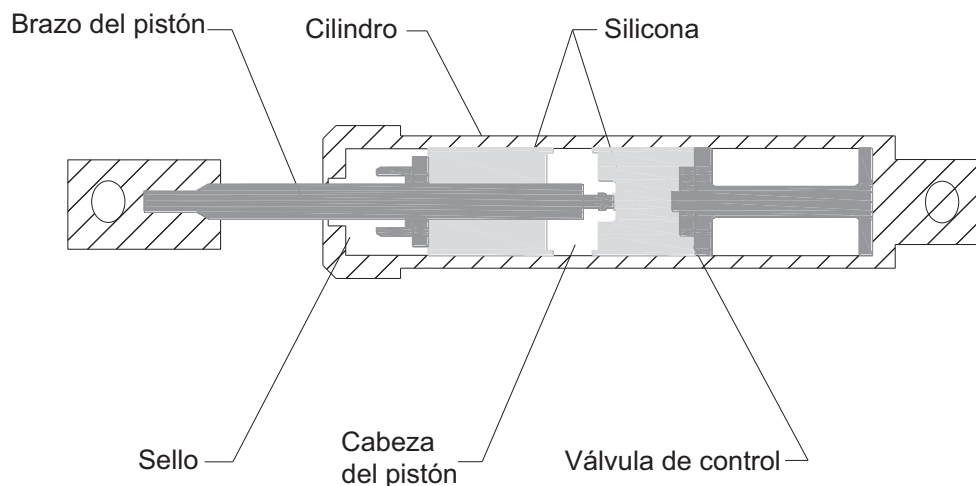


Imagen 1.11. Esquema típico de un amortiguador de fluido viscoso. (Fuente: www.tecnoloxia.org)

1.2.1.3. Sistemas de amortiguadores con memoria de forma.

El término de materiales con memoria de forma es aplicado a un grupo de materiales metálicos que presentan la habilidad de volver a una forma o tamaño predefinido cuando son sometidos a procedimientos térmicos. La base del efecto

memoria de forma es que estos materiales padecen un cambio en su ordenamiento cristalino o un cambio de fase cuando son calentados o enfriados a través de sus temperaturas de transformación característica. La aplicación de estos materiales en el desarrollo de sistemas disipadores de energía se fundamenta en las características de súper elasticidad y diferentes periodos de tensiones que estos materiales exhiben en carga y descarga.

1.2.2. Sistemas aisladores de base.

Un sistema de aislación de base es el conjunto de aisladores, sistema de amarres y contravientos que se instalan entre el edificio y su cimentación, dicho sistema puede estar compuesto únicamente por un solo tipo de aisladores, una combinación de diversos tipos de aisladores o aisladores y disipadores trabajando en conjunto.

El propósito de estos sistemas es desacoplar el edificio de los componentes horizontales del movimiento del suelo interponiendo elementos estructurales con rigidez horizontal baja entre el edificio y su cimentación, de tal manera que, cuando estos dispositivos se colocan en el edificio se alarga considerablemente el periodo fundamental de vibración de este alejándolo de las zonas de mayor amplificación del espectro de respuesta. Estos sistemas son generalmente aplicados en lugares donde los principales temblores que ocurren tienen gran contenido de frecuencias altas.

Para garantizar que un sistema de aislación tenga un desempeño satisfactorio como elemento estructural y como sistema de control sísmico es necesario que cumpla con los siguientes requisitos:

1. Soportar el peso propio y sobrecargas de la estructura con un factor de seguridad adecuado.
2. Contar con una gran flexibilidad horizontal, de modo que alargue el periodo fundamental de vibración de la estructura a una zona de menos aceleración espectral u horizontal.
3. Ser dotados de una rigidez vertical alta para evitar el balanceo de la estructura.
4. Proveer un adecuado nivel de amortiguación.
5. Soportar las deformaciones producto de las fuerzas cortantes.
6. Brindar la rigidez suficiente para evitar vibraciones molestas ante la ocurrencia de las cargas de servicio.
7. Asegurar una vida útil de por lo menos igual a la de la estructura o implementar un sistema que posibilite recambios de aisladores.
8. Ser efectivos antes, durante y después de la ocurrencia de sismos de baja, media y alta intensidad.
9. Poseer resistencia al intemperismo.

Según el material con que se fabrican y la manera en que trabajan, los aisladores son clasificados, según el manual FEMA-273 (1997), en aisladores elastoméricos, aisladores deslizantes y otros. Los aisladores elastoméricos son elementos fabricados con capas de polímeros con comportamiento elástico como el caucho o la goma, separadas por cuñas de acero y los aisladores deslizantes son fabricados en su mayoría por placas de acero con superficie plana o cóncava.

1.2.2.1. Aisladores elastoméricos.

Son apoyos fabricados con placas de caucho, neopreno o goma y placas de acero intercaladas unidas entre sí por un proceso de vulcanización. La rigidez de este tipo de apoyos es controlada mediante el espesor de las capas del polímero, mientras más gruesas las capas más flexibles resultarán los apoyos en el sentido horizontal. La rigidez vertical de los aisladores elastoméricos depende de las placas de acero, las cuales inhiben la expansión lateral de las placas de neopreno.

Según la amortiguación que tenga el polímero, los aisladores elastoméricos se dividen en: aisladores de caucho de alto amortiguamiento (HDR), aisladores de caucho de baja amortiguación (RB) y aisladores de caucho de baja amortiguación con núcleo de plomo (LRB). Además de las placas de acero en su interior, los aisladores elastoméricos cuentan con placas de acero colocadas en la parte inferior y superior para poder ser conectados con la cimentación y la superestructura respectivamente.

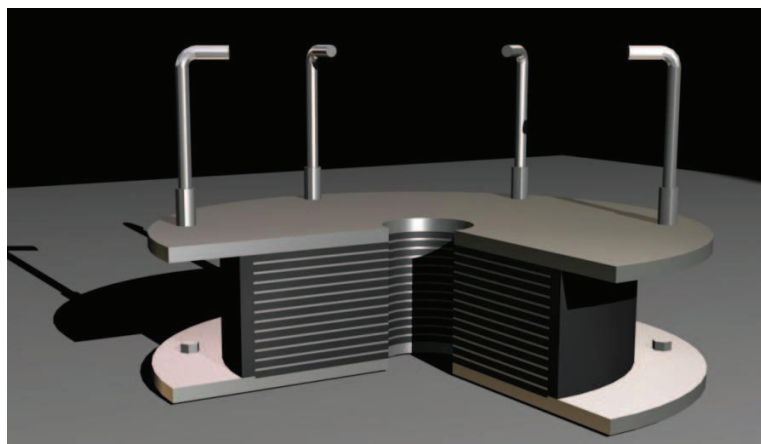


Imagen 1.12. Aislador elastomérico. (Fuente: <http://sirve.cl/galeria/?page=1>)

Los aisladores elastoméricos son fabricados con forma de cilindros debido a que esta geometría permite que la pieza no se vea afectada por la dirección en que se aplica la carga, de tal manera que puede repartir los esfuerzos de manera uniforme a la cimentación.

1.2.2.1.1. Apoyos de caucho de alto amortiguamiento (HDR).

Conocidos también como HDR por sus siglas en inglés, estos aisladores son fabricados con caucho de mayor amortiguamiento, por lo que ayuda a disminuir los desplazamientos del aislador y aumenta su capacidad de disipación de energía. Este aumento en la cantidad de energía que puede disipar este tipo de aislador es debida a la adición de partículas de carbón ultrafinas, resinas o aceites y otros componentes durante la fabricación del elastómetro. El material no es lineal para deformación por cortante menores al 20% y se caracteriza por una elevada rigidez inicial, útil para resistir empujes del viento, temblores moderados y el paso de vehículos. Sin embargo, estos sistemas son dependientes tanto de los desplazamientos, como de la historia de carga. También se ha observado que tienen cierta dependencia con la temperatura, los efectos de deformación y fluidez del material (efectos reológicos).

La disipación de energía en los apoyos HDR es un caso intermedio entre un amortiguamiento viscoso y uno histerético. En un caso puramente viscoso la disipación de energía es proporcional al cuadrado del desplazamiento, mientras que en un sistema histerético esta relación es lineal.

1.2.2.1.2. Apoyos laminados con núcleo de plomo (LBR).

Conocido también como LRB, este aislador fue propuesto inicialmente en 1975 por Robinson (Skinner, et al, 1993) y pocos meses después se aprobó su utilización en los puentes Toe Toe en 1978 y Waiotukupuna en 1981, en Nueva Zelanda; a partir de entonces estos dispositivos han sido utilizados ampliamente en todo el mundo. El éxito que ha tendido este tipo de apoyos, se debe a que sólo se requiere una ligera modificación en su adaptación física con respecto a los apoyos tradicionales de neopreno, aunado a la economía, sencillez, fiabilidad y bajo mantenimiento que demanda.

Al insertar un elemento de plomo en el núcleo de un apoyo elastomérico, se obtiene un dispositivo compacto que ha sido utilizado principalmente para la protección sísmica de puentes.



Imagen 1.13. Apoyo laminado con núcleo de plomo. (Fuente: http://www.maurer-soehne.es/files/bauwerkschutzsysteme/images/lead_rubber_bearings_2.jpg)

Las razones por las que se combina de manera adecuada el plomo con los apoyos laminados son: su baja resistencia de fluencia para esfuerzos cortantes (10 MPa), su rigidez inicial a cortante suficientemente elevada, su comportamiento prácticamente elasto-plástico y sus buenas propiedades de fatiga para desplazamientos inelásticos.

Priestley et al. (1996), indican que en caso de colocar un elemento de plomo con diámetro igual a la cuarta parte del diámetro de un apoyo circular, la rigidez inicial es 10 veces aproximadamente la rigidez del apoyo laminado solo, lo que reduce significativamente los desplazamientos debidos al viento, sismos moderados, fuerzas longitudinales de vehículos en puentes y, en general, para las condiciones de servicio. Como el plomo responde casi como un material elasto-plástico, tal como se menciona anteriormente, la rigidez del apoyo después de la fluencia es prácticamente la del apoyo laminado. Por tal motivo la respuesta del dispositivo es muy cercana a la de un material bilineal.

Para que el trabajo del elemento de plomo sea eficaz, es imperativo que se encuentre perfectamente bien confinado por las placas de acero del apoyo, de forma que permita asegurar un comportamiento de cortante puro, para ello, Jara (2006) recomienda que el volumen del plomo sea un uno por ciento mayor que el volumen de la perforación en la que se insertará.

1.2.2.2. Apoyos deslizantes o péndulos de fricción (FPS).

Estos aisladores constan de un deslizador articulado revestido por politetrafluoroetileno (teflón) montado sobre una superficie esférica cóncava de

acero inoxidable. El coeficiente de fricción para estos apoyos es del 0.03 para velocidades de deformación lentas, como las producidas por los cambios de temperatura. Para velocidades típicas de un sismo los coeficientes de fricción oscilan entre 0.1 y 0.15, o aún más.



Imagen 1.14. FPS fabricado a escala para el estudio de su comportamiento.

(<http://thebowls.blogspot.com/2010/06/this-week-we-began-assembly-and-testing.html>)

Los apoyos FPS se activan solo cuando la fuerza de corte sobre la superficie de aislación supera la fuerza de fricción estática. Una vez en movimiento, el deslizador oscilará a lo largo de la superficie esférica cóncava de acero causando la elevación de la masa soportada. Dicho lo anterior, el accionar de los aisladores FPS se compone de dos fases, la primera se presenta cuando el deslizador está estático y la segunda corresponde al aislador en movimiento.

Los ciclos fuerza-desplazamiento de estos apoyos son aproximadamente rectangulares y proporcionan un alto amortiguamiento histérico. Sin embargo, no cuentan con una fuerza de recuperación que elimine los grandes desplazamientos que se generan en el dispositivo, en caso de que las fuerzas de inercia sean sustancialmente mayores a las fuerzas de fricción del apoyo. Por otra parte, la fuerza equivalente de fluencia depende de la fricción y por lo tanto resulta poco fiable. Otro inconveniente de los dispositivos de apoyos deslizantes es que debe de proporcionársele servicio de mantenimiento constante, especialmente para apoyos lubricados.

Por lo impredecible y la ausencia de una fuerza de recuperación, los apoyos deslizantes son generalmente utilizados en conjunto a sistemas de disipación de energía.

1.2.3. Amortiguadores de masa (TDM).

A la fecha se han empleado amortiguadores de masa o TMD en un número significativo de edificios altos, puentes, torres y chimeneas, en el mayor de los casos para controlar las vibraciones producidas por el viento. Estos amortiguadores constan de una masa con una rigidez y amortiguamiento propios, son diseñados especialmente para proporcionar un comportamiento histérico dependiente de la frecuencia y que incrementa el amortiguamiento en la estructura que se instalarán.

Los amortiguadores de masa tradicionales trabajan bajo el concepto de un péndulo simple, cuyo periodo trata de sintonizar con el primer modo natural de la estructura que se pretende amortiguar. El problema con estos sistemas es el espacio

que requieren para su instalación, por ello, a lo largo de los años se han efectuado múltiples modificaciones en los componentes de estos sistemas como lo son sus brazos y la masa, obteniendo como resultado el uso de masas deslizantes o péndulos de varias etapas con diseños relativamente compactos.

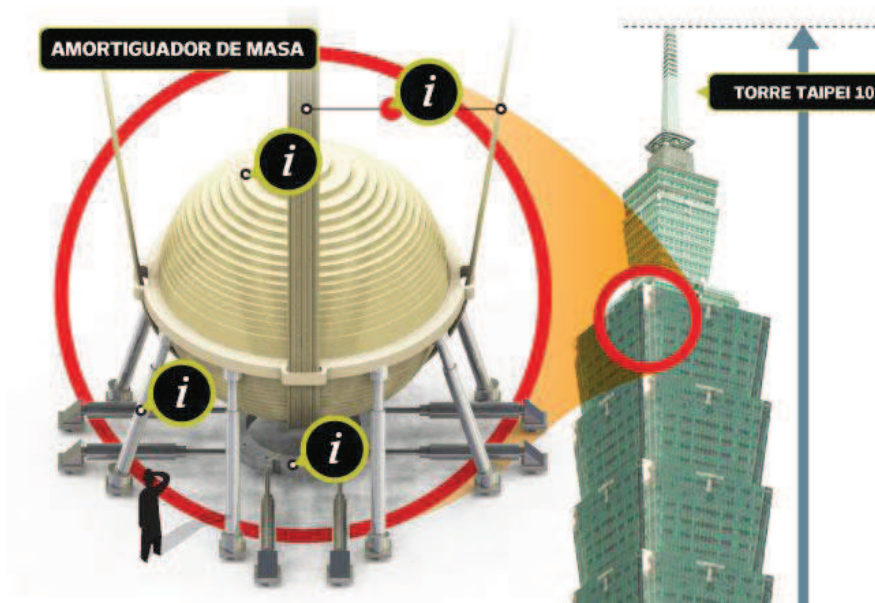


Imagen 1.15. Amortiguadores de masa en la Torre Taipei 101. (Fuente: http://www.eluniversal.com.mx/graficos/graficosanimados11/EU_tecnologia_antisismos/resistencia.html)

Estudios realizados por Aguiñiga y Jara (1993) demostraron que una limitación importante para la aplicación de estos sistemas radica en el comportamiento del oscilador o masa, debido a que el oscilador se ve sometido a demandas de desplazamientos que resultan inalcanzables desde el punto de vista práctico; sin embargo, al permitir que la estructura tenga demandas de ductilidad moderadas, los

desplazamientos del oscilador disminuyen considerablemente haciendo más factible la aplicación de este sistema.

Con la misma idea del sistema amortiguador de masas, se han propuesto otros sistemas como los amortiguadores resonantes de líquido. Estos amortiguadores tienen el objetivo de reducir las vibraciones producto del viento en estructuras de gran altura. Para lograrlo, el amortiguador utiliza el movimiento del líquido como disipador de energía, es decir, cuando el edificio comienza un desplazamiento el líquido en el interior del dispositivo también, solo que en dirección contraria logrando así un balance en los desplazamientos.

Los amortiguadores resonantes de líquido han tenido gran aceptación debido a que son más económicos que los sistemas amortiguadores de masas, prácticamente no requieren mantenimiento y no necesitan de un umbral de disparo ya que siempre están activos. Estos amortiguadores consisten generalmente en un tanque comercial de polipropileno con varias capas de agua; la altura de la columna de agua es el parámetro que define la frecuencia del sistema. En el caso de estructuras con frecuencias fundamentales diferentes en dos direcciones perpendiculares se pueden usar tanques rectangulares cuyas dimensiones compensen el movimiento del edificio, aunque un método más eficiente sería el uso de tanques cilíndricos.

Cabe mencionar que estos dispositivos suelen tener buen desempeño en movimientos de banda angosta, tales como los producidos por el viento o por sismos ocurridos en zonas con terrenos blandos.

1.2.4. Control activo.

En los sistemas de control activo se utilizan dispositivos que responden según las solicitaciones impuestas por un sismo, activándose por medio de una fuente externa de energía. Consisten en sensores colocados a lo largo de los niveles de la estructura con el propósito de registrar fuerzas externas aplicadas a la estructura, estos envían la información recabada hacia unos dispositivos computarizados que procesan la magnitud de la información y calculan la fuerza de control necesaria para así enviar a los sistemas de disipación la información necesaria para que contrarrestar la fuerza aplicada sobre la estructura. Es un proceso cíclico en el cual, el ordenador va realizando su propio historial en base a la magnitud y periodicidad de ocurrencia de cargas externas, permitiéndole mejorar la respuesta del edificio.

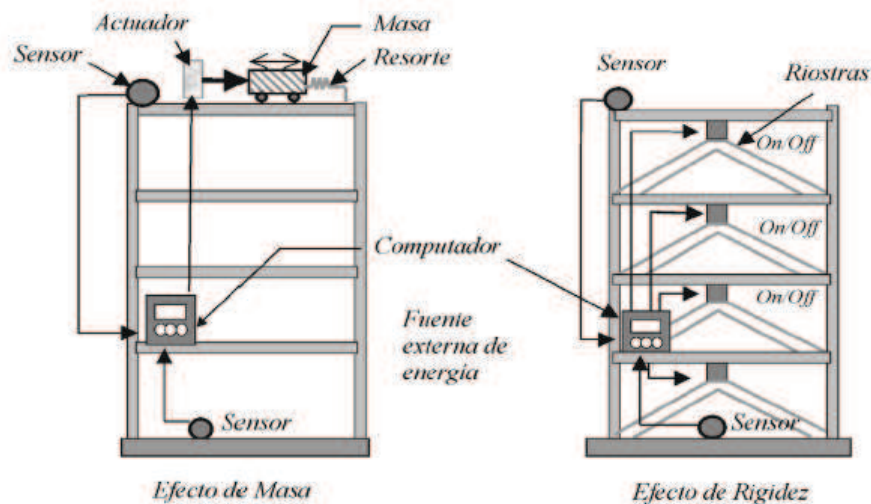


Imagen 1.16. Aplicación de sistema de control activo de masa activa y tendones activos. (Fuente: Oviedo, Juan A., 2006)

El control activo presenta una serie de ventajas en comparación con los sistemas pasivos, entre estas ventajas se pueden citar:

- a) Mejor efectividad en el control de vibraciones de la estructura.
- b) Insensibles a las condiciones del terreno y a las características dinámicas del movimiento.
- c) Útiles en la mitigación de diferentes tipos de riesgo como sismos y vientos extremos.
- d) Permiten seleccionar el tipo de acciones sobre las que debe dar protección a la estructura.

1.2.4.1. Masa activa.

Este sistema es una variación del amortiguador de masa activa, pero en este caso el movimiento de la masa es controlado por medio de una computadora que evalúa el movimiento al que es sometido la estructura y envía a los adecuadores del sistema la cantidad de movimiento que debe aplicarse a la masa, este sistema, a diferencia de sistema pasivo con osciladores resonantes, este tipo de sistema activo también controla el movimiento del edificio en sismos de banda ancha.

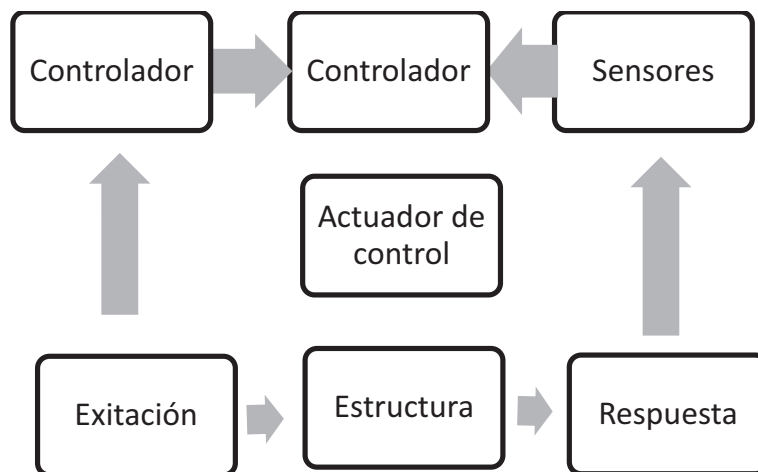
1.2.4.2. Tendones activos.

Los tendones son contravientos colocados diagonalmente en forma de X que abarcan uno o varios niveles de las estructura. Al igual que en el sistema de masa activa, una computadora envía a un adecuador la fuerza necesaria que cada tendón deberá tener para disipar la energía sísmica según las necesidades de cada marco.

Estos tendones modifican las propiedades dinámicas de la estructura alejando su periodo fundamental de las frecuencias dominantes del temblor para cada instante y con esto evitar el efecto de resonancia.

1.2.5. Control semiactivo.

El término semiactivo se emplea para indicar que la operación de estos sistemas de control requieren de una cantidad pequeña de una fuente de energía externa. Por lo que, a lo largo de los últimos años se han tornado en una opción atractiva para reducir los efectos sísmicos en una estructura ya que conservan los beneficios de un control activo y pasivo.



Esquema 1.2. Funcionamiento de un sistema de control semiactivo (Fuente: Villareal, 2009)

Entre los sistemas más comunes se encuentran los amortiguadores de orificios variables, amortiguadores de fricción variable y osciladores líquidos

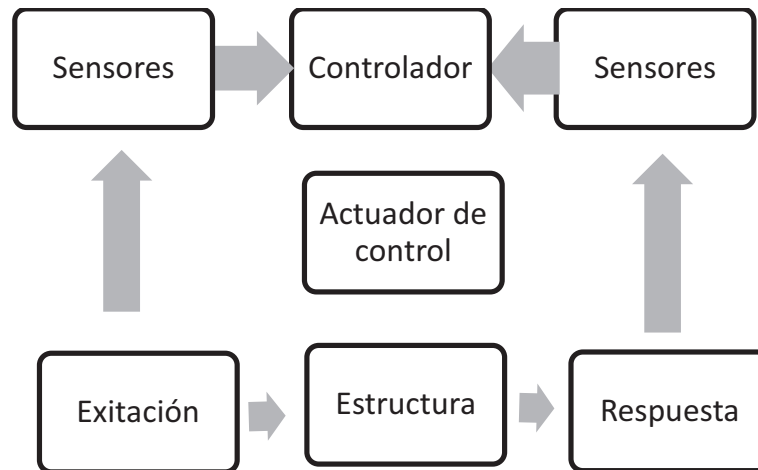
controlables. Todos los sistemas anteriores requieren de electricidad para controlar las válvulas y mecanismos, lo que hace menos confiable que los sistemas pasivos y les exige mayor mantenimiento.

Un sistema semiactivo que ofrece mayor simplicidad y mayor fiabilidad, consiste en un dispositivo con un fluido magnetorológico (MR) o electroreológico (ER). Debido a su capacidad para trabajar como válvulas rápidas, estos dispositivos tienen como única parte móvil un pistón, sin necesidad del uso de partes móviles que pongan en riesgo la fiabilidad del sistema. La característica esencial de estos fluidos controlables es su capacidad para transformarse de un fluido viscoso lineal a un material semisólido con una gran resistencia de fluencia controlable en tan solo unos milisegundos

1.2.6. Sistemas de control híbrido.

Los sistemas de control híbridos son la combinación de los sistemas activos y pasivos. Debido a que el control se consigue a partir de la actuación de un dispositivo pasivo, los sistemas híbridos suponen mejoras con relación a los sistemas activos, tales como:

- En caso de falla del componente activo, aunque de forma menos efectiva, el sistema pasivo sigue ejerciendo funciones de control.
- Los requerimientos energéticos son inferiores.



Esquema 1.3. Funcionamiento de un sistema de control tipo híbrido (Fuente: Villareal, 2009)

Los sistemas híbridos que han despertado mayor interés para su estudio y desarrollo son los llamados Híbrido Mass Damper (HMD). Este sistema dispone de una masa oscilante pasiva, que por sí misma reduce la respuesta del edificio, y de un actuador activo, el cual mejora la eficiencia del sistema y además le da una mayor rigidez frente a los cambios dinámicos que afectan a la estructura.

El comportamiento pasivo desacopla parcialmente la estructura del terreno, producto de un desplazamiento significativo entre la subestructura y la superestructura. Por ello, el objetivo del componente activo es controlar este movimiento mediante un adecuador.

1.3. Colocación, inspección y mantenimiento de sistemas de control sísmico.

Como todo elemento estructural, es vital que los sistemas de control sísmico cuenten con normas y procesos estandarizados de instalación, inspección y

mantenimiento, en los cuales sean establecidos los requisitos mínimos para que el desempeño del sistema sea seguro y eficiente. En estas normas se plasman los procesos de instalación, calidad de materiales y criterios de prueba en ciclos de carga y descarga del sistema.

En el mundo existen diversos organismos que se han encargado de la elaboración de estas normas para los sistemas de disipación, uno de ellos es la Agencia Federal para el Manejo de Emergencias, ó FEMA por sus siglas en ingles, esta agencia norteamericana en la edición de su manual del año de 1997 estipula los requerimientos para el diseño, prueba e instalación de sistemas de control sísmico. En México el único organismo que prevé la instalación de sistemas de control en estructuras es la Comisión Federal de Electricidad, que en su manual de Obras Civiles establece los lineamientos de diseño, prueba y mantenimiento que se deben seguir. Cabe mencionar que los parámetros establecidos en ambos manuales únicamente tienen alcance sobre los sistemas de control pasivos para el caso de disipadores y aisladores.

El Manual para Diseño de Obras Civiles (Diseño por Sismos) de la CFE, decreta que toda estructura equipada con disipadores de energía sísmica y/o aisladores de base debe contar con un programa detallado de inspección; que para poder ser llevada a cabo de manera eficiente es necesario que el lugar donde fueron instalados los dispositivos cuente con el espacio apropiado para realizar las inspecciones y en su defecto las maniobras de mantenimiento y reemplazo de los disipadores.

Al momento de ser colocados los disipadores, estos deben quedar ubicados de tal manera que no se vean sometidos a esfuerzos no considerados en las pruebas, también será necesario que las condiciones de apoyo y funcionamiento de los disipadores una vez instalados deben ser similares al de los prototipos probados en el laboratorio.

1.3.1. Características y anclajes de los dispositivos.

Se tendrá que tomar en cuenta las fuerzas horizontales que el dispositivo transmite a la superestructura y subestructura mediante los anclajes. Por ello, al evaluar la fuerza horizontal soportada por la estructura y los disipadores debe considerarse la restricción que puedan proporcionar muros de retención, topes o cualquier otro elemento que aporte restricciones al desplazamiento horizontal.

A su vez, los anclajes deben diseñarse para soportar las fuerzas máximas obtenidas en la interface del sistema de aislamiento, la subestructura y la superestructura. No se permitirá por ningún motivo la reducción por concepto de ductilidad en el diseño de los anclajes.

Se podrán dejar holguras entre los disipadores y la estructura para permitir movimientos por temperatura, contracción, flujo plástico y similar; también serán permitidas las holguras para evitar el daño en elementos no estructurales.

1.3.2. Verificación experimental.

Las relaciones fuerza-desplazamiento y los valores de amortiguamiento deben verificarse mediante ensayos de laboratorio, siendo estos supervisados y autorizados

por las autoridades correspondientes y personal especialista en la materia. Los objetivos de dichos ensayos de laboratorio son:

- a) Confirmar las propiedades fuerza-desplazamiento de los disipadores.
- b) Comprobar el adecuado desempeño de los disipadores bajo excitaciones sísmicas extremas.

Por ningún motivo se permitirá que el programa experimental sea considerado como sustituto del control de calidad en la manufactura de los dispositivos.

El Manual de CFE recomienda que las autoridades reservarse la exigencia de la verificación experimental del sistema si éste es fabricado en dimensiones, tamaño, materiales y control de calidad idénticos a otros sistemas ensayados con anterioridad por un laboratorio independiente.

1.3.3. Ensayes en dispositivos disipadores de energía.

Durante el ensaye, cada disipador deber ser cargado para simular los efectos gravitacionales y si es el caso, se considerarán las temperaturas extremas a las que estará sometido el disipador.

A cada disipador se le aplicarán por lo menos 20 ciclos reversibles completos a un desplazamiento igual al máximo esperado y a una frecuencia ω igual a la fundamental del sistema estructura-disipador, de tal manera que se considerará satisfactorio el desempeño del disipador si:

1. Las curvas fuerza-desplazamiento no muestran degradación de resistencia.

2. La rigidez equivalente del prototipo para cada ensaye y para cualquier ciclo de carga no difiere en $\pm 15\%$ del promedio de las rigideces del total de ciclos.
3. Para cada ensaye, la fuerza para desplazamiento nulo del prototipo, para cualquier ciclo de carga, no difiere en $\pm 15\%$ del promedio de las fuerzas para desplazamiento nulo del total de ciclos.
4. Para cada ensaye el área de cada lazo histérico del prototipo, para cualquier ciclo de carga, no difiere en $\pm 15\%$ del promedio de áreas encerradas por las curvas de histéresis del total de ciclos.

Aparte de los requisitos mencionados anteriormente en el Manual de Obras Civiles de CFE deben tomarse en cuenta los siguientes criterios plasmados en el manual de la FEMA-273 (1997):

- Temperatura de operación: deben verificarse que los niveles de temperatura ambiente no interferirán con el correcto funcionamiento de los sistemas.
- Condiciones ambientales: el material considerado para la fabricación de los dispositivos de control debe ser lo suficientemente resistente para soportar los efectos del envejecimiento de sus piezas, fallas por fatiga, cambios de temperatura, humedad y sustancias dañinas del ambiente en que será instalado.
- Fuerzas del viento: en el diseño de los dispositivos deben considerarse las fuerzas inducidas a este por corrientes de viento con ciclos bajos causantes de fallas por fatiga debiendo ser soportadas por los dispositivos en un rango elástico.

- Control de calidad en la fabricación de los dispositivos: el ingeniero a cargo del diseño de los dispositivos deberá realizar en conjunto con el fabricante un plan de control de calidad donde se detallen los procesos de fabricación, inspección y prueba de los sistemas.
- Revisión del diseño: esta revisión debe ser llevada a cabo por un panel ajeno al que efectuó el diseño con la suficiente experiencia y conocimiento en sísmica y análisis sísmico, así como en diseño, prueba e instalación de sistemas de disipación. La revisión del diseño incluye, pero no se limita solamente al: diseño preliminar, prueba de dispositivos, diseño final del edificio y programa de control de calidad para fabricación y mantenimiento de los dispositivos.

1.3.4. Ensayes en sistemas de aislación.

Para la prueba de sistemas de aislación el Manual de Obras Civiles de CFE propone la siguiente secuencia de ensayos para una carga vertical igual al promedio de $(N)CM + (N)Wa$ en todos los aisladores de un mismo tipo y tamaño. $(N)CM$ es la fuerza normal debida a la carga muerta y $(N)Wa$ es la fuerza normal debida a carga viva instantánea: al menos 10 ciclos reversibles completos para desplazamientos del 25%, 50% y 100% del máximo esperado.

Si en los aisladores actúan fuerzas normales $(N)S$ debidas a la carga lateral, adicionalmente se ensayarán los especímenes para las siguientes combinaciones de cargas verticales:

$$a) 1.2(N)CM + (N)Wa + |(N)S| \qquad b) 0.8(N)CM - |(N)S|$$

Para estudiar la estabilidad vertical de los aisladores deberán realizarse pruebas estáticas combinando la máxima carga vertical $1.2(N)CM + (N)Wa + |(N)S|$ y la mínima carga vertical $0.8(N)CM - |(N)S|$ con el desplazamiento máximo esperado incrementado en un 50%. La combinación de cargas verticales debe ser la más desfavorable que se presente en cualquiera de los aisladores del sistema.

Si las propiedades fuerza–desplazamiento de los aisladores dependen de la velocidad de aplicación de la carga, entonces los ensayos deben efectuarse a una frecuencia ωD igual a la fundamental de la estructura aislada. Se considera que las propiedades fuerza–desplazamiento de un aislador son dependientes de la velocidad de aplicación de la carga si hay una diferencia igual o mayor que el 10% en la rigidez efectiva para un desplazamiento igual al de diseño cuando (a) se ensaya a una frecuencia igual a la fundamental de la estructura aislada, y (b) se ensaya a cualquier frecuencia en el intervalo de 0.1 a 2 veces la frecuencia fundamental de la estructura aislada.

Si las propiedades fuerza–desplazamiento de los aisladores dependen de los efectos bidireccionales, el número de ensayos debe aumentarse para incluir la fuerza bilateral para los siguientes incrementos del desplazamiento máximo esperado: 0.25 y 1.0; 0.50 y 1.0; 0.75 y 1; y 1.0 y 1.0. Se considera que las propiedades fuerza–desplazamiento de un aislador dependen de la bidireccionalidad de la carga si en las propiedades fuerza–desplazamiento bilaterales y unilaterales existe una diferencia igual o mayor que el 15% en la rigidez efectiva para un desplazamiento igual al de diseño.

Para calcular la rigidez equivalente y el amortiguamiento de los aisladores se utilizará el promedio de los valores absolutos de las fuerzas positiva y negativa ($F+$ y $F-$), que se presentan cuando ocurren los desplazamientos máximos positivo y negativo (x_{max+} y x_{max-}), respectivamente.

El desempeño de cada prototipo se considerará satisfactorio si se cumplen las siguientes condiciones:

- a) Los diagramas fuerza–desplazamiento de los ensayos no muestran degradación de resistencia.
- b) Para cada incremento de desplazamiento y para cada combinación de carga vertical se satisfacen los siguientes criterios:
 - La rigidez equivalente del prototipo, para cualquier ciclo de carga no difiere en $\pm 15\%$ del promedio de las rigideces efectivas del total de 10 ciclos para desplazamiento por sismo.
 - No hay más de un 15% de diferencia en el valor promedio de la rigidez efectiva de los dos especímenes de un mismo tipo y tamaño de aislador, para los 10 ciclos requeridos de cada prueba.
 - Para cada espécimen no hay más de un 20% de decremento en el amortiguamiento para los 10 ciclos requeridos de cada prueba.
- c) Los especímenes del sistema de aislamiento permanecen estables ante la aplicación de las diferentes combinaciones de carga vertical y el desplazamiento máximo esperado.

CAPÍTULO 2

COMPORTAMIENTO SÍSMICO DE ESTRUCTURAS CON SISTEMAS DE DISIPACIÓN DE ENERGÍA.

Los disipadores de energía sísmica son dispositivos añadidos a las estructuras para incrementar la rigidez en el sistema reduciendo el periodo efectivo de la estructura y por consecuencia los desplazamientos. Cuando a una estructura se le añaden sistemas de disipadores, su comportamiento es modificado y por ende también se modifican los métodos de diseño y las respuestas sísmicas de la estructura. En el siguiente capítulo se abordarán las técnicas de modelado para el diseño de estructuras con disipadores, así como las diversas filosofías de diseño y normativas internacionales.

2.1. Comportamiento de sistemas de disipación ante cargas sísmicas.

Los sistemas pasivos de disipación de energía utilizan un amplio rango de materiales y tecnologías para mejorar el amortiguamiento, rigidez y resistencia de las estructuras. La disipación de energía puede ser interpretada incluso como la conversión de energía cinética a calor o por la transferencia de la energía a los modos de vibración.

Los sistemas histéricos, por definición, disipan la energía a través de un mecanismo que es independiente del rango de aplicación de la carga. En este grupo están incluidos los disipadores metálicos que utilizan la plastificación de metales y los disipadores friccionantes que generan calor a través de la fricción de deslizamiento.

Las estructuras con disipadores exhiben radios de amortiguamiento modal significativamente mayores que aquellos asociados a estructuras tradicionales. Esto es particularmente cierto en los modos superiores, donde los radios de amortiguamiento pueden alcanzar valores cercanos o incluso exceder sus valores críticos. El término de amortiguamiento en la ecuación de movimiento de estructuras con disipadores se vuelve importante en la determinación de las propiedades modales de la estructura. El efecto de la adición de disipadores a una estructura no es solamente un incremento en el amortiguamiento, también es una redistribución de los amortiguamientos modales.

Una estructura tradicional se comporta linealmente o no linealmente bajo una condición de carga dada, una estructura con disipadores generalmente exhibe un comportamiento no lineal porque la dinámica del disipador generalmente es no lineal en velocidades y desplazamientos locales. Esto complica los procedimientos del análisis estructural. A pesar de que un riguroso análisis tiempo-historia no lineal sea realizado, es necesario verificar el diseño final, con suficiente aproximación, siendo necesarios para el diseño preliminar los métodos simples aproximados del análisis estructural.

El objetivo del análisis dinámico tradicional planteado en las normas de diseño usadas en México consiste en la determinación de desplazamientos, velocidades, aceleraciones y fuerzas; sin embargo, para estructuras con sistemas de control pasivo, resulta más apropiado un enfoque de diseño basado en la energía, en el que el objetivo no está relacionado directamente con la resistencia del sistema, sino con la forma en que se disipa la energía que introduce el sismo a la estructura.

La deformación inelástica de metales es una alternativa muy eficiente para disipar la energía. Kelly y Skinner (1975) fueron los primeros en explorar el uso de este tipo de dispositivos con trabajos de carácter teórico y experimental. Al incorporar los disipadores de energía que se basan en el concepto la plastificación, se transforma el comportamiento de un sistema estructural lineal en un sistema no lineal.

Para poder incluir los dispositivos de disipación por plastificación en el diseño de una estructura, es necesario caracterizar lo más fielmente posible su comportamiento histérico bajo una carga cíclica arbitraria, para lo cual se han desarrollado algunos intentos con modelos inelásticos constitutivos del material. Se han propuesto algunos procedimientos para incorporar el modelo histérico del amortiguador en la ecuación de movimiento del sistema y también se han hecho propuestas empleando el concepto de amortiguamiento viscoso equivalente. En el desarrollo de modelos histéricos confiables, es indispensable su calibración con datos experimentales o de mediciones de casos reales.

2.2. Comportamiento sísmico de amortiguadores por plastificación de metales.

Los amortiguadores por plastificación de metales o fluencia de metales, son los disipadores de energía pasivos que han sido empleados con mayor frecuencia, solos, o en combinación con algunos otros sistemas de control tales como el aislamiento sísmico. En especial, se ha preferido el uso de amortiguadores de acero debido al mayor conocimiento sobre las propiedades y procedimientos de diseño de

este material, así como por la economía y por el relativamente bajo mantenimiento que requieren.

El tipo de dispositivos que se han propuesto para su aplicación práctica en estructuras ha crecido considerablemente en los últimos años, sin embargo, todos parten del mismo principio de disipación a través de la deformación histérica del metal. Los dispositivos metálicos que han sido utilizados desde el inicio del desarrollo de estos sistemas, son tres: el formado por una viga sometida a flexión uniforme mediante brazas transversales, una viga en voladizo de sección variable que trabaja a flexión y una viga con brazos transversales que se deforma como resultado de un momento de torsión. La intención de mantener la mayor parte del volumen del elemento disipador bajo un mismo nivel de deformación, justifica la geometría de estos dispositivos.

Para emplear los amortiguadores metálicos es necesario contar con ayudas de diseño y procedimientos basados en el conocimiento generado por estudios de tipo teórico y experimental generados hasta la fecha. Las características deseables de los disipadores de energía son: comportamiento histérico aceptable, confiabilidad a largo plazo, alta capacidad de fatiga para cargas cíclicas y poca sensibilidad a los cambios por variaciones en el ambiente. Para lograr que los amortiguadores tengan un comportamiento elastoplástico estable y una vida prolongada bajo condiciones cíclicas den el intervalo inelástico Priestley (1996) recomienda vigilar los siguientes aspectos:

- Evitar problemas de inestabilidad utilizando elementos plásticos de sección compacta.
- Limitar la concentración de esfuerzos en la conexión entre el disipador y la estructura.
- Evitar la posible falla en la soldadura debido al fenómeno de fatiga o concentración de esfuerzos.
- Diseñar dispositivos que experimenten deformaciones iguales sobre gran parte del volumen del metal que constituye el dispositivo.
- Limitar las incursiones plásticas de acuerdo con el criterio de diseño elegido, generalmente, que resista la acción de varios sismos de diseño y un sismo externo durante su vida útil.

Para la elección del tipo de disipador deben considerarse factores como el espacio disponible, la facilidad para su inspección y mantenimiento, las condiciones ambientales y su disponibilidad en el mercado; así mismo debe tenerse en cuenta las ventajas y desventajas que estos tienen. Entre las ventajas de los disipadores por plastificación de metales se encuentran:

- Comportamiento histórico estable.
- Fiabilidad a largo plazo.
- Insensibilidad ante cambios por temperatura en el ambiente.
- Comportamiento y materiales conocidos por los ingenieros estructuristas.

Las desventajas que presentan estos disipadores son:

- El dispositivo se puede resultar dañando después de un sismo de alta intensidad por lo que sería necesario su reemplazo total.
- Comportamiento no lineal que requiere del uso de sistemas de análisis no lineales más complejos a los sistemas de análisis estáticos.

2.3. Modelamiento matemático.

El concepto moderno de diseño dice que: “para que una estructura esté bien diseñada, debe tener un número limitado de miembros que requieren ductilidad y el mecanismo de falla debe estar claramente definido” (Wilson, 2000; 23). De acuerdo con esto, para el diseño de edificaciones que utilicen un sistema de disipación de energía debe contarse con un modelo de análisis que considere la respuesta dinámica inelástica respecto al tiempo del sistema estructural, de esta manera el mecanismo de falla quedará claramente definido.

Las nuevas metodologías de diseño por desempeño especificadas en las normas internacionales tales como el Eurocodiogo 8, normas ASSTHO, recomendaciones del FEMA y el Manual para Diseño de Obras Civiles de CFE, y las opciones de análisis que presentan algunos de los programas más comerciales hacen posible realizar este tipo de estudios. Por mencionar alguno, el programa SAP2000, a partir de su versión 7, ofrece la posibilidad de llevar a cabo un análisis que combina los métodos de superposición modal e incremental para sistemas estructurales con una pequeña cantidad de miembros no lineales. De esta manera, no se requiere un análisis paso a paso en el que deban variar las propiedades mecánicas de la estructura completa en cada iteración, sino solamente las

propiedades de los elementos no lineales, en este caso los dispositivos. Este método se conoce como método rápido no lineal o FNA (fast nonlinear analysis) por sus siglas en inglés.

Otro método que se puede utilizar es el método del incremento de carga o push-over, en el cual se lleva a cabo un análisis estático de la estructura para cada incremento de carga o desplazamiento. En cada iteración se detectan los puntos que entran en fluencia y se modifican sus propiedades para la siguiente iteración.

Con el fin de estudiar la respuesta de la estructura ante la imposición de cargas se utiliza un modelo basado en la mecánica newtoniana. Toda estructura responde dinámicamente ante la acción de cargas o deformaciones, generando fuerzas inerciales iguales a las de su masa por la aceleración, dicha afirmación está plasmada en la segunda ley de Newton y en la ecuación dinámica de equilibrio.

Parara cargas o deformaciones aplicadas de una manera lenta, que es el caso de cargas muertas y vivas no dinámicas, las fuerzas inerciales pueden despreciarse, lo que hace posible un análisis estático de la estructura. Esta simplificación no es válida cuando la estructura se somete a cargas dinámicas o deformaciones rápidas como las causadas por viento, sismos y cargas vivas dinámicas o con impacto.

Si se considera un sistema estructura idealizado en un modelo de un grado de libertad, como en la imagen 2.1, en dicho sistema se representa una masa concentrada m soportada por un elemento de rigidez k , con un coeficiente de amortiguamiento viscoso c propio. El sistema es sometido a una carga sísmica caracterizada por un desplazamiento del suelo $X_g(t)$ y una carga $P(t)$ que puede o no

ser dependiente del tiempo. La respuesta del sistema consiste en determinar el desplazamiento de la masa en cualquier instante con respecto a su posición inicial general, $X_i(t)$.

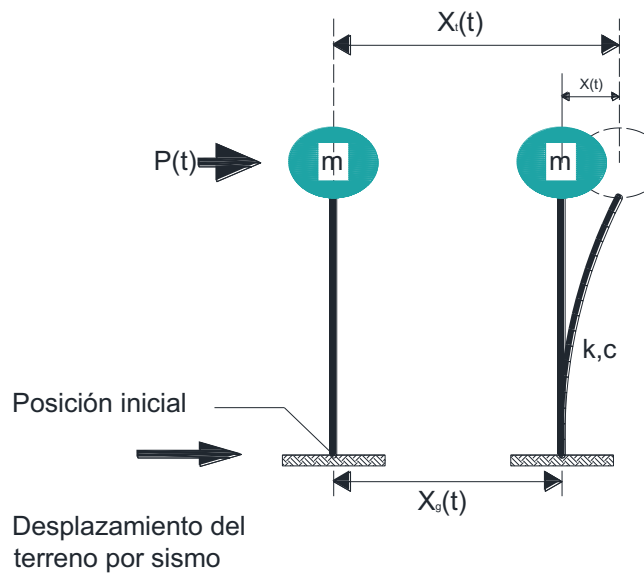


Imagen 2.1. Sistema de un grado de libertad. (Fuente: Oviedo Andrés Juan y Duque María del Pilar; 2006, p. 107)

Este parámetro se calcula en función del desplazamiento del terreno y del desplazamiento de la masa con respecto a su base:

$$X_i(t) = X_g + X(t) \quad (2.1)$$

Para estas condiciones, la ecuación de equilibrio dinámico se escribe como:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = -m\ddot{x}_g + p \quad (2.2)$$

Donde:

$m\ddot{x}$ representa la fuerza inercial de la masa de la edificación.

c_x es el amortiguamiento inherente del sistema.

k_x es la fuerza elástica del sistema.

Housner (1956) propone utilizar el concepto de energía como herramienta para determinar el comportamiento y las respuestas de una estructura ante cargas dinámicas. Debido a que la ecuación de equilibrio dinámico está planteada en términos de fuerzas, estas se multiplican por el desplazamiento dx , expresado como $x dt$, que es una función de la velocidad, para encontrar el trabajo realizado. Al integrar la ecuación resultante respecto al tiempo de aplicación de la carga dinámica se obtiene la ecuación de balance de energía desarrollado en el sistema estructural.

Para el caso concreto de los disipadores por flexión ó plastificación de metales, y a pesar de las diferencias en su geometría, el mecanismo de disipación en todos los casos resulta de la deformación inelástica de un metal. Por lo tanto, para emplear efectivamente un disipador de este tipo, es necesaria la elaboración de un modelo matemático que en sus elementos sean plasmadas detalladamente las características fuerza-deformación del material; así mismo, también deben considerarse los valores de carga de fluencia, rigidez y re-endurecimiento, dichos valores pueden ser definidos en base a las características mecánicas del acero o material con el que se fabrique el dispositivo y la geometría.

Para definir las propiedades fuerza-deformación del disipador, según Oviedo Sarmiento Ricardo (2008), existen dos aproximaciones validas; la primera de ellas consiste en el uso directo de la información obtenida de la experimentación a disipadores análogos al que el estructurista pretende usar en su proyecto y realizar el

ajuste en las curvas esfuerzo-deformación según la geometría del disipador en cuestión. La segunda aproximación consiste en realizar una curva esfuerzo-deformación propia del disipador en base a su geometría y propiedades mecánicas del elemento, esta aproximación podría resultar más exacta a la anterior, pero conlleva un elevado grado de dificultad para su definición debido a la necesidad de realizar ensayos sobre el material haciendo variar su geometría para obtener la configuración óptima requerida.

Cabe mencionar que los modelos matemáticos empleados para definir las características fuerza-deformación de dispositivos histéricos son basados en modelos empleados en viscoplasticidad, por lo que Ozdemir (1976) tras realizar pruebas sobre vigas a flexión para disipación de energía sísmica propuso el siguiente modelo para un dispositivo de acero:

$$\dot{F} = k_0 \dot{x} - k_0 |\dot{x}| \left(\frac{F-B}{F_0} \right)^n \quad (2.3)$$

$$\dot{B} = a k_0 |\dot{x}| \left(\frac{F-B}{F_0} \right)^n \quad (2.4)$$

Donde F es la fuerza del amortiguador, x el desplazamiento, y B la fuerza de recuperación del dispositivo. Los puntos sobre las literales representan la diferenciación con respecto al tiempo y los parámetros K_0 , F_0 , n y α son los que proporcionan el mejor ajuste con respecto a los resultados experimentales, cuando se aplica una excitación de tipo sinusoidal al dispositivo. Para obtener la respuesta del disipador ante la excitación sísmica es necesaria la integración de las ecuaciones 2.3 y 2.4 respecto al tiempo mediante, pudiéndose usar el método Runge-Kutta.

En un método más simplista, Skinner (1993) en base a resultados de varios años de experimentación con modelos de dispositivos de diferentes geometrías, propone el uso de factores de escala para estimar los ciclos histéricos de disipadores de acero. Para ello, utiliza los ciclos de un disipador de acero de sección rectangular tipo T como ciclos de histéresis base. Los factores de escala propuestos provienen de un modelo simplificado pero efectivo, en el que la deformación de las fibras externas del elemento se basa en la forma que adquirirían en caso de que el elemento se mantuviera totalmente elástico. El esfuerzo σ' se mantiene constante en la sección de la viga, la fuerza F y el desplazamiento x, para amortiguadores tipo T y U, puede estimarse de la siguiente manera:

$$F = f \sigma' (1 + ax^2) \quad (2.5)$$

$$x = l \varepsilon \quad (2.6)$$

El factor de corrección a, para amortiguadores por flexión, se define según el tipo de amortiguador con las siguientes expresiones:

$$a \approx 2/(L+R)^2 \text{ (Tipo T)} \quad (2.7)$$

$$a \approx -1/8R^2 \text{ (Tipo U)} \quad (2.8)$$

Donde R es el brazo de palanca con el que se aplica el momento al dispositivo y L la longitud del elemento que disipa la energía. Una representación más apropiada de los ciclos de histéresis se obtiene a partir de un modelo experimental de proporciones similares a los del prototipo y fabricado con el mismo material.

Con base a los ciclos de histéresis que presenta Skinner y la aproximación bilineal, se obtienen los módulos de elasticidad, deformaciones de fluencia y esfuerzos de fluencia presentados en la tabla 2.1 y que sirven de base para estimar los parámetros bilineales de los diferentes tipos de amortiguadores. Por lo tanto las relaciones para K_e , K_y y F_y quedan definidas de la siguiente manera:

$$K_e \approx \frac{fE_1}{l} \quad (2.9)$$

$$K_y \approx \frac{fE_2}{l} + aF_y x_{\max} \left(1 + \frac{\epsilon_y}{\epsilon_{\max}} \right) \quad (2.10)$$

$$F_y = f\sigma_y \quad (2.11)$$

$$x_{\max} = l\epsilon_{\max} \quad (2.12)$$

Donde:

E_1 = módulo de elasticidad en la etapa inicial (tabla 2.1)

E_2 = módulo de la etapa de fluencia (tabla 2.1)

σ_y = esfuerzo de fluencia (tabla 2.1)

x_{\max} = desplazamiento máximo.

ϵ_{\max} = deformación máxima.

a = factor de correctivo ($a \approx \frac{1}{2R^2}$)

ϵ_{\max}	$E_1(\text{MPa})$	$E_2(\text{MPa})$	$\sigma_y(\text{MPa})$	$\epsilon_y(\%)$
1	70000	12200	270	0.36
2	70000	2560	370	0.55
3	70000	1220	406	0.59
4	70000	758	424	0.61
5	70000	534	442	0.63
6	70000	479	452	0.65
7	70000	465	458	0.66

Tabla 2.1. Valores del módulo de elasticidad, esfuerzos de fluencia y deformaciones para un dissipador de acero (Fuente: Skinner et al, 1993)

Si se cuenta con la información de un modelo de proporciones similares, los parámetros del ciclo de histéresis son:

$$\frac{K_e}{K_{e_m}} \approx \frac{K_y}{K_{y_m}} \approx \frac{f_l}{f_{e_l}} \quad (2.13)$$

$$\frac{F_y}{F_{y_m}} \approx \frac{f}{f_m} \quad (2.14)$$

Cabe aclarar que los ciclos de histéresis que se obtienen mediante este procedimiento solo pueden aplicarse con fines de pre-diseño y que en un diseño definitivo se requiere de un estudio más preciso, con parámetros obtenidos mediante pruebas experimentales de los dispositivos que realmente se utilizarán en una estructura.

2.4. Criterios de diseño.

Como se mencionó en un principio, los sistemas de disipación de energía son diseñados para aportar un amortiguamiento adicional a la estructura que le permita disipar de mejor manera la energía inducida al edificio a causa de un sismo. Cuando se añade un sistema disipador de energía a una estructura se incrementa la rigidez y resistencia lateral del mismo teniendo influencia directa en la respuesta estructural ante cargas laterales al restringir los desplazamientos.

El comportamiento, según el Manual para Diseño de Obras Civiles de CFE (2008), de los disipadores debe de ser tal que el área histérica que desarrollen sea suficientemente grande y que la demanda de ductilidad quede dentro de límites tolerables, además, el desplazamiento de fluencia de los disipadores deberá ser menor al de la estructura de tal manera que fluya el disipador antes que los elementos estructurales principales del edificio, aunado a esto, los desplazamientos que se presenten en el disipador deben ser menores a los del edificio donde se empleen.

A su vez, la distribución en planta de los disipadores debe ser de tal modo que no favorezca la torsión en los elementos estructurales, también establece que el acomodo vertical de los disipadores no debe contribuir a la producción de concentraciones excesivas de deformaciones inelásticas en un solo nivel del edificio.

Las propiedades carga-desplazamiento de los disipadores deben determinarse considerando todas las variables que influyen en su funcionamiento tales como la

magnitud de la carga, la fatiga, el envejecimiento, la forma de conexión y la temperatura ambiente.

Los elementos a emplearse como disipadores deben ser secciones compactas para evitar problemas de inestabilidad y deberá de limitarse la concentración de esfuerzos en la conexión del disipador y estructura evitando así fallas por fatiga o concentración de esfuerzos en la unión de los metales.

Todos los disipadores deben fabricarse para desarrollar un desplazamiento equivalente al 130% de la máxima demanda de desplazamiento para el sismo máximo de diseño. Entre otras cuestiones, es necesario considerar en el diseño la fatiga de los disipadores, para tal objetivo, debe considerarse la amplitud de la deformación inelástica y el número de deformaciones cíclicas en la falla.

Para el diseño de estos mecanismos de disipación, según las recomendaciones emitidas en el año 2006 por la FEMA (Federal Emergency Management Agency), es necesario que:

- a) Se diseñen teniendo en cuenta que deben operar eficientemente ante otros factores que generen cargas horizontales a la estructura tales como viento y explosiones, así mismo, deben operar eficientemente ante las condiciones ambientales tales como los cambios de temperatura principalmente.
- b) En el modelo matemático se incluya la ubicación de los dispositivos en el edificio, la frecuencia de excitación, la temperatura ambiente promedio durante la operación de los dispositivos, cargas muertas, cargas vivas y cargas accidentales. Por lo que es necesario analizar varias veces el modelo para

obtener los resultados de los efectos de variación de las características mecánicas de los dispositivos.

- c) Los dispositivos sean capaces de resistir grandes desplazamientos.
- d) Los componentes y conexiones de los dispositivos se diseñen para que durante su operación se mantengan en un estado plástico lineal.

Como el diseño estructural es un proceso cíclico, es necesario, para el caso del diseño de estructuras con disipadores de energía seguir la siguiente metodología:

1. Pre-diseño de los dispositivos.
2. Pruebas de prototipo.
3. Diseño final.
4. Elaboración de un programa de control de calidad para la construcción del edificio con los disipadores.

2.5. Métodos de diseño.

El objetivo del análisis sísmico es evaluar las demandas de desplazamiento, velocidad y fuerza para posteriormente revisar la capacidad del sistema estructura-disipador y sus componentes individuales; para ello es necesario realizar el análisis en dos direcciones horizontales ortogonales y, cuando sea significativa, se incluirá la dirección vertical. Además en los modelos a emplearse habrá de considerarse la interacción suelo-estructura siempre y cuando esta sea significativa.

Para el diseño de estructuras con disipadores de energía sísmica son aceptados cuatro procedimientos, los cuales son:

- a) Análisis estático lineal.
- b) Análisis dinámico lineal.
- c) Análisis estático no lineal.
- d) Análisis paso a paso.

Cabe mencionar que los análisis estático lineal y dinámico lineal solo pueden emplearse en el diseño de estructuras con disipadores si y solo si:

1. La respuesta de la estructura se mantiene en el intervalo elástico lineal al incorporar los disipadores.
2. El amortiguamiento efectivo aportado por los disipadores no excede el 30% del amortiguamiento crítico.
3. La rigidez sécate de cada disipador calculada para el máximo desplazamiento del dispositivo es incluida en el modelo matemático.
4. La estructura se localiza a más de 15 km de una falla activa.
5. La estructura pertenece al Grupo B.

2.5.1. Análisis estático lineal (AEL).

Este método es usado cuando un análisis dinámico no aporta datos significativos sobre las demandas de desplazamiento y fuerza en la estructura. Se recomienda ser empleado en estructuras sencillas donde sean despreciables los efectos de torsión o cuando la estructura es desplantada en terreno duro o intermedio debido a que no es necesario considerar la interacción suelo-estructura.

Para el cálculo del amortiguamiento estructural equivalente es posible emplear la siguiente fórmula:

$$(\zeta)_{eq} = \zeta + \frac{\sum_j (W_j)}{4\pi(E)_k} \quad (2.15)$$

Donde:

ζ : es el amortiguamiento de la estructura, generalmente considerado igual a 0.05.

$(W)_j$: es la energía disipada por el dispositivo j en un ciclo completo correspondiente al desplazamiento del dispositivo x_j y la sumatoria incluye a todos los dispositivos j existentes en la estructura.

$(E)_k$: es la máxima energía de deformación en la estructura, misma que se calcula con la siguiente ecuación:

$$(E)_k = \frac{1}{2} \sum_i F_i(\delta)_i \quad (2.16)$$

Donde:

F_i : es la fuerza de inercia asociada al grado de libertad i .

$(\delta)_i$: es el desplazamiento del grado de libertad i .

2.5.2. Análisis dinámico modal (ADM)

Este tipo de análisis se emplea cuando el AEL no es capaz de proporcionar un adecuado nivel de precisión para estimar el comportamiento dinámico del edificio con

disipadores, esto es equivalente a decir que el ADM será empleado como método de análisis cuando no se cumplan los requisitos exigidos para el AEL.

Para estimar las demandas de desplazamiento y fuerza se emplearan los espectros de diseño correspondientes, dichos espectros de diseño deberán ser reducidos por un factor de amortiguamiento (β).

2.5.2.1. Espectros de diseño.

Cuando se aplique el ADM, se adoptará como ordenada del espectro de aceleración para diseño sísmico, a , expresada como fracción de la aceleración de la gravedad y en función del periodo estructural, de tal manera que adquiere la siguiente forma paramétrica:

$$a = \frac{Sa(T_e)}{g} = \begin{cases} a_0 + (\beta c - a_0) \frac{T_e}{T_a} & \text{si } T_e < T_a \\ \beta c & \text{si } T_a \leq T_e \leq T_b \\ \beta c \left(\frac{T_b}{T_e}\right)^r & \text{si } T_b \leq T_e \leq T_c \\ \beta c \left(\frac{T_b}{T_e}\right)^r \left[k + (1-k) \left(\frac{T_c}{T_e}\right)^2 \right] \left(\frac{T_c}{T_e}\right)^2 & \text{si } T_e \geq T_c \end{cases}$$

Donde:

a : es la aceleración espectral normalizada con la aceleración de la gravedad.

T_e : es el periodo de la estructura.

T_a : es el límite inferior de la meseta del espectro de diseño.

T_b : es el límite superior de la meseta del espectro de diseño.

T_c : es el periodo de inicio de la rama descendente en que los desplazamientos espectrales tienden correctamente del desplazamiento del terreno. Los valores de T_c pueden ser de 2s si $T_b < 2s$ ó puede ser igual a T_b si $T_b \geq 2s$.

r : es el parámetro que controla la caída de las ordenadas espectrales para $T_b \leq T_e < T_c$, y es igual a T_s , pero no será menor a 0.5 ni mayor a 1.0. Se recomienda que para terreno firme $r=0.5$.

k : es el parámetro que controla la caída de las ordenadas espectrales $T_e \geq T_c$.

β : es el factor de amortiguamiento.

2.5.2.1.1. Aceleración máxima del terreno a_0 .

Para determinar la aceleración máxima del terreno, a_0 , se hará uso de los factores de sitio y no linealidad, de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$a_0 = \frac{F_s F_{nl} a_0^r}{981.0}; \quad \text{con } F_s F_{nl} \geq 1.0 \quad (2.17)$$

2.5.2.1.2. Ordenada espectral máxima o coeficiente de diseño c .

El coeficiente de diseño c se determinará haciendo uso de la siguiente ecuación:

$$C = F_r a_0 \quad (2.18)$$

2.5.2.1.3. Periodos característicos del espectro T_a y T_b .

Los periodos característicos del espectro se determinarán de acuerdo con las siguientes ecuaciones:

$$T_a = 0.35T'_s \quad T_a \geq 0.1s \quad (2.19)$$

$$T_b = 1.20T'_s \quad T_b \geq 0.6s \quad (2.20)$$

Donde:

T'_s : es el periodo equivalente, calculado con siguiente ecuación:

$$T'_s = \frac{4H_s}{V'_s} = \frac{4H_s}{F_v V_s} = \frac{T_s}{F_v}$$

De la cual:

$$T_s = \frac{4H_s}{V'_s} \quad y \quad V'_s = F_v V_s$$

Para terreno rocoso $T_s = 0.1$ s y $T_b = 0.6$ s

2.5.2.1.4. Caída de la rama espectral descendente k.

El parámetro k, que controla la caída de la rama descendente del espectro a periodo largo se determinará mediante:

$$k = \begin{cases} \min\{1.5, 2 - T_s\} & \text{si } T_s \leq 1.65s \\ \max\{0.35, \beta/F_r\} & \text{si } T_s > 1.65s \end{cases} \quad (2.21)$$

Para terreno rocoso $k = 2.0$

2.5.2.1.5. Factor de amortiguamiento β .

El factor de amortiguamiento permite modificar las ordenadas del espectro de diseño debido a valores de amortiguamiento estructural diferentes a 5%, o bien, debidos a los efectos de interacción suelo-estructura.

$$\beta = \left(\frac{0.05}{\zeta_e}\right)^\lambda; \quad \text{con } \lambda = \begin{cases} 0.45 & \text{si } T_e < T_c \\ 0.45 \frac{T_c}{T_e} & \text{si } T_e \geq T_c \end{cases} \quad (2.22)$$

En la ecuación 2.20, ζ_e es el amortiguamiento estructural, o bien, el amortiguamiento efectivo debido a la interacción suelo-estructura, en cuyo caso, el periodo estructural T_e debe ser el periodo efectivo.

2.5.2.2. Espectros de diseño para estructuras del Grupo A.

En las estructuras del Grupo "A" el espectro de diseño correspondiente $S_{a_{col}}^A$ se obtendrá al multiplicar todas las ordenadas espectrales $S_{a_{col}}^B$ por el factor 1.5, es decir:

$$S_{a_{col}}^A = 1.5 \times S_{a_{col}}^B \quad (2.23)$$

2.5.2.3. Espectros de diseño para estado límite de servicio.

Para el estado límite de servicio se tomará como referencia la construcción del espectro de colapso para estructuras del Grupo B tomando en cuenta un factor de reducción de 5.5 y considerando que no existen efectos no lineales en el comportamiento del suelo, es decir, que los factores relacionados con el comportamiento no lineal son unitarios. Se tiene entonces que, para el estado límite de servicio, el espectro está definido en la ecuación 2.24, con las siguientes particularidades, $F_{nl}=1.00$ y $F_v=1.0$:

$$a_0 = \frac{F_s r_0^a}{981.0 \times 5.5} \quad (2.24)$$

$$T_a = 0.35 T_s \quad T_a \geq 0.1s$$

$$T_b = 1.20T_s \quad T_b \geq 0.6s$$

Este espectro de diseño para el estado límite de servicio se tomará para prevención de daños tanto en estructuras del Grupo B como las del Grupo A. Para el espectro de diseño del estado límite de servicio es necesario considerar la importancia estructural del edificio mediante un factor, el cual es de 1.0 para estructuras del grupo B y de 1.5 para estructuras del Grupo A.

2.5.2.4. Espectro de desplazamiento Sd.

En algunas aplicaciones será necesario conocer el espectro de desplazamiento Sd. Éste se determinará de la siguiente ecuación:

$$S_d(T_d) = \frac{T_e^2}{4\pi^2} S_a(T_d) \quad (2.25)$$

Cuando T_e tiende a infinito, el desplazamiento espectral tiende al desplazamiento máximo del terreno, dado por:

$$D_{\max} = k \frac{cT_c^2}{4\pi^2} \left(\frac{T_b}{T_c}\right)^{1/2} g \quad (2.26)$$

Si $k \geq 1.0$, el desplazamiento máximo espectral es el desplazamiento máximo del terreno. Si no, éste ocurre cuando $T_e = T_c$, y estará dado por:

$$S_{d_{\max}} = \beta \frac{cT_c^2}{4\pi^2} \left(\frac{T_b}{T_c}\right)^{1/2} g \quad (2.27)$$

2.5.3. Análisis estático no lineal (AENL) ó Pushover.

El AENL es una sucesión de análisis lineales en los que se incrementan gradualmente las cargas laterales hasta alcanzar las demandas máximas de desplazamiento esperadas para cada nivel de la estructura. Este modelo de análisis proporciona una medida realista del comportamiento del edificio al estimar las demandas en niveles de respuesta cercanos al colapso.

El AENL se realizará empleando las rigideces efectivas a flexión, las características fuerza-velocidad-desplazamiento del disipador, las características mecánicas de los componentes que dan soporte a los disipadores. Para ello el Manual para Diseño de Obras Civiles de CFE recomienda usar la sección C9.3.5.1 del documento FEMA 450 (2004), en dicha sección se presentan dos métodos que permiten realizar el AENL de estructuras con disipadores.

La Agencia Federal para el Manejo de Emergencias o FEMA por sus siglas en inglés, es un órgano estadounidense cuya misión es la de brindar apoyo a todos los ciudadanos y agencias de primera respuesta así como mejorar la preparación, protección, respuesta, recuperación y mitigación de desastres propios de eventos naturales tales como sismos, huracanes y tornados por mencionar algunos.

La FEMA establece que el modelo matemático elaborado para el AENL debe estar constituido de tal manera que represente la distribución espacial de los disipadores en el sistema estructural permitiendo que los edificios regulares sean representados en modelos de dos dimensiones, mientras que las estructuras irregulares deberán ser representadas en modelos de tridimensionales.

Para el AENL, el análisis sísmico se realizará con una combinación de acciones que puedan ocurrir de manera simultánea combinadas con una carga viva no menor al 25% de la carga viva de diseño debiendo aplicar las cargas laterales en el centro de masa de cada nivel de la estructura debiendo ser estas proporcionales a la distribución de cargas obtenidas del análisis modal. Las cargas laterales se irán incrementando de manera monotónica, siendo la carga mínima aquella que permita la aparición de daños mínimos perceptibles en los elementos de la estructura tales como grietas y siendo la carga más grande aceptada aquella que produzca un desplazamiento 50% mayor al desplazamiento tope (δ_T). De esta manera, el edificio tendrá que ser diseñado para resistir como mínimo un desplazamiento mayor al 25% del desplazamiento tope.

2.5.3.1. Determinación del periodo fundamental de la estructura (T_e)

El periodo fundamental de la estructura con disipadores de energía sísmica se calculará con la siguiente ecuación:

$$T_e = T_1 \sqrt{\frac{V_1/\delta_y}{V_y/\delta_y}} \quad (2.28)$$

En donde V_1 , δ_1 y T_1 son datos determinados en el primer incremento de carga lateral.

2.5.3.2. Desplazamiento tope o base (δ_T)

El desplazamiento tope del punto de control o base se determinará en base a la siguiente ecuación:

$$\delta_T = C_0 C_1 S_a \left(\frac{T_e}{2\pi} \right)^2 g \quad (2.29)$$

De donde la aceleración espectral S_a se determinará de la siguiente manera:

Para periodos menores o iguales a T_0 : $S_a = 0.6 S_{DS}/T_0 + 0.4 S_{DS} \quad (2.30)$

Para periodos mayores o iguales a T_0 y menores o iguales a T_s , S_a será igual a S_{DS}

Para periodos mayores a T_s y menores o iguales a T_L : $S_a = \frac{S_{D1}}{T} \quad (2.31)$

Para periodos mayores a T_L : $S_a = \frac{S_{D1} T_L}{T^2} \quad (2.32)$

Donde:

S_{DS} = espectro de diseño del parámetro de aceleración en periodos cortos.

S_{D1} = espectro de diseño del parámetro de aceleración en periodos iguales a 1.

T = periodo fundamental de la estructura

$$T_0 = 0.2 S_{D1}/S_{DS}$$

$$T_s = S_{D1}/S_{DS}$$

T_L = periodo largo

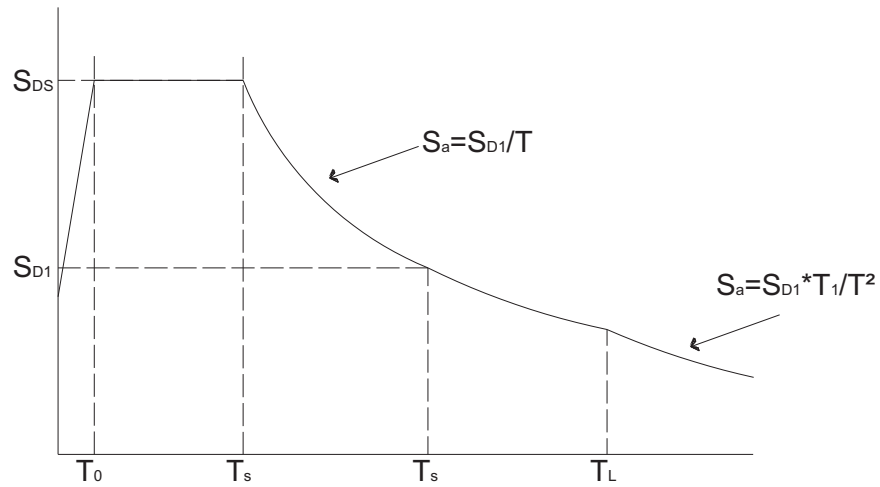


Imagen 2.2. Gráfica de espectro de diseño para distintas aceleraciones del suelo
(Fuente: FEMA; 2006, 39)

Mientras que los coeficientes \$C_0\$ y \$C_1\$ se calcularán de la siguiente manera:

$$C_0 = \frac{\sum_{i=1}^n w_i \phi_i}{\sum_{i=1}^n w_i \phi_i^2} \quad (2.33)$$

Donde:

\$W_i\$ = porción de la carga sísmica aplicada en el nivel \$i\$

\$\phi_i\$ = amplitud del vector de forma en el nivel \$i\$

Cuando el periodo efectivo fundamental de la estructural bajo la consideración de que \$T_e\$ es mayor que \$T_s\$, tal como se definió anteriormente \$C_1\$ podrá tomarse como 1.0, de otra manera \$C_1\$ se calculará con la siguiente ecuación:

$$C_1 = \frac{1}{R_d} \left(1 + \frac{(R_d - 1) T_s}{T_e} \right) \quad (2.34)$$

Donde R_d podrá definirse como:

$$R_d = \frac{S_a}{V_y/W} \quad (2.35)$$

T_s y V_y se definen a partir de S_a en el espectro de diseño de aceleración.

El AENL tiene la intención de proporcionar un enfoque simplificado para determinar directamente la respuesta sísmica de una estructura ante la aplicación de cargas monotónicas incrementales, de manera que las deformaciones aumenten hasta llegar al colapso. Según Fajfar (2000) las cargas laterales se pueden considerar como una variación de carga en forma parabólica o triangular cuyo valor máximo se ubica en el tope del edificio.

Según Mendoza (2008;115) “la relación del cortante basal V_b y el desplazamiento lateral máximo en la parte más alta del edificio es la respuesta que interesa, debido a que en base a esta relación se determina la capacidad resistente de la estructura”.

2.5.4. Análisis paso a paso (APAP).

En este análisis se obtiene la respuesta temporal de la estructura por la integración numérica de las ecuaciones diferenciales de movimiento. Para realizar el APAP es necesario el uso de registros temporales de movimiento del terreno, siendo válido considerar que la excitación sísmica es la misma en todos los apoyos de la estructura a menos que existan discontinuidades geológicas capaces de inducir variaciones importantes en las características del movimiento sísmico o si la longitud del edificio es mayor a 600 m.

La manera práctica de considerar las variaciones de la respuesta fuerza-desplazamiento en los disipadores es realizando análisis múltiples de la estructura empleando los valores mínimos y máximos probables de las propiedades de los dispositivos de disipación. Este tipo de análisis puede emplearse para cualquier estructura y tipo de disipador y es obligatorio su uso para el estudio de estructuras ubicadas cerca de una falla geológica activa.

Con este método de análisis es posible determinar la respuesta del modelo para comparar las ductilidades locales requeridas y las disponibles, así como las demandas fuerza-desplazamiento en los disipadores.

Además de analizarse con el APAP, las estructuras del Grupo A deben analizarse también con el ADM, que bajo recomendaciones del Manual para Diseño de Obras Civiles de CFE, los resultados del APAP no se deben ser usados para reducir los requerimientos resultantes del ADM.

2.6. Método N2.

El método N2 es un modo de análisis sísmico no lineal simplificado basado en el análisis pushover de un sistema de múltiples grados de libertad y el espectro de respuesta de un sistema equivalente de un grado de libertad. Este método fue desarrollado en el año 2000 por P. Fajfar en la Universidad de Ljubljana y está incluido en el Eurocodio 8. Originalmente el método N2 solo se limitaba para modelos estructurales regulares, aunque recientemente se han hecho pruebas para su aplicación en el estudio de modelos estructurales que requieran un análisis en 3D con bastaste aceptación.

2.6.1. Descripción del método N2.

Este método ayuda a facilitar los análisis sísmicos en las estructuras cuyo propósito único determinar la contribución de cada parámetro que interviene en la respuesta sísmica del edificio y reducir el nivel de variaciones de los valores de análisis presentado en un modelo con múltiples grados de libertad disminuyendo el tiempo de análisis de cada sistema de disipadores y facilitando la interpretación de resultados.

A continuación se describen los pasos para llevar a cabo la reducción de un sistema con múltiples grados de libertad (SVGL) a un sistema equivalente de un grado de libertad (SE1GL).

Paso 1. Datos.

Se supondrá que los diafragmas del edificio en cada nivel son rígidos en el sentido horizontal y el número de grados de libertad será igual a 3 veces el número de niveles (N) del modelo; a su vez, los grados de libertad se subdividirán en 3 sub-vectores que representan los desplazamientos de cada nivel en dirección horizontal en las direcciones X e Y, y las torsiones rotacionales $U^T=[U_X^T, U_Y^T, U_Z^T]$.

Además de la información usada en los análisis elásticos usuales y la anterior antes mencionada, es necesaria la relación fuerza-desplazamiento de los elementos estructurales bajo cargas monotónicas.

Paso 2. Demanda sísmica en el formato AD (aceleración-desplazamiento).

Para un sistema equivalente de un grado de libertad elástico, es posible aplicar la siguiente relación:

$$S_{de} = \frac{T^2}{4\pi^2} S_{ae} \quad (2.36)$$

Donde S_{ae} y S_{de} son los valores de la aceleración elástica y el espectro de desplazamiento respectivamente, correspondientes al periodo T y un coeficiente de amortiguamiento viscoso fijo.

Para un sistema equivalente de un grado de libertad inelástico con una relación bilineal fuerza-desplazamiento, el espectro de aceleración (S_a) y el espectro de desplazamiento (S_d) pueden ser determinados como:

$$S_a = \frac{S_{ae}}{R_\mu} \quad (2.37)$$

$$S_d = \frac{\mu}{R_\mu} S_{de} = \frac{\mu}{R_\mu} \frac{T^2}{4\pi^2} S_{ae} = \mu \frac{T^2}{4\pi^2} S_a \quad (2.38)$$

Donde μ es el factor de ductilidad definido como la relación entre el desplazamiento máximo y el desplazamiento de fluencia, R_μ es el factor de reducción de ductilidad que es igual a:

$$R_\mu = (\mu - 1) \frac{T}{T_C} + 1 \quad T < T_C \quad (2.39)$$

$$R_\mu = \mu \quad T \geq T_C \quad (2.40)$$

Donde T_C es el periodo característico del movimiento del suelo.

Paso 3. Análisis pushover.

Haciendo un análisis pushover a la estructura es posible determinar la relación fuerza-desplazamiento del SVGL, esta relación se constituye por el cortante en la base y los desplazamientos en la azotea del edificio. Para determinar la configuración lateral de fuerzas que se aplican en el análisis pushover se usa la siguiente expresión:

$$P = \rho \Psi = \rho M \Phi \quad (2.41)$$

donde:

P =vector de fuerzas laterales.

Ψ =distribución de las cargas laterales.

ρ = parámetro que controla la magnitud de las fuerzas laterales.

M =matriz diagonal de masas.

Φ =vector de formas modales normalizado correspondiente al primer modo.

Paso 4. Sistema equivalente de un grado de libertad y curva de capacidad.

A continuación se procede a la reducción del SVGL a un SE1GL bajo las siguientes condiciones:

$$D^* = \frac{D_t}{\Gamma} \quad (2.42) \quad F^* = \frac{V}{\Gamma} \quad (2.43)$$

Donde D^* y F^* son el desplazamiento y fuerza del SE1GL correspondiente a cada valor de la curva fuerza desplazamiento, D_t y V son el desplazamiento correspondiente a la azotea y cortante basal del SVGL respectivamente en la dirección del movimiento.

$$V = pm^* \quad (2.44) \quad \text{donde: } m^* = \Phi^T M_s \quad (2.45)$$

Γ es el factor de participación modal que controla la transformación del SVGL al SE1GL:

$$\Gamma = \frac{\Phi^T M_s}{\Phi^T M \Phi} = \frac{m^*}{L^*} \quad (2.46)$$

En caso que el movimiento del suelo solo se tome para el sentido de las X son aplicables las siguientes ecuaciones:

$$m^*_x = \sum m_i \Phi_i \quad (2.47) \quad V_x = \sum p m_i \Phi_{x,i} = \sum P_{x,i} \quad (2.48)$$

$$\Gamma = \frac{\sum m_i \Phi_i}{\sum m_i \Phi_i^2} \quad (2.49)$$

Con el propósito de simplificar la relación fuerza-desplazamiento del SE1GL se ajusta esta curva a una bilineal. El método de idealización propuesto es el usado en el Eurocódigo 8, aunque existen otros métodos más simples como es el caso del método propuesto por la FEMA.

En el método FEMA, el segmento plástico de la curva idealizada es definido por una pendiente con origen en el punto (0,0) y deberá tocar un punto de la curva del SE1GL que represente en el eje de las ordenadas, el 60% de la fuerza máxima

que es capaz de soportar el edificio antes de presentar deformaciones plásticas, la pendiente finalizará en el punto dado por el cortante máximo que el edificio soporta antes de de presentar deformaciones plásticas y el respectivo desplazamiento (Δ_y) que esta fuerza genera. Por último, a partir del punto definido por (V_y, Δ_y) se trazara otra pendiente cuyo final estará dado por el punto que representa la máxima deformación de la estructura antes del colapso y el cortante que la origina (V_{max}, Δ_{max}) respectivamente.

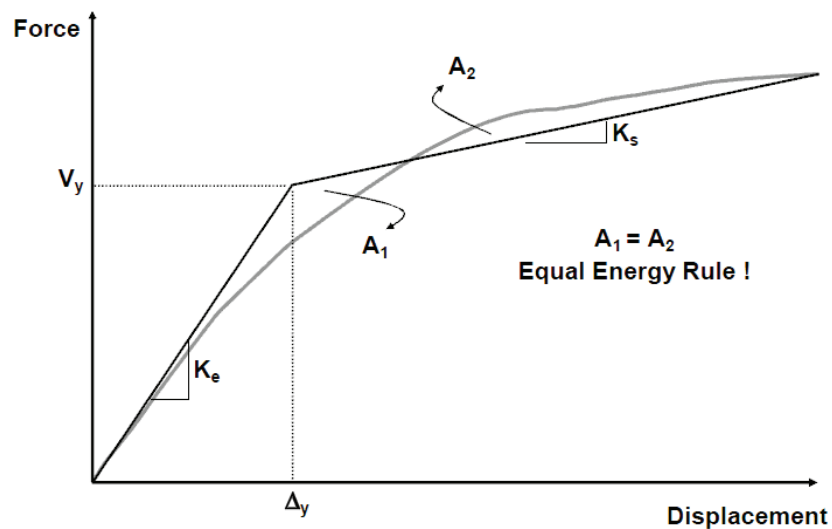


Imagen 2.3. Idealización de la curva pushover según el método FEMA 356. (Fuente:

Kadas, Koray; 2006, p. 37)

CAPÍTULO 3

RESUMEN EJECUTIVO DE MACRO Y MICRO LOCALIZACIÓN

En este capítulo se detallan las características geológicas y sísmicas de la República Mexicana, el Estado de Michoacán y la ciudad de Uruapan, factores que intervienen de manera directa para el diseño de dispositivos disipadores y aisladores de energía sísmica.

3.1. Generalidades.

Para fines de diseño sísmico, la República Mexicana está dividida en 4 zonas geográficas las cuales se clasifican según su actividad sísmica. Las zonas están denominadas por las letras A, B, C y D siendo la zona A la que menor actividad sísmica presenta y la letra D la de mayor actividad.

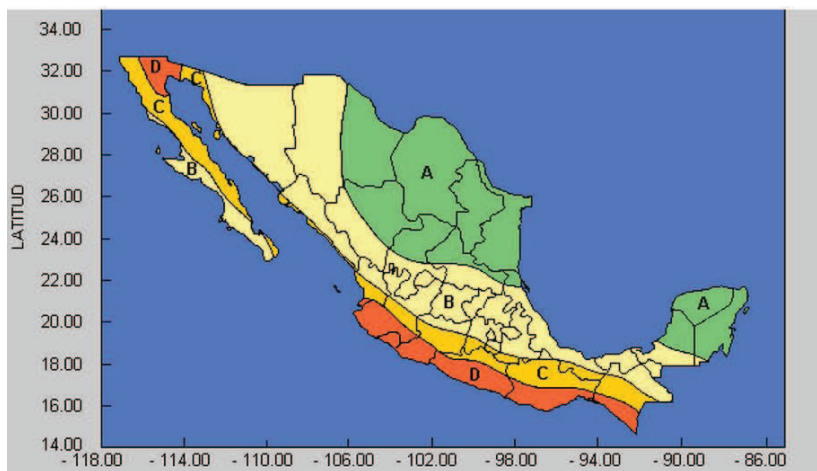


Imagen 3.1. Regiones sísmicas en México (Fuente: www.ssn.unam.mx)

El estado de Michoacán, según la clasificación previamente mencionada, cuenta con 3 zonas sísmicas; la zona D en la costa del estado, la zona C en el centro del estado y la zona B en el norte.

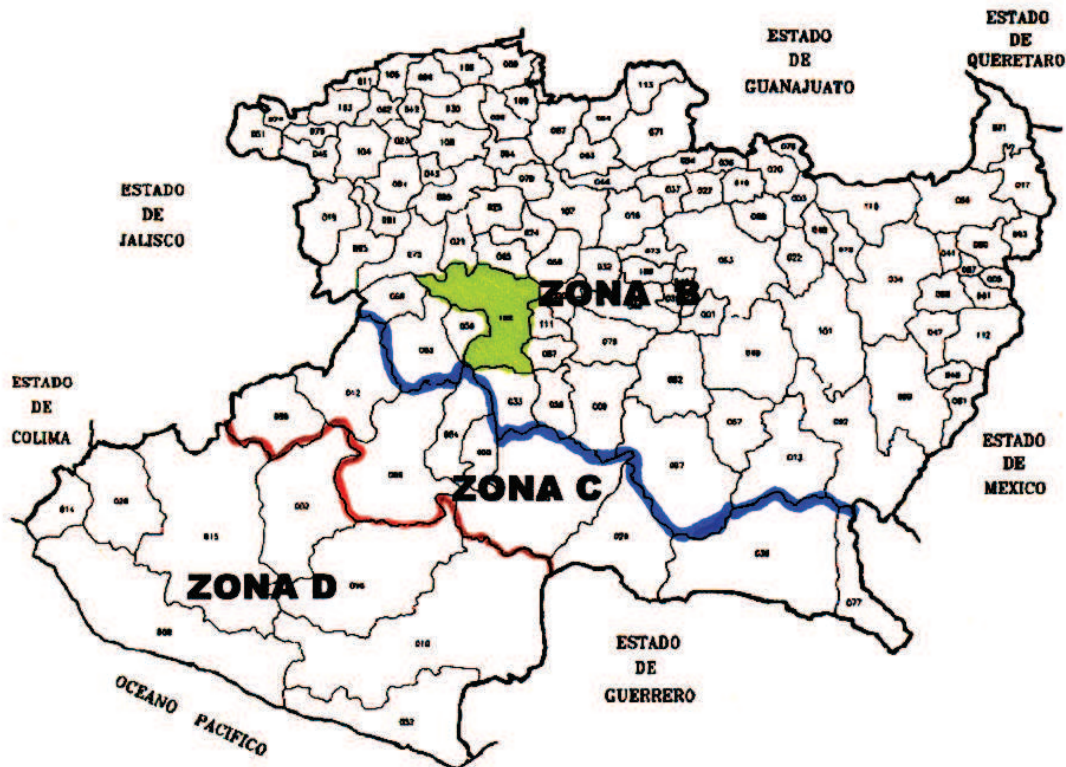


Imagen 3.2. Regionalización sísmica del Estado de Michoacán (Fuente: Reglamento de construcciones del Estado de Michoacán)

A su vez, los suelos de territorio nacional se clasifican en 3 tipos según su resistencia:

Terreno tipo I. Terreno firme, como tepetate, arenisca medianamente cementada, arcilla pre consolidada muy compacta o suelos de características similares.

Terreno Tipo II. Suelo de baja rigidez, tal como arenas no cementadas, limos de mediana a alta capacidad, arcillas pre consolidadas de compacidad media y suelos de características similares,

Terreno Tipo III. Suelo suave, tal como arenas y limos de baja compacidad o arcillas blandas muy compresibles.

Según las clasificaciones anteriores, la ciudad de Uruapan está situada en una zona sísmica C y por la ubicación del terreno en la ciudad se clasifica como un terreno Tipo II.

En el presente estudio se emplearán datos de actividad sísmica y características del suelo de la ciudad de Uruapan, Michoacán. El terreno donde se pretende ubicar el edificio se encuentra en la Avenida Latinoamericana esquina con Manuel Pérez Coronado. Cabe mencionar que, pese a que se usarán datos del suelo y actividad sísmica de la ciudad de Uruapan el procedimiento de diseño no es únicamente aplicable para esta ciudad.

La ciudad de Uruapan del Progreso, perteneciente al estado de Michoacán de Ocampo, es una región de clima templado, exuberante vegetación y con gran producción anual de aguacate con calidad de exportación, razón por la cual se le conoce también como “La capital mundial del aguacate”. Se considera también el punto de unión entre tierra caliente y la meseta Purépecha.

La ciudad de Uruapan cuenta con altitudes variadas desde los 1500 a los 2500 msnm, está inmersa en el eje neovolcánico mexicano, al centro-occidente del estado de Michoacán, tiene una extensión territorial total de 954.17 km². Limita con los

municipios de los Reyes, Charapan, Paracho, Nahuatzen, Tingambato, Ziracuaretiro, Taretan, Nuevo Urecho, Gabriel Zamora, Parácuaro, Nuevo Parángaricutiro, Tancítaro y Peribán.

Sus principales accidentes orográficos son el cerro de la Cruz, el cerro de la Charanda y el cerro de Jicalán. Su principal sistema hidrográfico es el río Cupatitzio, perteneciente a la cuenca del río Tepalcatepec.

La temperatura media anual del territorio también se encuentra dividida en tres zonas, la zona norte del municipio tiene un rango de 12 a 20 °C, la zona centro y sur tiene un promedio entre 18 y 27 °C, y finalmente dos porciones del extremo sur registran de 24 a 33 °C; el centro del municipio de Uruapan es una de las zonas que registran mayor promedio pluvial anual en el estado de Michoacán, superando los 1,500 mm al año, hacia el norte y sur de esta zona el promedio va de 1,200 a 1,500 mm, y hacia el sur se suceden dos zonas más, donde el promedio es de 1,000 a 1,200 mm y de 800 a 1,000 mm.

El terreno donde se localiza el edificio está ubicado en la parte central de la ciudad de Uruapan, el suelo predominante en esta zona son las gravas. El único uso que ha recibido este terreno es agrícola cuyo cultivo principal ha sido el aguacate, tiene una pendiente del 3% hacia la parte sur de la ciudad. Tiene un área de 224,000 m², limita al norte con la Avenida Latinoamericana, al sur con la calle Argentina y al oeste con la Avenida Manuel Pérez Coronado.

3.2. Entorno geográfico.

El lugar donde se ubicará el edificio se encuentra en las afueras de la denominada Zona Rosa de la ciudad de Uruapan, por lo que su entorno geográfico se compone principalmente de viviendas de tipo residencial y locales comerciales. Cabe mencionar que la Avenida Manuel Pérez Coronado está ubicada cerca de la margen este del Río Cupatitzio el cual pasa a lo largo de toda la ciudad de Uruapan.

3.3. Informe fotográfico.

En el presente informe fotográfico, hecho con ayuda del programa Google Earth, se muestran las condiciones en las que se encuentra el terreno donde se ubicó el edificio a diseñar:



Imagen 3.3. Vista del terreno desde la intersección de la Av. Latinoamericana y Av. Manuel Pérez Coronado. Fuente: Google Earth (2011)



Imagen 3.4. Vista del terreno desde la intersección de la Av. Latinoamericana y la calle Argentina. Fuente: Google Earth (2011)



Imagen 3.5. Vista Sur del terreno desde la calle Argentina. Fuente: Google Earth (2011)



Imagen 3.6. Vista Oeste del terreno desde la Av. Manuel Pérez Coronado.

Fuente: Google Earth (2011)



Imagen 3.7. Vista aérea del terreno. Fuente: Google Earth (2011)

CAPÍTULO 4

METODOLOGÍA

En el presente capítulo se describe el enfoque que se utilizó en esta investigación, así como los instrumentos de recopilación y tratamiento de datos usados.

4.1. Método empleado.

Para esta investigación se utilizó el método matemático, en dicho método se hace uso de las matemáticas para el estudio de algunos fenómenos, se eligió este método para esta investigación porque fue necesario el uso de métodos numéricos para el diseño de la estructura, así como para establecer la geometría más apropiada para los disipadores y aisladores.

4.2. Enfoque de la investigación.

Según Hernández y colaboradores (2008), los enfoques de investigación se han polarizado en dos ramos principales: el enfoque cualitativo y el enfoque cuantitativo. El primero de ellos según Hernández y cols. (2006:5), “usa la recolección de datos para probar hipótesis, con base a la medición numérica y el análisis estadístico, para establecer patrones de comportamiento y probar teorías”; por otra parte, en el enfoque cualitativo “utiliza la recolección de datos sin medición numérica para descubrir o afinar preguntas de investigación en el proceso de interpretación” (Hernández y cols.; 2006:8).

En esta investigación se recabaron datos numéricos y estadísticos acerca de las estructuras dotadas con dispositivos de disipación de energía sísmica y aisladores, pudiéndose obtener del pre diseño de la estructura las propiedades geométricas que debe tener el edificio según el Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal para soportar un sismo, para después adicionar al modelo matemático del edificio los sistemas de disipación y aislación sísmica; analizando la respuesta sísmica que presenta la estructura y haciendo los ajustes necesarios en la ubicación y secciones de los disipadores y aisladores para después analizar de nuevo el modelo y llegar así a tener las secciones óptimas del edificio, disipadores y aisladores. Por tal motivo se el enfoque de esta investigación es cuantitativo.

4.2.1. Alcance de la investigación.

Los alcances de una investigación, según Hernández y cols. (2006), pueden ser:

- Estudios exploratorios. Este tipo de estudios pretende examinar un tema, fenómeno o problema poco estudiado, siendo la literatura de este tema guías no investigadas e ideas vagamente relacionadas con dicho tema.
- Estudios descriptivos. Con estos estudios, el investigador pretende describir algún fenómeno. En este estudio se especifican las propiedades, características y perfiles de un cierto grupo.
- Estudios correlacionales. El enfoque de este tipo de estudio es el de establecer la relación existente entre dos o más variables para medir el grado de asociación entre ellas.

- Estudios explicativos. Están dirigidos a responder por las causas de los fenómenos, en otras palabras, explican el por qué ocurre un fenómeno y en que condiciones se presenta.

Algunas investigaciones pueden caracterizarse según lo mencionado anteriormente, pero también es posible que algunas investigaciones sean situadas en dos o más tipos de estudios, esto depende de el conocimiento actual del tema de investigación que revele la revisión de la literatura y la perspectiva que el investigador pretenda dar a su estudio.

Dicho lo anterior se definió al alcance de esta investigación como un estudio correlacional. Esta conclusión se basa en que la investigación pretende establecer las dimensiones necesarias para que los sistemas disipadores y aisladores de energía sísmica pueda realizar sus funciones adecuadamente, para ello se utilizó el método de diseño pushover en el cual se varían las cargas sísmicas (variable independiente) para medir las capacidades de disipación y aislación de los dispositivos instalados en la estructura (variables dependientes).

4.3. Diseño de la investigación.

Por diseño de la investigación se entiende como el plan o estrategia seguida para obtener la información necesaria para realizar este estudio. Hernández y colaboradores (2008) dividen el diseño de la investigación en dos tipos.

El primer tipo es la investigación experimental, la cual consiste en la manipulación una acción para analizar las afectaciones que esta tiene sobre la variable dependiente en un ambiente controlado. El segundo tipo es la investigación

no experimental, en ella se da la observación de fenómenos en su ambiente natural sin alterar o manipular las variables independientes y dependientes.

El diseño de esta investigación es del tipo experimental, debido a que es necesario la variación de las dimensiones de la estructura para cumplir con los requisitos de diseño según el Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal, la aplicación de cargas monotónicas incrementales en el método pushover para observar las deformaciones que ocurren en la estructura hasta que llegue la carga máxima que la lleve a fallar, así como la variación en las secciones y ubicación de los disipadores y aisladores.

4.3.1. Diseño con preprueba-posprueba y grupo de control.

La investigación experimental se divide en tres:

1. Preexperimentos: son un acercamiento al problema de investigación en la realidad, consisten en un solo grupo con grado de control mínimo.
2. Cuasiexperimentos: manipulan una variable independiente para observar su efecto y relación con una o más variables dependientes.
3. Experimentos puros: son aquellos que se logran grupos de comparación y equivalencia para lograr el control y validez interna.

La experimentación con preprueba-posprueba y grupo de control incorpora la administración de prepruebas a los grupos que componen el experimento. Los sujetos se asignan al azar a los grupos, después a estos se les aplica simultáneamente la preprueba; un grupo recibe el tratamiento experimental y el otro

no (grupo de control); por último se les administra, también simultáneamente, la posprueba.

Para el caso del diseño de esta investigación se empleará la experimentación con preprueba-posprueba y grupo de control, ya que se comenzará la experimentación a partir del diseño de una estructura del Grupo A en base a la metodología de diseño de las NTC-Sismos del Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal, para después analizar la respuesta sísmica de la estructura y definir el grado de disipación necesario; para posteriormente adicionarle los sistemas de disipación de energía sísmica y aisladores de base. Una vez concluido este paso, se procedió a la revisión de la respuesta sísmica del edificio con los dispositivos y se definió el nuevo grado de disipación que presenta la estructura.

4.4. Instrumentos de recopilación de datos.

Los instrumentos para la elaboración de la investigación fueron de origen documental principalmente con un acervo de más de 20 títulos, siendo los más consultados el Manual para Obras Civiles de CFE, las recomendaciones de diseño del FEMA, el Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal, artículos publicados en simposios sobre sísmica, sistemas disipadores y aisladores. Para la recopilación de datos se emplearon software tales como el Excel 2007, SAP 2000 en su versión 14.0, IDARC 2D en la versión 7.0 y Autocad 2012.

4.5. Descripción del proceso de investigación.

Una vez que se planteó el problema al cual se avoca la presente investigación se siguió el siguiente proceso:

1. Investigación documental, la cual se enfocó en describir los diferentes tipos de sistemas disipadores de energía sísmica y aisladores, así como las metodologías de diseño para cada elemento.
2. A partir de las NTC-Sismos del RCDF se realizará el diseño de la estructura en los programas Excel 2011 y SAP 2000 versión 14.0.
3. En base a los métodos descritos en la investigación documental se realizarán los modelos matemáticos de la estructura correspondientes a disipadores.
4. Una vez hechos los modelos matemáticos se procederá a la modelación en el programa IDARC 2D 7.0 y se efectuarán los análisis estático no lineal y análisis paso a paso.
5. En base a los resultados obtenidos en el paso anterior, se procederá a realizar las modificaciones de las secciones y ubicación de los disipadores.
6. Una vez modificadas las secciones de los disipadores, se procederá a una nueva revisión en el programa IDARC para evaluar el desempeño de la estructura. Los pasos 5 y 6 deberán repetirse hasta encontrar las dimensiones óptimas de los disipadores que permitan un buen desempeño sísmico de la estructura.
7. Habiendo comprobado que las secciones del disipador son las ideales para el edificio se harán esquemas detallados de sus características y ubicación en la estructura.

CAPÍTULO 5

ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

En el presente capítulo se lleva a cabo el diseño de los disipadores para el edificio en estudio. Este proceso inicia definiendo la respuesta sísmica del edificio sin disipadores, es decir, se define la relación fuerza-desplazamiento o curva pushover y los eigenvectores o vectores de escala del sistema estructural; posteriormente se determina el factor de participación modal (Γ).

Una vez calculado el factor de participación modal se determina la curva pushover del sistema equivalente de un grado de libertad (SE1GL) y sus propiedades mecánicas; para comprobar que el SE1GL representa fidedignamente al SVGL ambos sistemas son sometidos al acelerograma del sismo registrado por la SCT en la Ciudad de México en el año de 1985 (SCT-85) y se comparan las respuestas sísmicas de ambos sistemas.

Con el SE1GL definido se inicia con el diseño de los disipadores partiendo de la relación $F=k_{eff}D$, donde el valor de k_{eff} , que es la rigidez efectiva del disipador, es determinado por la relación k_m/k_d tal y como lo menciona Navarro (2002). El desempeño de los disipadores es medido cuantitativamente en el programa IDARC sometiéndolos al acelerograma SCT-85, para finalmente, según el desempeño de los disipadores probados, definir el dispositivo más adecuado para este edificio.

5.1. Modelo estructural.

Para el diseño de los disipadores se usó un edificio diseñado para servir como hospital. Cuenta con 10 niveles con elevación entre pisos de 3.5 metros, 6 crujiás de 6 metros cada una en el norte y el sur; así como 14 crujiás de 6 metros cada una en dirección norte sur con la siguiente distribución:

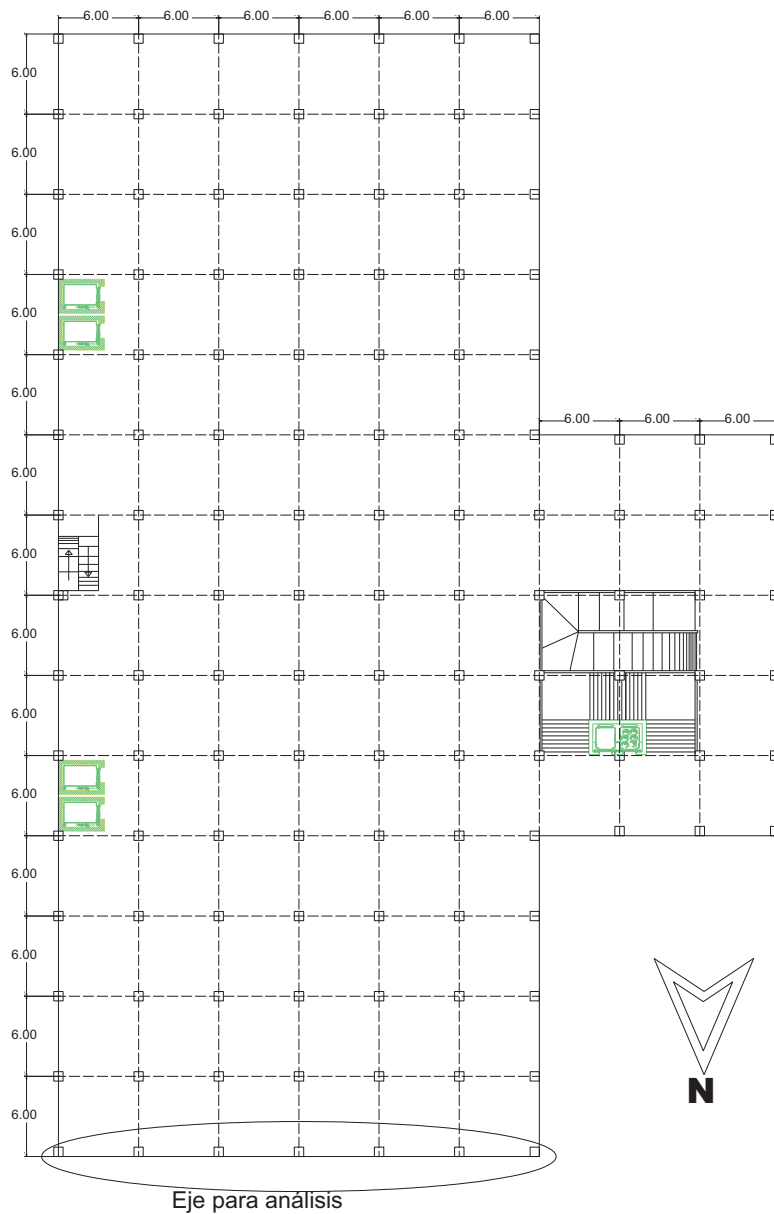
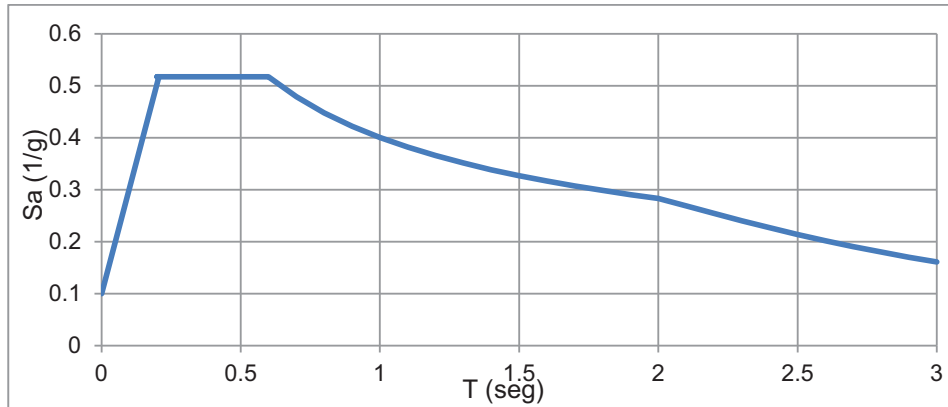


Imagen 5.1. Vista en planta del edificio (Fuente: propia)



Imagen 5.2. Elevación del marco en estudio (Fuente: propia)

El edificio fue diseñado en el programa SAP2000 en los parámetros propuestos por el Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal (2004), considerando el uso de concreto con un $f'c = 250 \text{ kg/cm}^2$, acero de refuerzo con un $f'y = 4200 \text{ kg/cm}^2$ y un factor de comportamiento sísmico $Q=4$. El espectro para diseño sísmico fue tomado del programa PRODISIS para una estructura del grupo "A" en un suelo tipo II. Los resultados del diseño estructural del programa SAP2000 son los mostrados en la tabla 5.1.



Gráfica 5.1. Espectro de diseño sísmico en estructuras tipo “A” correspondiente a la ciudad de Uruapan, Michoacán (Fuente: PRODISIS)

NIVEL	COLUMNAS		VIGAS		Periodo (seg)
	Sección transversal	ρ	Sección transversal	ρ	
1-4	90 X 90 cm	0.0131	60 x 30 cm	0.0085	1.151
5-7	80 x 80 cm	0.0125	50 x 25 cm	0.098	
8-10	70 x 70 cm	0.0113	50 x 25 cm	0.098	

Tabla 5.1. Secciones transversales y porcentaje de acero (ρ) en vigas y columnas.

(Fuente: propia.)

Los resultados del diseño estructural, tales como el porcentaje de acero de refuerzo y secciones de vigas y columnas; así como el límite de fluencia del acero, resistencia a la compresión del concreto, configuración geométrica del marco, cargas axiales y momentos actuantes son introducidos mediante un archivo de texto (.txt) al programa IDARC versión 5.0 para realizar un análisis pushover.

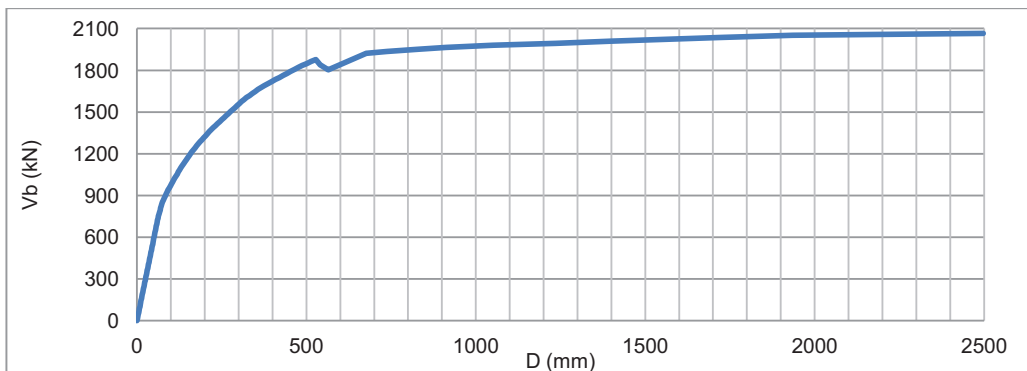
Del análisis pushover se obtiene los eigenvectores de masa normalizada y las respuestas sísmicas del marco en el formato AD o relación fuerza-desplazamiento. En el caso de los eigenvectores, solo se toman los datos correspondientes al primer

modo de la estructura; por otra parte los valores de la relación fuerza-desplazamiento corresponden al cortante basal y los desplazamientos en la azotea respectivamente.

NIVEL	MODO DE VIBRAR							
	1	2	3	4	5	6	7	8
10	1.65	-1.585	-1.542	-1.235	-0.981	0.728	-0.458	0.156
9	1.562	-0.985	-0.109	0.832	1.424	-1.625	1.328	-0.546
8	1.423	-0.182	1.2	1.48	0.564	0.888	-1.692	1.043
7	1.233	0.614	1.49	0.068	-1.4	0.925	1.011	-1.527
6	1.015	1.174	0.775	-1.275	-0.67	-1.263	0.462	1.492
5	0.784	1.44	-0.324	-1.189	1.09	-0.536	-1.35	-0.516
4	0.567	1.376	-1.132	0.062	1.104	1.273	0.392	-0.907
3	0.378	1.076	-1.312	1.136	-0.386	0.547	1.085	1.325
2	0.205	0.65	-0.983	1.317	-1.372	-1.097	-0.623	-0.053
1	0.065	0.22	-0.377	0.615	-0.842	-1.021	-1.118	-1.432

Tabla 5.2. Eigenvectors correspondientes a los modos de vibrar de la estructura.

(Fuente: propia)



Gráfica 5.2. Curva push-over del modelo de 10 niveles. (Fuente: propia).

A partir de los eigenvectors de masa normalizada se deducen los datos para hacer la reducción del SVGL al SE1GL. En el primer paso se calcula el valor del vector de masas normalizadas del primer modo de la estructura (Φ) dividiendo los valores de la tabla de eigenvectors de la columna 1 entre el valor de masa normalizada del 10^{mo} piso correspondiente al primer modo.

NIVEL	MODO 1
10	1.00000
9	0.94667
8	0.86242
7	0.74727
6	0.61515
5	0.47515
4	0.34364
3	0.22909
2	0.12424
1	0.03939

Tabla 5.3. Vectores de masa normalizada del primer modo. (Fuente: propia)

Posteriormente se calcula el vector de masa equivalente (m^*) multiplicando la matriz de masas (M) por el vector de masa normalizada del primer modo (Φ); es decir $m^* = \Phi^T Ms$.

NIVEL	M										Φ	m^*
	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1		
10	0.110	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.0000	0.1100
9	0.000	0.110	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.9467	0.1041
8	0.000	0.000	0.110	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.8624	0.0949
7	0.000	0.000	0.000	0.110	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.7473	0.0822
6	0.000	0.000	0.000	0.000	0.110	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.6152	0.0677
5	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.110	0.000	0.000	0.000	0.000	0.4752	0.0523
4	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.110	0.000	0.000	0.000	0.3436	0.0378
3	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.110	0.000	0.000	0.2291	0.0252
2	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.110	0.000	0.1242	0.0137
1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.110	0.0394	0.0043

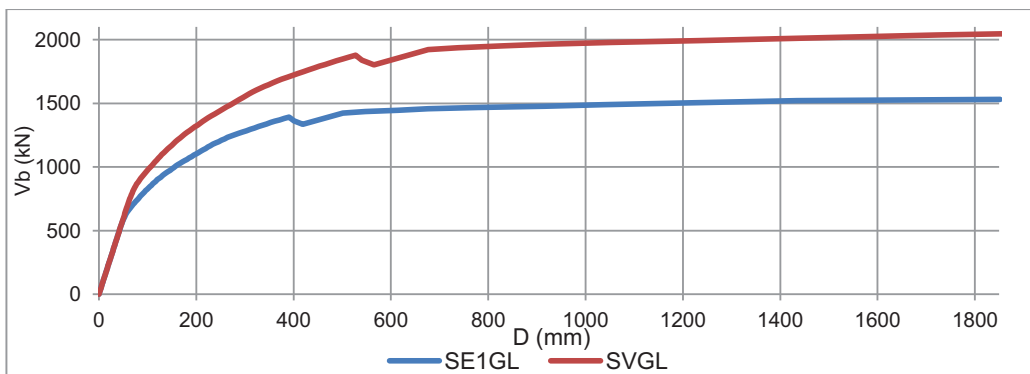
Tabla 5.4. Multiplicación de la matriz de masa por el vector de masa normalizada

(Fuente: propia)

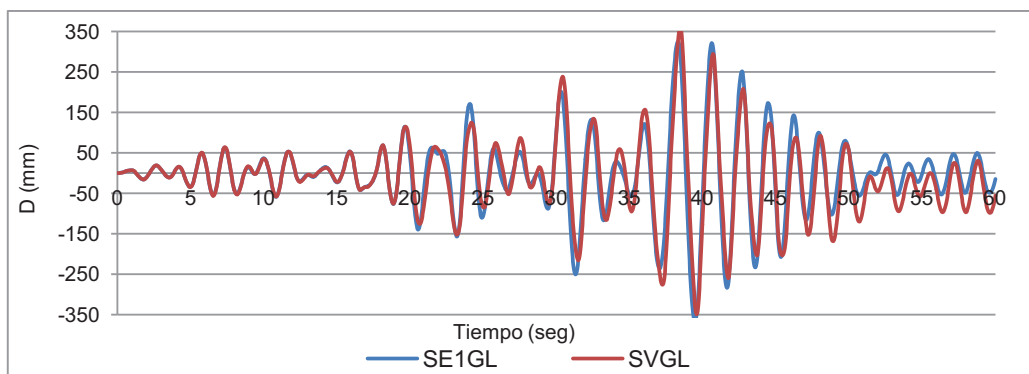
Al multiplicar el vector m^* por el vector de masas (T), que es igual a 1, se obtiene que $m^*=0.5921$, este valor se ingresa en la siguiente fórmula para calcular el factor de participación modal:

$$\Gamma = \frac{\Phi^T M_s}{\Phi^T M \Phi} = \frac{m^*}{L^*} = \frac{0.5921}{0.4389} = 1.34909$$

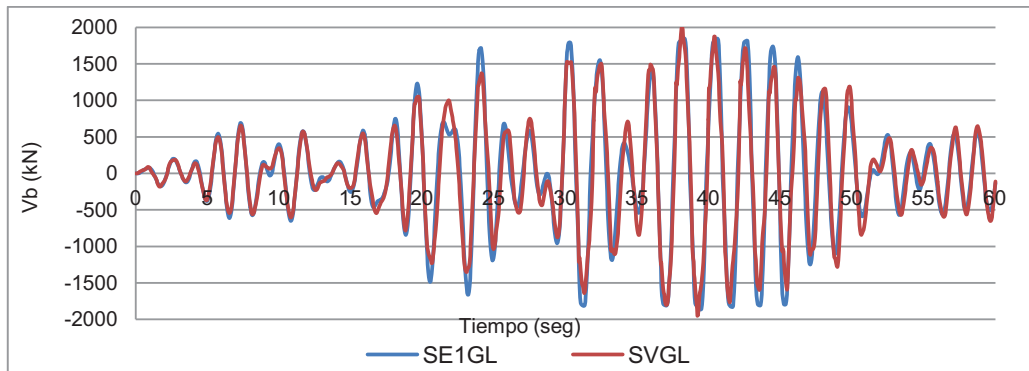
Con el factor de participación modal y la curva pushover del SVGL se calculan los desplazamientos y cortantes para cada punto de la curva pushover del SE1GL a partir de las ecuaciones: $D^*=D/\Gamma$ y $V=V/\Gamma$.



Gráfica 5.3. Respuestas sísmicas del SVGL y el SE1GL (Fuente: propia)

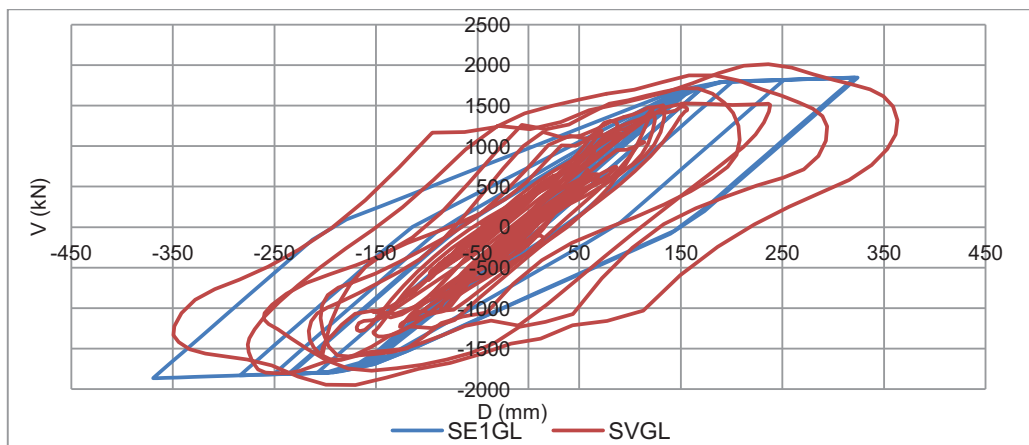


Gráfica 5.4. Respuesta tiempo-desplazamiento del SE1GL y el SVGL. (Fuente: propia)



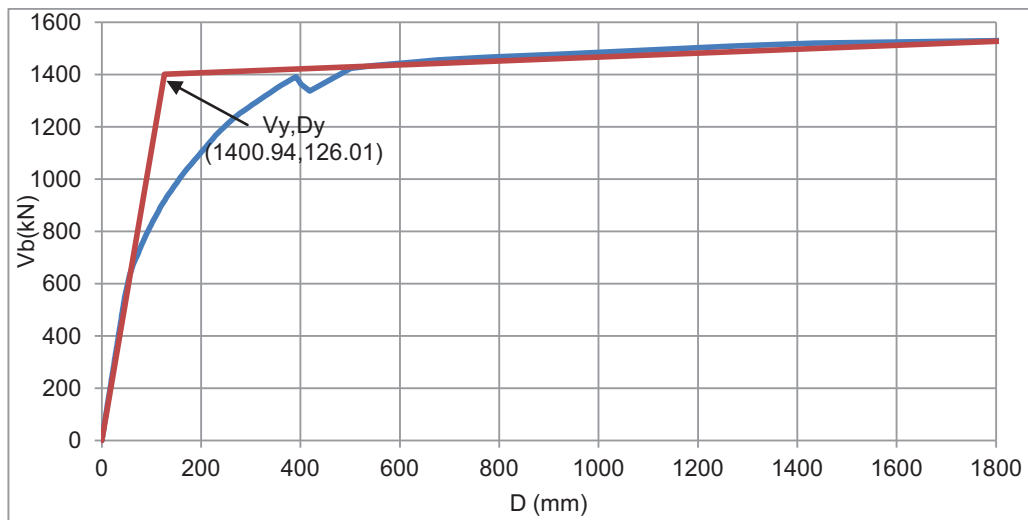
Gráfica 5.5. Comparación de la respuesta tiempo-cortante del SE1GL y el SVGL.

(Fuente: propia)



Gráfica 5.6. Comparación de la respuesta cortante-desplazamiento del SE1GL y el SVGL. (Fuente: propia)

Una vez que se comprueba la similitud entre el SE1GL y el SVGL el paso siguiente es idealizar la curva pushover en un modelo bilineal que describa un comportamiento elastoplástico del sistema. El método empleado para la idealización de la curva es el propuesto por el manual de FEMA descrito en capítulos anteriores.



Gráfica 5.7. Idealización elasto-plástica de la curva pushover del SE1GL según el método FEMA 356 (Fuente: propia)

La idealización de la curva pushover permite calcular la rigidez lateral del marco del SE1GL mediante la relación $K_m = F/D$, donde F y D son la fuerza y desplazamiento representados por el punto de inflexión de la curva idealizada.

5.2. Diseño de disipadores y respuesta sísmica del SE1GL con disipadores.

El diseño y elección de disipadores se realiza comparando la respuesta sísmica del SE1GL con y sin disipadores, para lo cual se usan 2 modelos de prueba, el primero de ellos servirá como grupo de control, en el cual solo se evaluará su desempeño sísmico en base a la rigidez lateral del marco (k_m). Dicho modelo se compone de un marco rígido de un nivel con altura de 3.5 m y claro de 6 m.

El segundo modelo es un marco de un nivel adicionado con el sistema amortiguador compuesto por un disipador tipo ADAS en el centro del claro conectado a la base mediante brazos tipo chevron. En este modelo, a diferencia del primero,

actúan las fuerzas correspondientes a la rigidez lateral del marco (k_m), la rigidez de los brazos que sostienen al sistema disipador (k_b) y la rigidez del disipador (k_d).

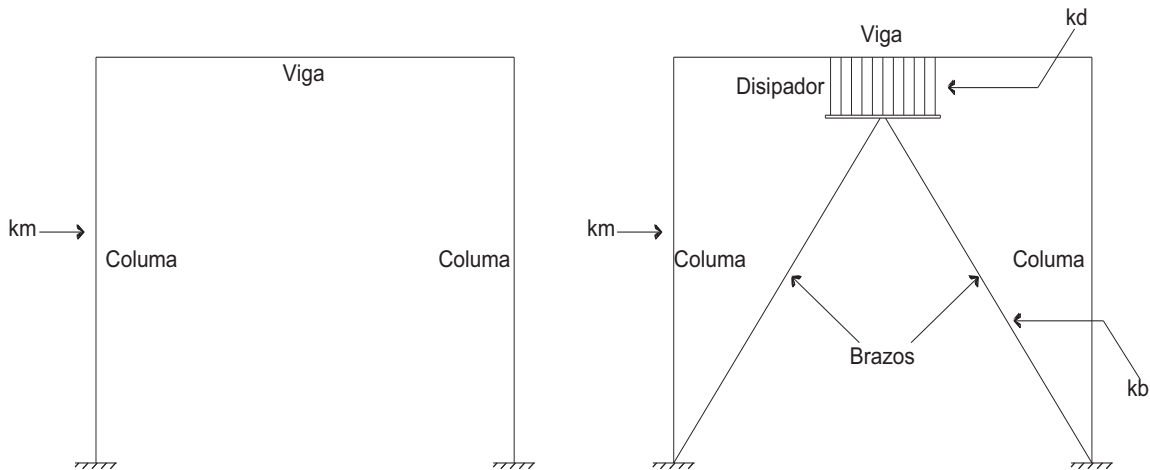


Imagen 5.3. Modelos de estudio del SE1GL. (Fuente: propia)

El diseño de los disipadores parte de la relación k_m/k_d que se proponga, Navarro (2002) realizó un estudio en el cual estableció que un disipador tipo ADAS tiene un desempeño sísmico satisfactorio si cuenta con una rigidez 3.5 veces mayor a la rigidez del marco, es decir, una relación $k_m/k_d=3.5$, de tal manera que en el presente estudio se harán pruebas de disipadores con relaciones k_m/k_d iguales a 3.5, 4, 4.5, 5.0, 6.0, 7.0 y 10.

Además de la rigidez propia de los disipadores, en el sistema también interviene la rigidez de los brazos, dicha rigidez se calcula con la expresión $k_b=EA/L$, donde E es el modulo de elasticidad del material del brazo, A es el área y L la longitud del brazo. Los brazos se diseñaron como columnas de acero, eligiéndose vigas IPR de 14 x 6 3/4" cuya área es de 7206 mm², longitud de 4610 mm y modulo de

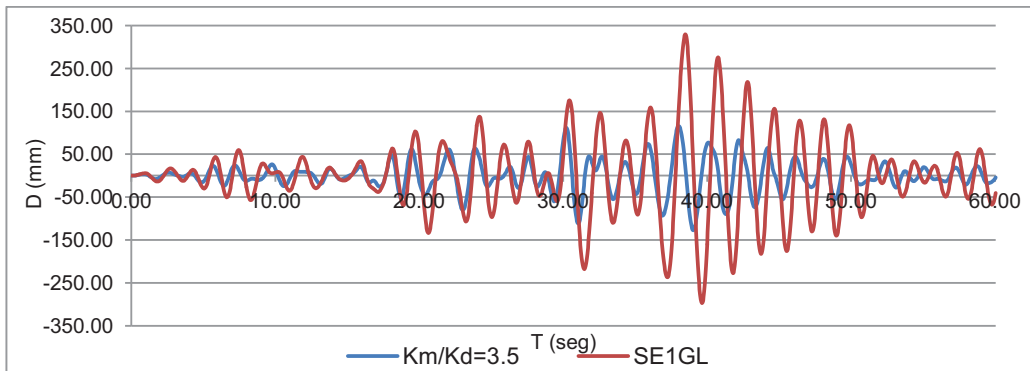
elasticidad de 199.947 kN/mm^2 , dando como resultado una rigidez $k_b=312.564 \text{ kN/mm}$.

Los brazos son colocados con un ángulo de inclinación respecto a la horizontal (α), de tal manera que la rigidez calculada anteriormente debe adecuarse a este acomodo. La rigidez de los disipadores sobre los brazos respecto al ángulo de inclinación recibe el nombre de rigidez axial (K_d axial) y es el producto de αk_d .

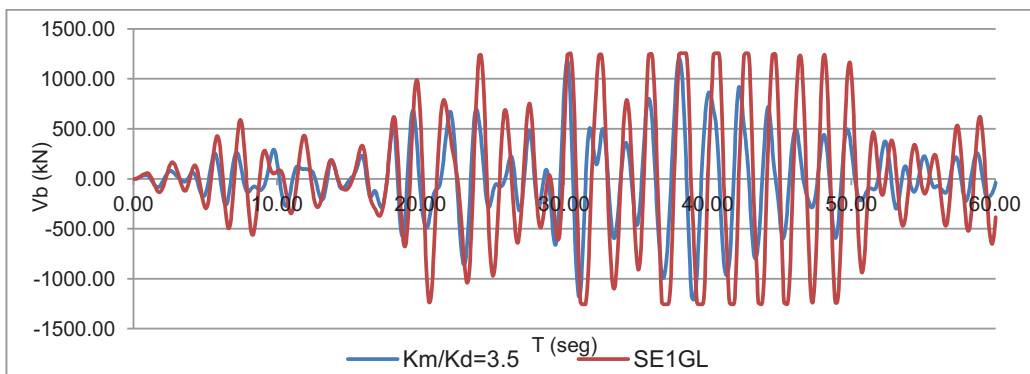
Km/Kd	Km (kN/mm)	Kd (kN/mm)	α (rad)	Kd axial (kN/mm)	L brazo (mm)	k_b (kN/mm)
2.5	11.118	27.794	0.86	32.237	4609.77	312.564
3.0		33.353		38.685		
3.5		38.912		45.132		
4.0		44.471		51.580		
4.5		50.029		58.027		
5.0		55.588		64.475		
6.0		66.706		77.370		
7.0		77.824		90.265		
10.0		111.176		128.950		

Tabla 5.5. Valores de rigidez axial y esfuerzo de fluencia para disipadores y valores de longitud y rigidez en brazos (Fuente: propia).

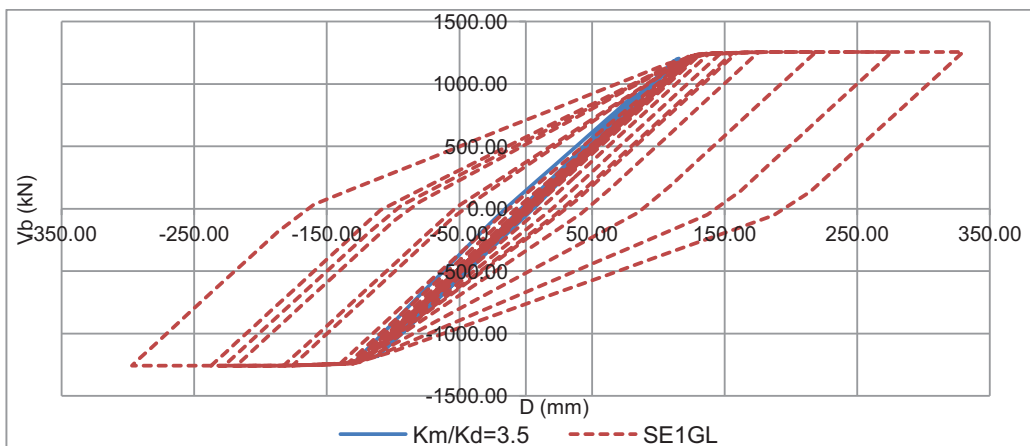
Una vez que se han establecidos los valores de la rigidez axial de los disipadores, así como rigidez y ángulo de inclinación de los brazos los datos son introducidos al programa IDARC en un archivo de texto (.txt) y se realiza un análisis pushover sometiendo nuevamente el modelo al acelerograma SCT-85. Con los resultados de este nuevo análisis se realiza una comparación del desempeño sísmico de la estructura con y sin disipadores con los siguientes resultados:



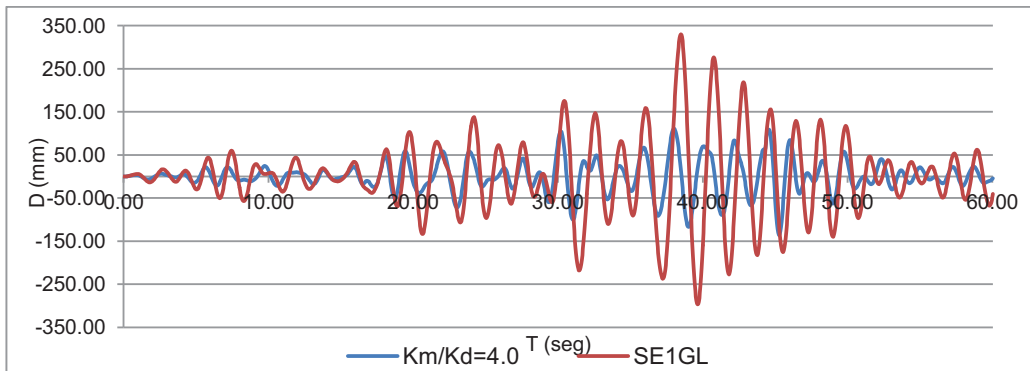
Gráfica 5.8. Respuesta tiempo-desplazamiento $km/kd=3.5$. (Fuente: propia)



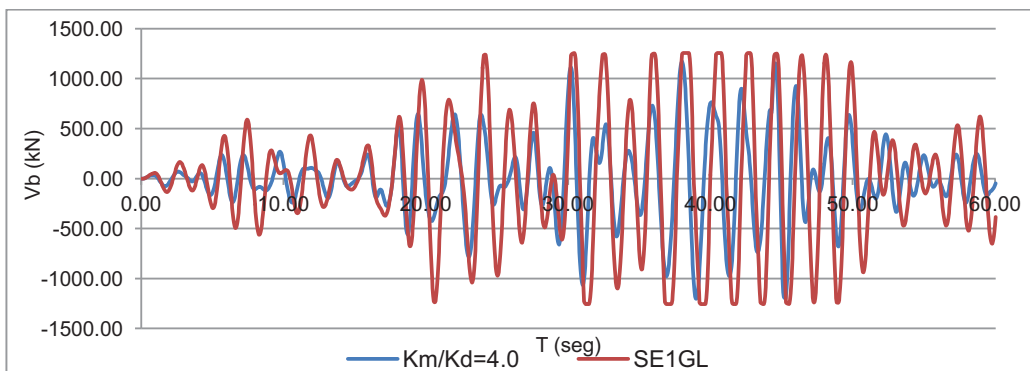
Gráfica 5.9. Respuesta tiempo-cortante $km/kd=3.5$. (Fuente: propia)



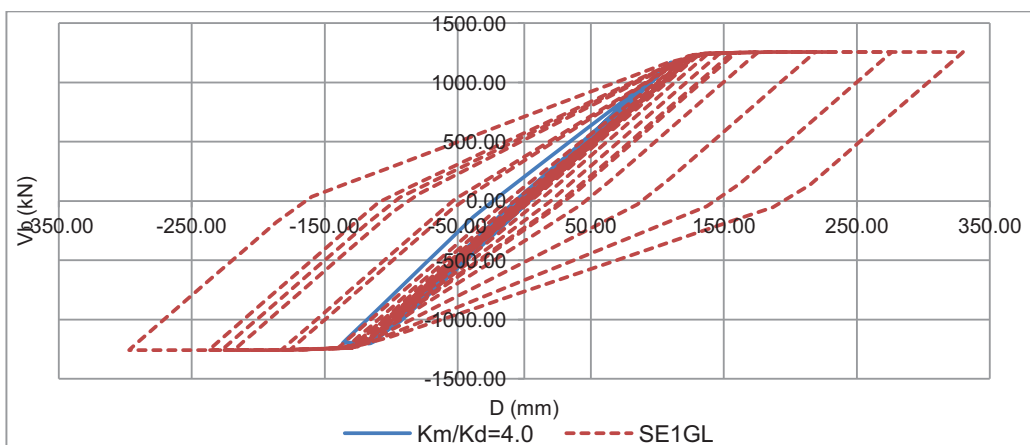
Gráfica 5.10. Respuesta cortante-desplazamiento $km/kd=3.0$. (Fuente: propia)



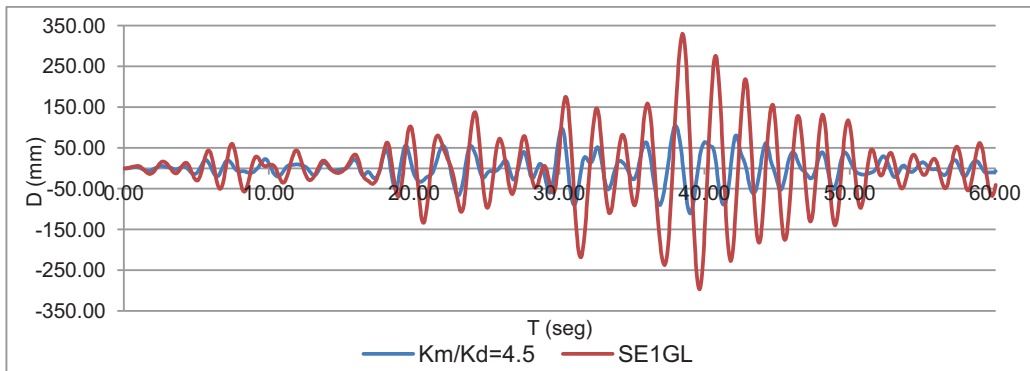
Gráfica 5.11. Respuesta tiempo-desplazamiento km/kd=4.0. (Fuente: propia)



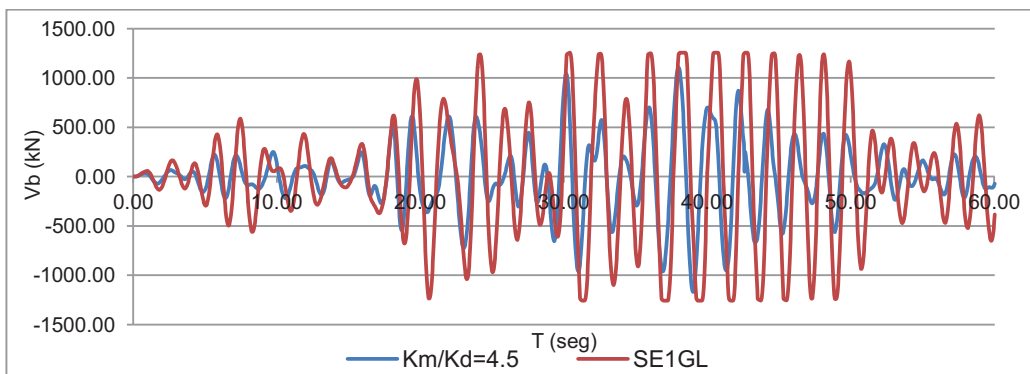
Gráfica 5.12. Respuesta tiempo-cortante km/kd=4.0. (Fuente: propia)



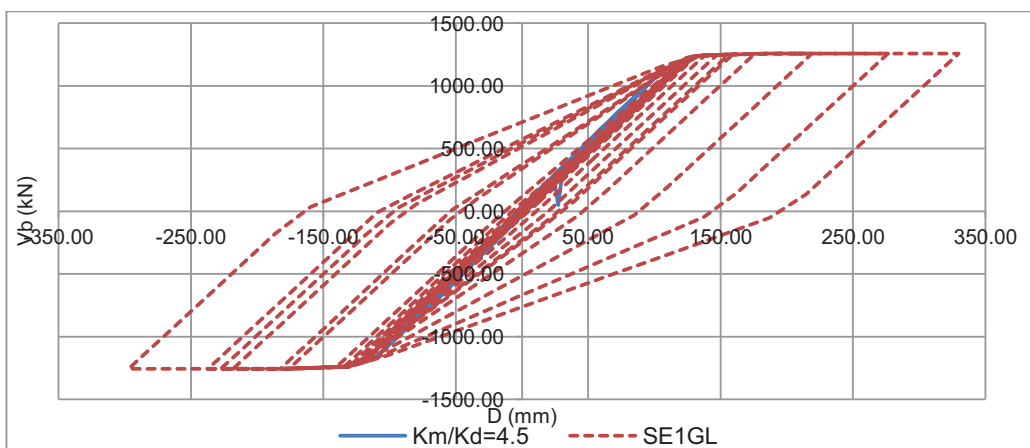
Gráfica 5.13. Respuesta cortante-desplazamiento km/kd=4.0. (Fuente: propia)



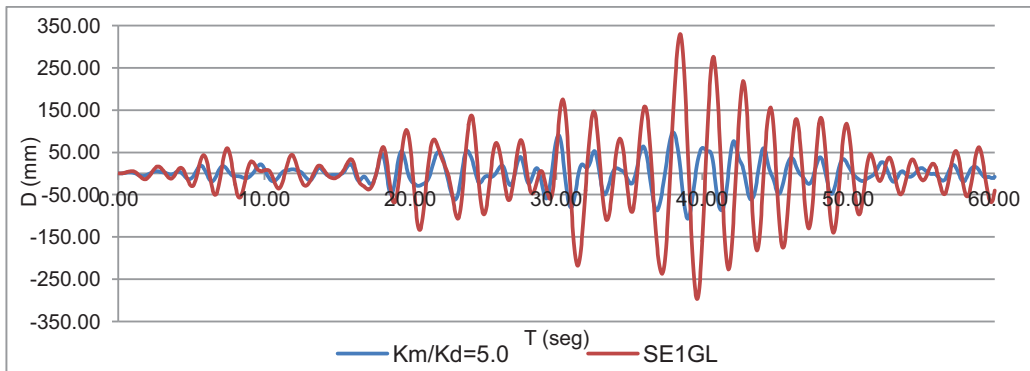
Gráfica 5.14. Respuesta tiempo-desplazamiento km/kd=4.5. (Fuente: propia)



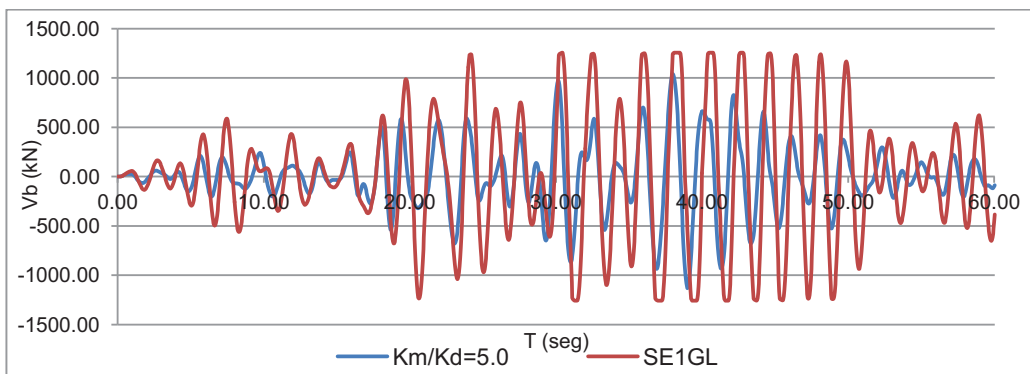
Gráfica 5.15. Respuesta tiempo-cortante km/kd=4.5. (Fuente: propia)



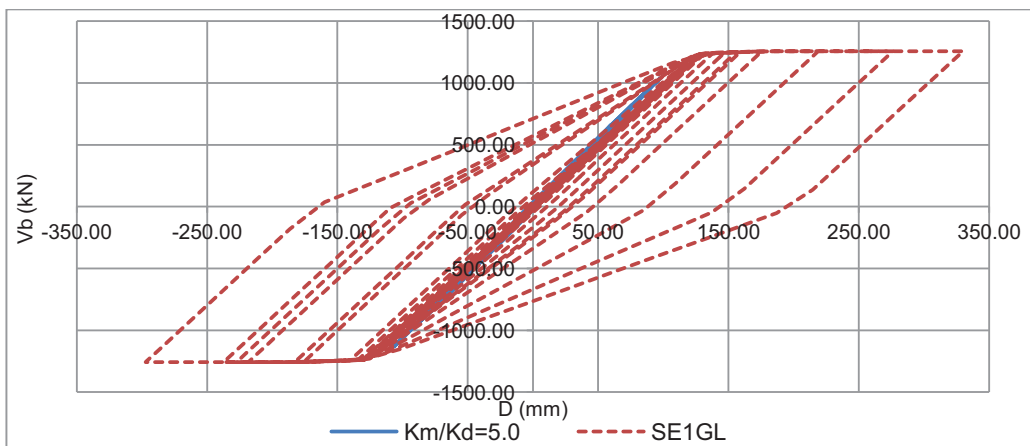
Gráfica 5.16. Respuesta cortante-desplazamiento km/kd=4.5. (Fuente: propia)



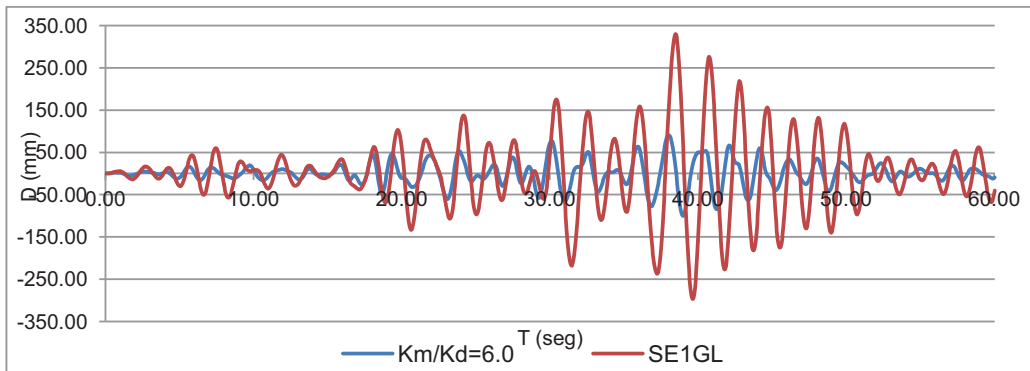
Gráfica 5.17. Respuesta tiempo-desplazamiento km/kd=5.0. (Fuente: propia)



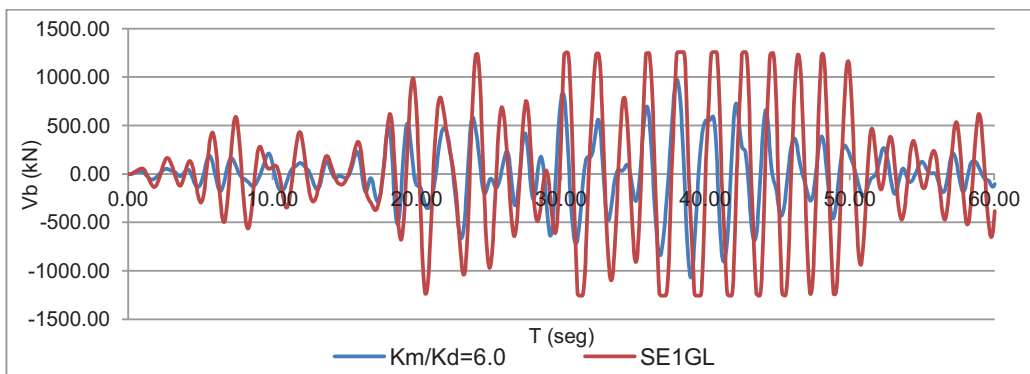
Gráfica 5.18. Respuesta tiempo-cortante km/kd=5.0. (Fuente: propia)



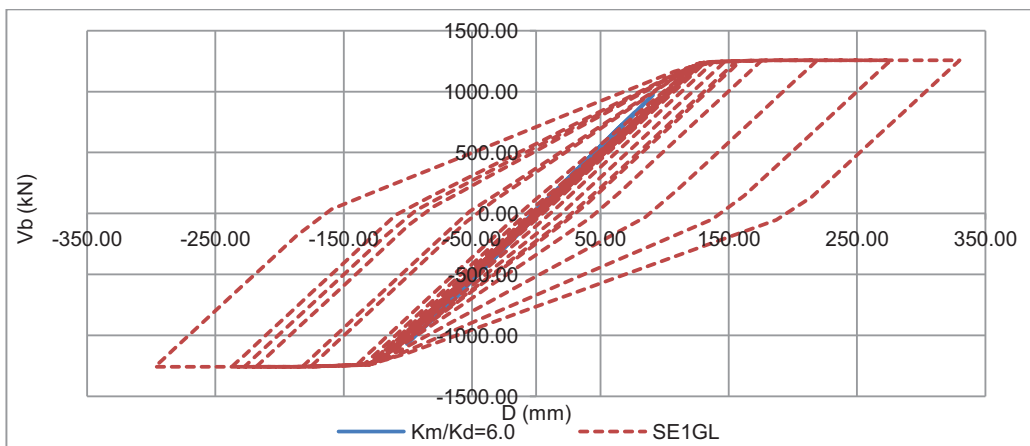
Gráfica 5.19. Respuesta cortante-desplazamiento km/kd=5.0. (Fuente: propia)



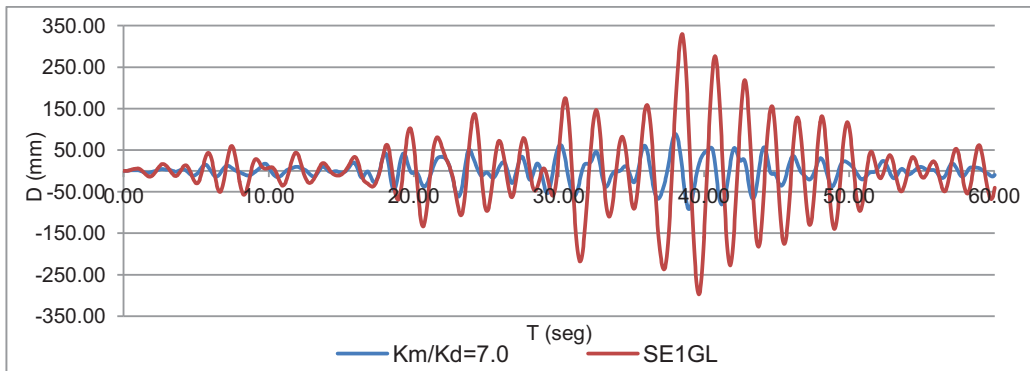
Gráfica 5.20. Respuesta tiempo-desplazamiento km/kd=6.0. (Fuente: propia)



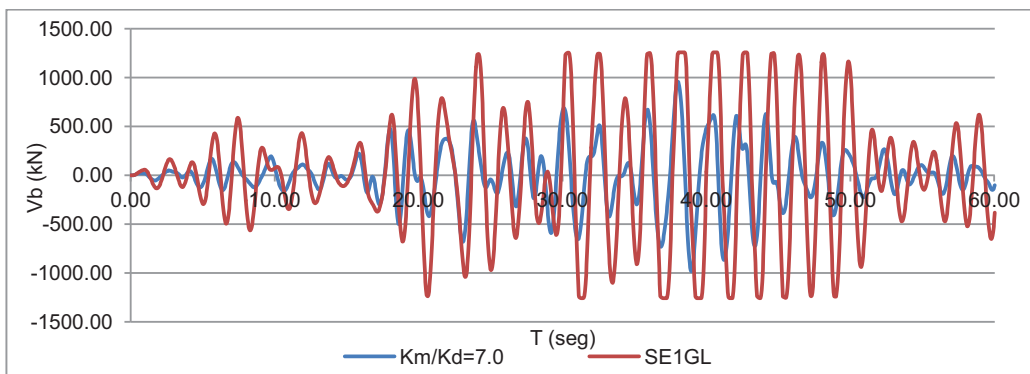
Gráfica 5.21. Respuesta tiempo-cortante km/kd=6.0. (Fuente: propia)



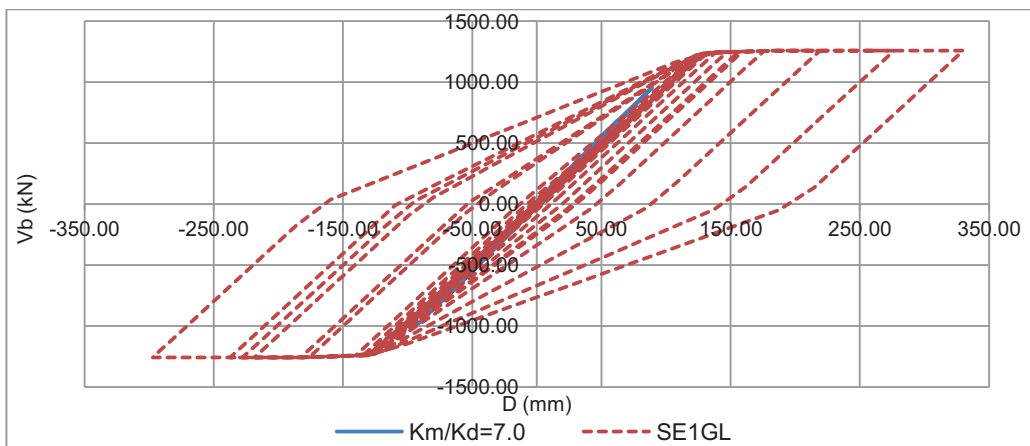
Gráfica 5.22. Respuesta cortante-desplazamiento km/kd=6.0. (Fuente: propia)



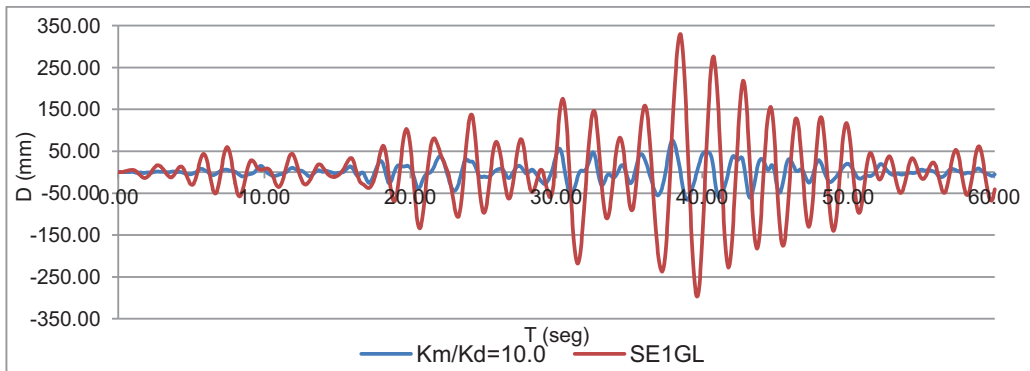
Gráfica 5.23. Respuesta tiempo-desplazamiento km/kd=7.0. (Fuente: propia)



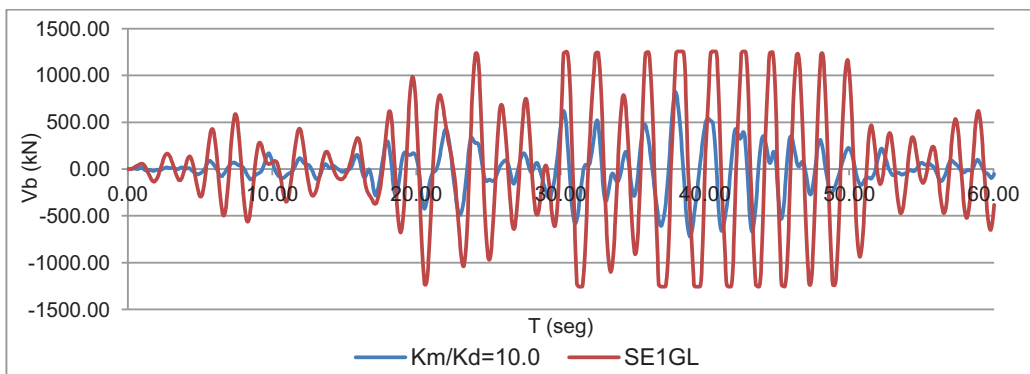
Gráfica 5.24. Respuesta tiempo-cortante km/kd=7.0. (Fuente: propia)



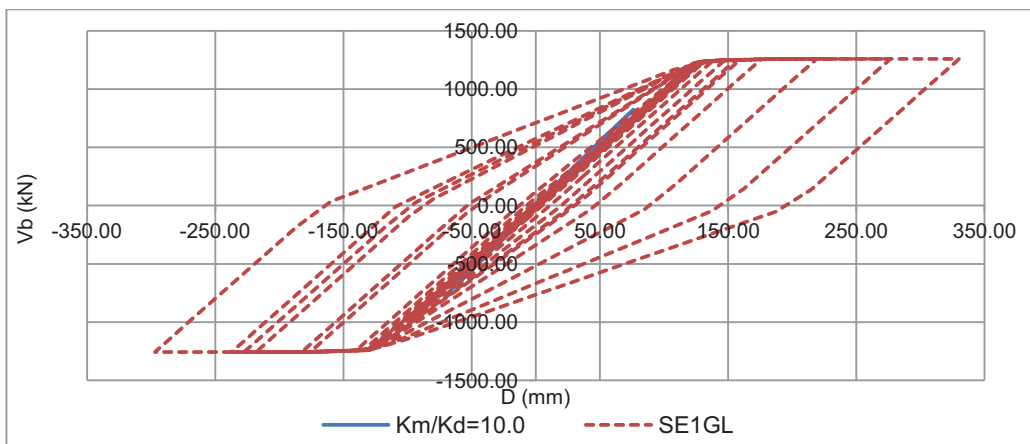
Gráfica 5.25. Respuesta cortante-desplazamiento km/kd=7.0. (Fuente: propia)



Gráfica 5.26. Respuesta tiempo-desplazamiento km/kd=10.0. (Fuente: propia)



5.27. Respuesta tiempo-cortante km/kd=10.0. (Fuente: propia)

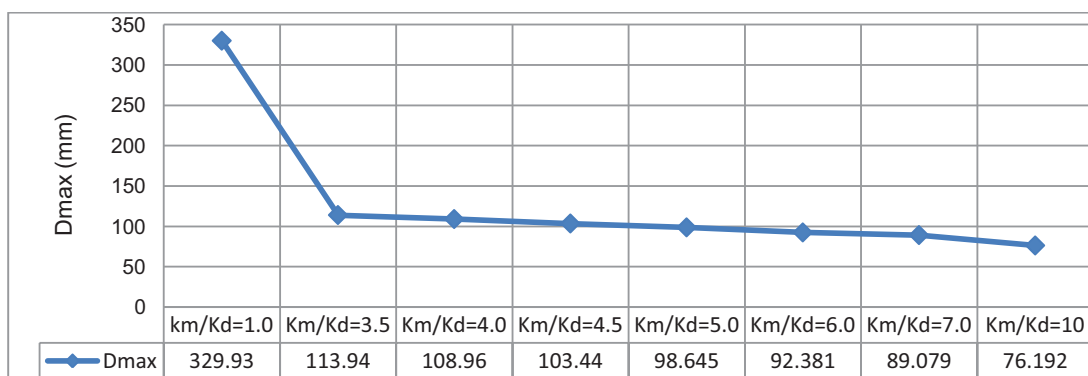


Gráfica 5.28. Respuesta cortante-desplazamiento km/kd=10.0. (Fuente: propia)

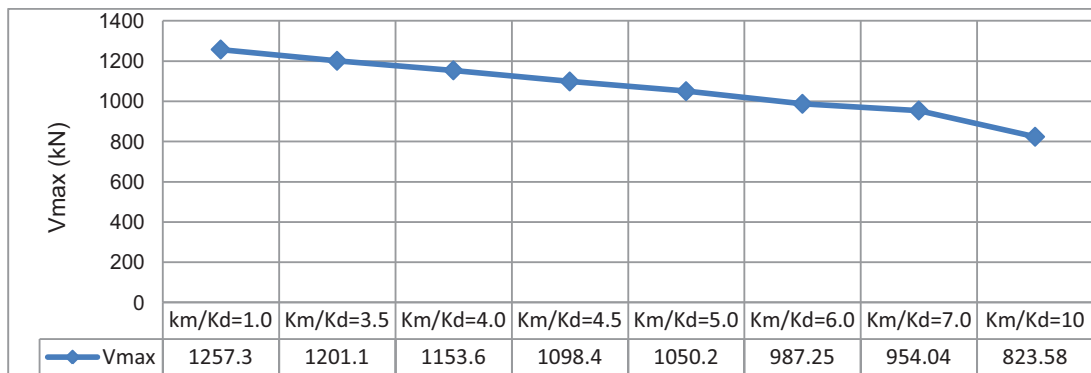
De las gráficas anteriores se hace la comparativa del comportamiento sísmico de cada dispositivo. Tal y como se observa, todos los dispositivos ayudan a la disminución de desplazamientos y a la absorción del cortante basal, pero solo un tipo de disipador es el considerado como adecuado para la estructura en estudio.

Para decidir que disipador es el adecuado, este habrá de cumplir 3 condiciones: 1) presentar una considerable disminución de desplazamientos, 2) bajo número de placas para su construcción y 3) absorción de cortante. Aunque el tercer parámetro de evaluación no es una propiedad elemental que influya en el desempeño del disipador, resulta ser un buen criterio de selección en caso de que los dispositivos evaluados tengan desempeños muy similares en las 2 primeras condiciones descritas anteriormente.

Para facilitar la evaluación de los disipadores se recurrió a las graficas 5.29 y 5.30, en las cuales se tabulan los valores de desplazamiento y cortante máximos correspondientes a cada modelo probado con y sin disipadores.



Gráfica 5.29. Desplazamientos máximos en los modelos con disipadores y el SE1GL sin disipadores (km/kd=1). (Fuente: propia)



Gráfica 5.30. Cortante máximo en los modelos con disipadores y el SE1GL sin disipadores (km/kd=1). (Fuente: propia)

De las gráficas anteriores puede observarse que los dispositivos con relación km/kd iguales a 5, 6, 7 y 10 muestran la mayor disminución de desplazamientos, por lo tanto se determinarán las propiedades geométricas para cada tipo de dispositivo a partir de la ecuación $k_{eff} = F/D$. Los valores de fuerza (F) y desplazamiento (D) de los disipadores son calculados a través de las ecuaciones 5.1 y 5.2. Dichas ecuaciones fueron deducidas por Zabala, Bustos et al en el 2011 mientras realizaban estudios a disipadores tipo ADAS con relación base-altura igual a 0.5:1.

$$F = \frac{Nfybt^2}{2h} \quad (5.1)$$

Donde:

F: carga de fluencia del disipador (kN).

N: Numero de placas para el disipador (pieza).

f_y : Limite de fluencia del material del disipador (kN/mm^2).

b: base de las placas del dissipador (mm).

t: espesor de placa para el dissipador (mm).

h: altura de las placas para el dissipador (mm).

$$D = \frac{3fyh^2}{4tE} \quad (5.2)$$

Donde:

E: módulo de elasticidad del material del dissipador (kN/mm²).

En las ecuaciones anteriores, los resultados están en función de 3 variables: el número, espesor y altura de las placas. Para igualar estas variables y establecer un criterio uniforme de evaluación se eligió usar placas de 300 mm de alto, 150 mm de base y espesor de 19.05 mm; en el caso del número de placas se determinarán haciendo las operaciones correspondientes tras sustituir las ecuaciones 5.1 y 5.2 en la siguiente expresión:

$$k_{eff} = \frac{F}{D} = \frac{4Nbt^2E}{6h^3} \quad (5.3)$$

y como k_{eff} es un valor conocido en cada tipo de dissipador, entonces:

$$N = \frac{6h^3k_{eff}}{4Ebt^3} \quad (5.4)$$

En estos resultados se permitirá una tolerancia de $\pm 10\%$ respecto al valor de rigidez deseado (K_{nec}).

km/kd	N (placas)	h (mm)	b (mm)	t (mm)	F (kN)	D (mm)	Knec (kN/mm)	Kreal (kN/mm)	Tolerancia. (%)
5	11	300	150	19.05	247.611	4.440	55.588	56.317	1.311
6	13				292.632	4.440	66.706	66.556	7.451
7	15				337.652	4.440	77.824	76.796	5.258
10	22				495.223	4.440	111.176	112.634	1.311

Tabla 5.6. Características geométricas y propiedades mecánicas de los disipadores según su relación de rigidez. (Fuente: propia)

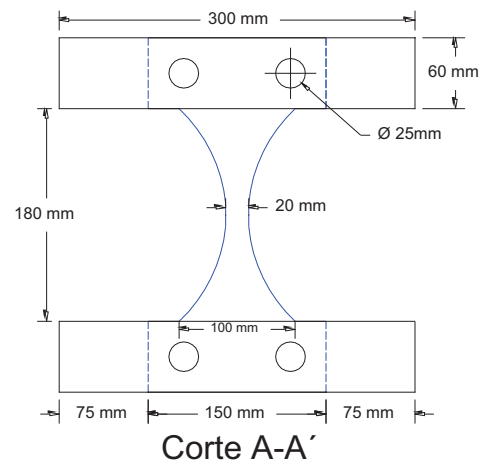
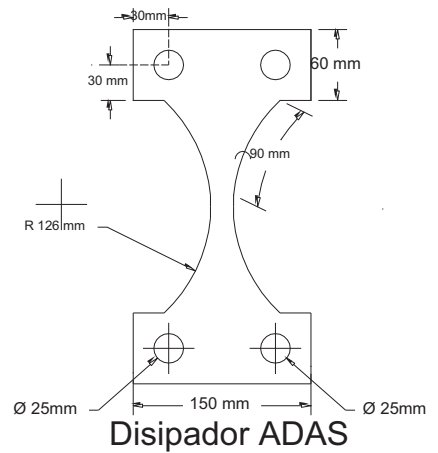
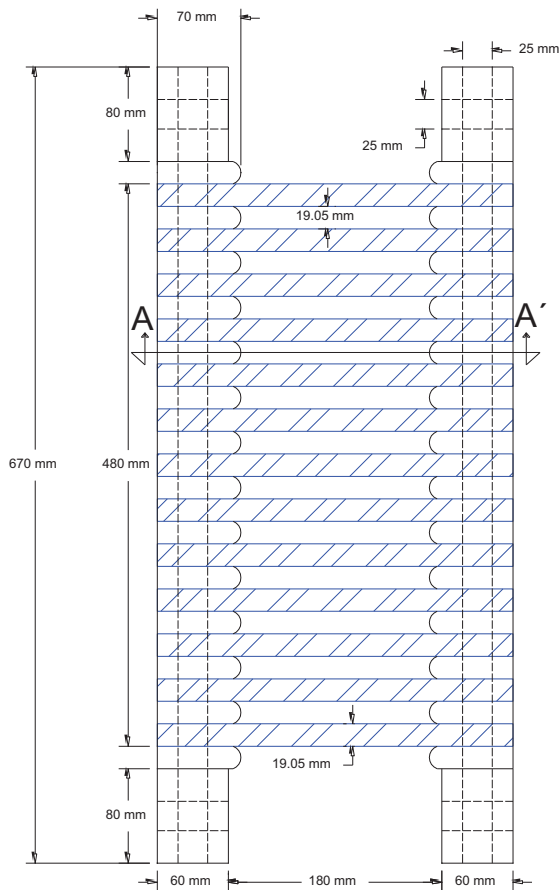
Habiendo determinado las propiedades geométricas para cada disipador, el siguiente paso es comparar los desplazamientos entre cada uno y determinar, según los criterios antes mencionados, que dispositivo es el más adecuado para el edificio.

Disipador	Km/kd	Dmax (mm)		Vbmax (kN)		Placas
		(mm)	(%)	(kN)	(%)	
-	SE1GL	329.93	100.00	1257.30	100.00	-
1	km/kd=5.0	98.65	-70.10	1050.20	-16.47	11
2	km/kd=6.0	92.38	-72.00	987.25	-21.48	13
3	km/kd=7.0	89.08	-73.00	954.04	-24.12	15
4	km/kd=10.0	76.19	-76.91	823.58	-34.50	22

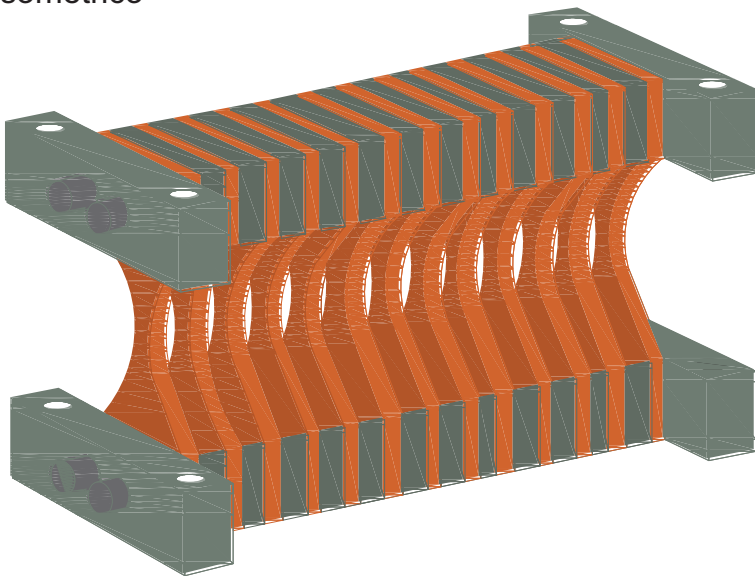
Tabla 5.7. Comparación del desempeño de cada disipador. (Fuente: propia).

De la tabla anterior el disipador con la mayor reducción de desplazamientos es el número 4, aunque también es el que más placas usa. Por otra parte, los disipadores 1 y 2 presentan buena reducción de desplazamientos y con un menor número de placas respecto al disipador 4. De tal manera que los disipadores más adecuados para el edificio son el 1 y 2. Para determinar que disipador se instalará en el edificio, se empleará el 3er criterio descrito anteriormente; por lo tanto el disipador que se usará en la estructura es el 2.

Montaje de placas para disipadores



Isométrico



Especificaciones:

- > Los disipadores se construirán con 13 placas de acero estructural A-36 de 3/4" de espesor (t).
- > Las placas se unirán con barras o fideos de acero A-36 con un diámetro de 25 mm asegurados con tuerca y rondana en cada extremo del dispositivo.
- > Entre las placas del disipador se colocarán otras de igual espesor y base; tomándose una altura de 70 mm.
- > Los extremos superiores e inferiores del disipador estarán confinados por una placa de acero A-36 de 60 mm de altura, 80 mm de ancho y 30 mm de largo.

Plano No. 1

Escala: S/E

Fecha: 05/10/2012

A continuación se determina la ubicación de los disipadores en la estructura, para ello se tomará la información dada por el programa IDARC, en la cual, después del análisis pushover registra el momento, cortante y deformación por fluencia en cada viga y columna del modelo estructural. Para facilitar la interpretación de datos, el programa IDARC genera un modelo de la estructura en donde indica la severidad del daño en los elementos estructurales según la deformación por fluencia que tuvieron durante el sismo. En este caso usa el símbolo X para indicar una deformación normal y 0 para una deformación severa.

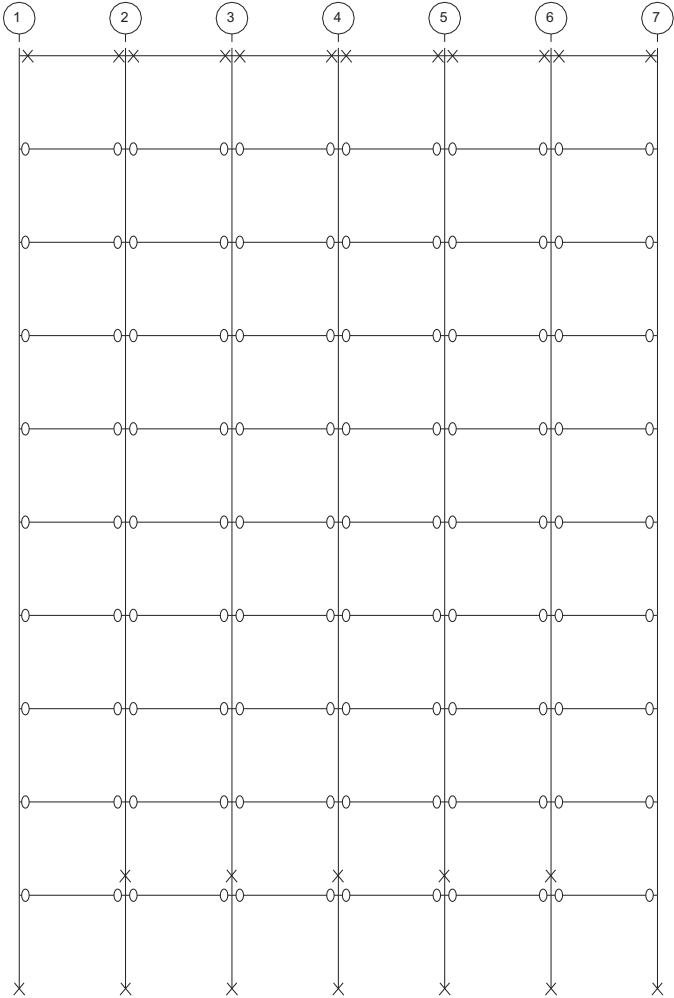


Imagen 5.4. Deformación por fluencia en el marco analizado (Fuente: IDARC)

Un análisis de datos más detallado de las tablas 5.8 y 5.9 determinó que las vigas con mayor agrietamiento y deformación por fluencia son las que se encuentran entre los ejes 1-2, 3-4, 4-5, 5-6 y 6-7 de los niveles 1 al 7 y en el caso de las columnas, los ejes de 1 al 7 entre el nivel 0 y 1 y los ejes 2 al 6 entre el nivel 7 y 8 presentaron la mayor cantidad de agrietamientos. Un resumen de estos datos es presentado en la imagen 5.5.

Daño en vigas				
No. Viga	Agrietamiento		Fluencia	
	Derecha	Izquierda	Derecha	Izquierda
1	✓	✓	✓	✓
2	✓	✓	✓	✓
3	✓	✓	✓	✓
4	✓	✓	✓	✓
5	✓	✓	✓	✓
6	✓	✓	✓	✓
7	✓	✓	✓	✓
8	✓	✓	✓	✓
9	✓	✓	✓	✓
10	✓	✓	✓	✓
11	✓	✓	✓	✓
12	✓	✓	✓	✓
13	✓	✓	✓	✓
14	✓	✓	✓	✓
15	✓	✓	✓	✓
16	✓	✓	✓	✓
17	✓	✓	✓	✓
18	✓	✓	✓	✓
19	✓	✓	✓	✓
20	✓	✓	✓	✓
21	✓	✓	✓	✓
22	✓	✓	✓	✓
23	✓	✓	✓	✓
24	✓	✓	✓	✓
25	✓	✓	✓	✓
26	✓	✓	✓	✓
27	✓	✓	✓	✓
28	✓	✓	✓	✓
29	✓	✓	✓	✓
30	✓	✓	✓	✓

Daño en vigas				
No. Viga	Agrietamiento		Fluencia	
	Derecha	Izquierda	Derecha	Izquierda
31	✓	✓	✓	✓
32	✓	✓	✓	✓
33	✓	✓	✓	✓
34	✓	✓	✓	✓
35	✓	✓	✓	✓
36	✓	✓	✓	✓
37	✓	✓	✓	✓
38	✓	✓	✓	✓
39	✓	✓	✓	✓
40	✓	✓	✓	✓
41	✓	✓	✓	✓
42	✓	✓	✓	✓
43	✓	✓	✓	✗
44	✓	✓	✓	✗
45	✓	✓	✓	✗
46	✓	✓	✓	✗
47	✓	✓	✓	✗
48	✓	✓	✓	✗
49	✓	✓	✗	✗
50	✓	✓	✗	✗
51	✓	✓	✗	✗
52	✓	✓	✗	✗
53	✓	✓	✗	✗
54	✓	✓	✗	✗
55	✓	✓	✗	✗
56	✓	✓	✗	✗
57	✓	✓	✗	✗
58	✓	✓	✗	✗
59	✓	✓	✗	✗
60	✓	✓	✗	✗

Tabla 5.8. Daños sufridos en vigas. (Fuente: IDARC)

Daño en columnas		
No.	DAÑO	NODO
1	Agrietamiento	Inferior
2	Agrietamiento	Inferior
3	Agrietamiento	Inferior
4	Agrietamiento	Inferior
5	Agrietamiento	Inferior
6	Agrietamiento	Inferior
7	Agrietamiento	Inferior
13	Agrietamiento	Inferior
9	Agrietamiento	Inferior

Daño en columnas		
No.	DAÑO	NODO
10	Agrietamiento	Inferior
11	Agrietamiento	Inferior
12	Agrietamiento	Inferior
51	Agrietamiento	Superior
52	Agrietamiento	Superior
53	Agrietamiento	Superior
54	Agrietamiento	Superior
55	Agrietamiento	Superior

Tabla 5.9. Daño sufrido en columnas. (Fuente: IDARC)

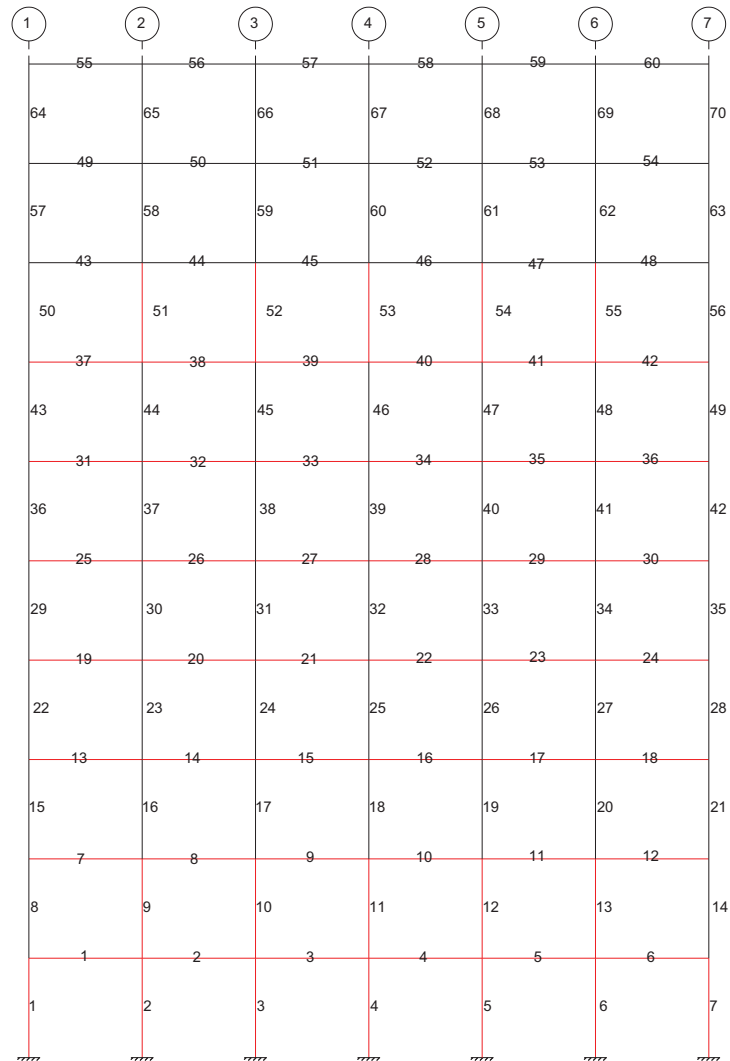


Imagen 5.5. Columnas y vigas con mayor cantidad de daños. (Fuente: Propia)

En base a los datos anteriores se eligió el siguiente acomodo de los disipadores en la estructura:

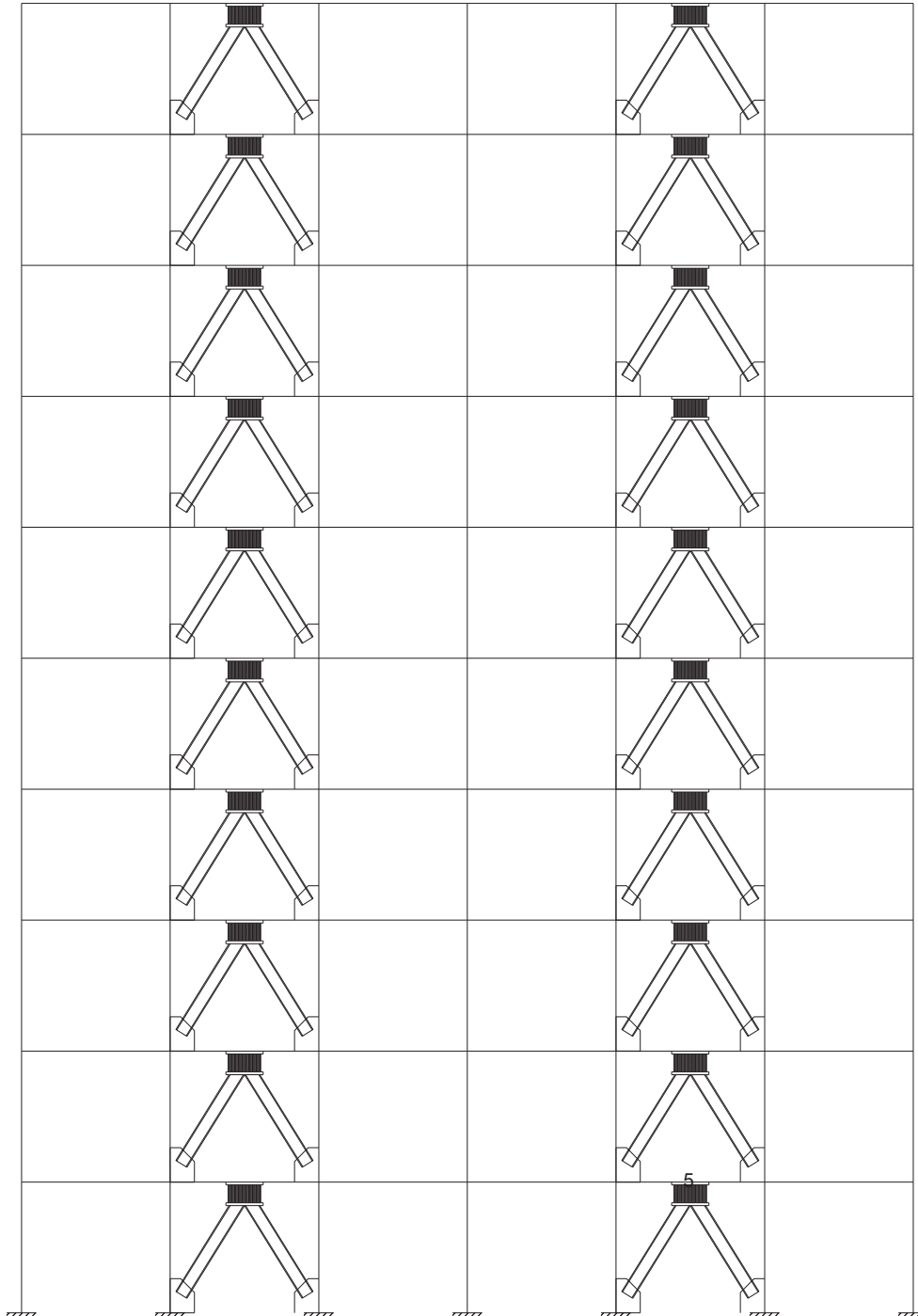


Imagen 5.5. Ubicación de los disipadores en la estructura. (Fuente: propia)

CONCLUSIONES

A lo largo del presente estudio se llevo a cabo el diseño de disipadores tipo ADAS para un edificio de 10 niveles clasificado como una estructura tipo A. Para cumplir con este objetivo se hizo uso del programa IDARC para hacer los análisis pushover correspondientes a cada prueba.

El uso de el programa IDARC permitió no solo realizar los análisis pushover necesarios, sino también, a partir de los resultados arrojados efectuar diversas comparativas en las respuestas sísmicas de los modelos estudiados permitiendo así definir las mejores propiedades del disipador para el marco en estudio.

Parte importante en este trabajo de investigación fue la exposición del uso y aplicación de distintos tipos de sistemas de control sísmico, así como los procedimientos de diseño y programas existentes para probar su desempeño.

Entre las conclusiones más importantes obtenidas de esta investigación se encuentran:

- a) Pese que la adición de rigidez mediante disipadores a una estructura mejora su desempeño sísmico llegará un momento en que esta rigidez añadida tomará valores que, aunque elevados, no serán capaces de mejorar significativamente el desempeño sísmico de la estructura, por lo que es necesario establecer un valor en que la reducción de desplazamientos y cortante sea buena sin que el costo de fabricación de los disipadores sea elevado, es decir encontrar un equilibrio entre el costo y un optimo desempeño.

- b) La reducción en desplazamientos es proporcional al aumento en la rigidez del disipador, por otra parte, la reducción del cortante absorbido por la estructura se relaciona directamente con la cantidad de placas usadas en el disipador.
- c) Los disipadores tipo ADAS resultan de gran utilidad en la reducción de desplazamientos y por ende en la disminución de daños sufridos a la estructura después de un sismo, aunque también ayudan a la reducción del cortante transmitido a la estructura haciendo de este tipo de disipadores uno muy versátil y fácil de diseñar e instalar.
- d) El diseño de disipadores tipo ADAS resulta sencillo debido a que la metodología no contiene variantes en su procedimiento, convirtiéndose en el mayor problema definir las propiedades mecánicas del disipador y adecuar un sistema de múltiples grados de libertad a un sistema de un grado de libertad.
- e) La mejor y más sencilla manera de llevar a cabo el diseño de disipadores ADAS y prueba de ellos en la estructura es la de usar un sistema equivalente de un grado de libertad debido a que permite probar diversos tipos de propiedades de disipadores en menor tiempo y con resultados más sencillos de interpretar y comparar.

En resumen, para el diseño de disipadores de energía sísmica tipo ADAS deben seguirse los siguientes pasos:

1. Realizar un análisis pushover del marco a diseñar para determinar su respuesta sísmica (relación fuerza-desplazamiento).
2. Definir un sistema equivalente de un grado de libertad (SE1GL) del marco a diseñar mediante el método N2.

3. Someter el SE1GL a un análisis pushover con un acelerograma, esto permitirá obtener las respuestas tiempo-desplazamientos, tiempo-cortante y cortante-desplazamientos del modelo bajo una excitación sísmica, preferentemente de gran intensidad.
4. Definir las propiedades de los disipadores, para ello es permitido el uso de ecuaciones definidas a partir de pruebas realizadas a disipadores con secciones similares a las que se pretende instalar, así como el uso de las propiedades de disipadores previamente estudiados en laboratorios.
5. Una vez que se han establecido las propiedades de los disipadores estas son añadidas al SE1GL y se procede a realizar un nuevo análisis pushover sometido al mismo acelerograma empleado en el paso 3. De este análisis se comparan las respuestas tiempo-desplazamiento, tiempo-cortante y desplazamiento-cortante de los distintos tipos de disipadores probados en el SE1GL respecto al SE1GL sin disipadores.
6. Definir, según las respuestas sísmicas el disipador más adecuado para el edificio, este será aquel que muestre la mayor reducción de desplazamientos con el menor número de placas usadas para su construcción. Aunque no es función principal de los disipadores también debe considerarse la disminución del cortante absorbido por la estructura para elegir al disipador más adecuado.

BIBLIOGRAFÍA

Aguiar Falconí, Roberto., Almazán, José Luis, Dechent, Peter. y Suarez, Vinicio.
(2008)

Aisladores de base elastoméricos y FPS.

Centro de Investigaciones Científicas (Escuela Politécnica del Ejército). Ecuador.

Arnal Simón, Luis y Betancourt Suárez, Max. (2004).

Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal.

Ed. Trillas. México.

Arriagada Rosas, Jaime Andrés. (2005)

Aislación sísmica de un edificio de oficinas de siete pisos. (Análisis comparativo de comportamiento y costos en un edificio tradicional).

Tesis inédita de la Escuela de Ingeniería Civil en Obras Civiles. Chile.

Bazan, Enrique y Meli, Roberto (2004)

Diseño sísmico de edificios.

Ed. Limusa. México.

Bozzo, Luis M. (2002).

Análisis y diseño de estructuras equipadas con disipadores de energía SL.

Universidad de Girona, España.

Eurocodigo 8: Diseño de estructuras sismoresistentes. Partes: 1, 2,3 y 6.

UNE-ENV 1998-1:2004.

Fajfar, Peter (2000)

A Nonlinear Analysis Method for Performance Based Seismic Desing.

Earthquake Spectra, Vol 16, No. 3

FEMA 450-1. Part 1: Provisions (2003)

NEHRP Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings and
Other Structures.

FEMA. EUA.

G. Buckle. (2000)

Passive control of structures for seismic loads.

12 World Conference on Earthquake Engineering (2000). New Zealand.

García Reyes, Luis Enrique (1998)

Dinámica Estructural Aplicada al Diseño Sísmico

Universidad de los Andes. Bogotá, Colombia.

González Cuevas, Óscar M. y Robles Fernández-Villegas Francisco. (2005).

Aspectos fundamentales del concreto reforzado.

Ed. Limusa. México.

Hernández Sampieri, Roberto, Fernández-Collado, Carlos y Lucio Baptista, Pilar.

(2006)

Metodología de la investigación.

Ed. McGraw-Hill. México.

Izaguirre Corona, Ariel Maximo. (2007)

Sistema de aisladores sísmicos de base para edificios.

Tesis inédita de la Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura del Instituto Politécnico Nacional. México D.F.

Jara Díaz, Manuel, Jara Guerrero, José Manuel y Casas Rius, Joan Ramon (2006)

Protección sísmica de estructuras con dispositivos de control.

Fondo editorial Morevallado. México.

Jara, J.M., Ayala, A.G. y Miranda, E. (2000)

Seismic behaviour of estructuras with energy dissipating system in México.

12 World Conference on Earthquake Engineering. New Zeland.

Memoria del congreso.

Kasai, Kazuhiko y Kibayashi, Masahito. (2004)

JSSI Manual for building passive control technology part-1 manual contents and design/anaysis methods.

13 th World Conference on Earthquake Engineering. Canada.

Kelly, J. M, Skinner, M. S. (1980)

Experimental testing of friction damped aseismic base isolation system with fail safe characteristics.

Earthquake Engineering Research Center, Rcpport No UBC/EERC-80/18, University of California at Berkeley.

Manual de Diseño de Obras Civiles. Diseño por sismo. (2008)

CFE. México.

M.D. Symans, M.C. Constantinou, D.P. Taylor y K.D. Garnjost. (1995)

Semi-active fluid viscous dampers for sismic response control.

State University of New York, Buffalo, EUA.

Mendoza Espinosa, Yudith Paulina. (2008)

Comparativa de diseño sísmico de edificios regulares de concreto reforzado por métodos de resistencia última y por desempeño, ubicados en distintas zonas del estado de Michoacán.

Tesis inédita de la Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad Don Vasco A.C. de la ciudad de Uruapan, Michoacán, México.

Montaña Peña, Miguel Ángel. (2010)

Análisis Push-Over de edificios con pórticos de acero en Bogotá.

Tesis inédita para obtener el título de master oficial de ingeniería del terreno e ingeniería sísmica de la Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona, España.

Naeim, Farzad, Kelly, M. James. (1999)

Desing of seismic isolated structures. From Theory to Practice.

John Wiley and Sons, Inc. EUA.

Navarro Caballero, Enrique Omar. (2004).

Influencia de la degradación de rigidez en estructuras con disipadores de energía.

Tesis inédita división de posgrado de la Facultad de Ingeniería Civil, U.M.S.N.H.

Morelia, Michoacán, México.

Oviedo, Juan Andrés y Duque, María del Pilar (2006)

Sistemas de control de respuesta sísmica en edificaciones.

Revista EIA, ISSN 1794-1237. Número 6. P.p. 105-120.

Medellín, Colombia.

Ozdemir, H. (1976)

Nonlinear transient dynamic analysis of yielding structures.

PhD dissertation, University of California, Berkeley.

Symans, Charney, Whittaker, Constantinou, Kircher, Johnson y McNamara. (2008).

Energy Dissipation System for Seismic Applications: Current Practice and Recent Developments.

Journal of Structural Engineering © ASCE/ January 2008. EUA.

Villarreal, Castro y Oviedo Sarmiento, Ricardo. (2008)

Edificaciones con disipadores de energía.

Perú.

Whittaker, Andrew. (1993).

Code requirements for design and implementation of passive energy dissipation systems.

Earthquake Engineering Research Center. Report No UBC/EERC-89/02. EUA.