

EDIFICACIONES CON DISIPADORES DE ENERGIA

(LIBRO PREMIO NACIONAL ANR 2008)

Dr. Genner Villarreal Castro

PREMIO NACIONAL ANR 2006, 2007, 2008

M.Sc. Ricardo Oviedo Sarmiento

PREMIO NACIONAL ANR 2008

Lima – Perú

2009

En los últimos años los investigadores en el área de la mecánica estructural, han ido incrementando diversos cuidados, con la finalidad que los edificios sean diseñados acorde con los requerimientos mínimos de fuerza lateral de los códigos de diseño. Recientes sismos han mostrado que los edificios diseñados y contruidos de acuerdo a los códigos más recientes proveen una buena respuesta, pero el costo de reparación de daños y el tiempo necesario para implementar estas reparaciones son más grandes que las anticipadas. Diversos esfuerzos en Estados Unidos, Japón y Rusia, se han centrado en desarrollar criterios de diseño sísmico y procedimientos para asegurar objetivos específicos de desempeño. El incremento en las fuerzas de diseño no mejora todos los aspectos del desempeño. Tres técnicas innovadoras han sido propuestas para usarse individualmente o en combinación, con la finalidad de mejorar el desempeño sísmico de los edificios: aislamiento sísmico, dispositivos suplementarios de disipación de energía y control estructural activo o híbrido. Esta investigación está orientada a la metodología de cálculo de edificaciones con dispositivos pasivos de disipación de energía.

En la actualidad, dicho sistema constructivo se usa con mucha frecuencia en la práctica y se considera un campo abierto en la investigación sísmica, representando el presente trabajo un aporte importante en la actualización de los métodos de cálculo de edificaciones con dispositivos pasivos de disipación de energía.

En la presente investigación se realizó el análisis dinámico no-lineal de un edificio de concreto armado de 3 pisos, siendo utilizado como soporte informático el programa SAP2000 v.10.0.1. Para obtener las rotulas plásticas se han tomado las secciones de los elementos con sus áreas específicas de acero de refuerzo longitudinal. Las aceleraciones del registro sísmico fueron escaladas a 400 Gals.

Después de realizar el análisis dinámico lineal del edificio, el diseño de los disipadores fue hecho para obtener un amortiguamiento efectivo acorde con las distorsiones de los requerimientos de la Norma Peruana de Diseño Sismorresistente E030-2006. Luego, se procedió a realizar el análisis lineal del edificio con los disipadores no-lineales para obtener la respuesta con el amortiguamiento adicionado. Como resultado, se obtuvo, que con los disipadores se puede reducir la fuerza actuante en el edificio; también los desplazamientos, velocidades y aceleraciones de los entrepisos, y, finalmente, se obtuvo la influencia de los disipadores en la energía.

La presente investigación consta de una introducción, 4 capítulos, conclusiones y bibliografía.

En la introducción se fundamenta la actualidad del tema, se formula el objetivo y problemas de investigación, los aportes científicos y el valor práctico de la investigación.

En el primer capítulo, se analiza el estado del arte en sistemas avanzados de control de la respuesta dinámica. En una primera parte se describe en forma general los distintos sistemas avanzados de control estructural ante sismos y, en una segunda parte, se presentan los dispositivos pasivos de disipación de energía realizados hasta el momento.

En el segundo capítulo, se presenta una discusión más detallada del desempeño de los dispositivos pasivos y de los sistemas, con énfasis en el desarrollo de modelos matemáticos apropiados. Se presentan dos mecanismos, el primer mecanismo incorpora ambos, es decir, los dispositivos histeréticos y los dispositivos viscoelásticos. Incluidos en el primer grupo están los dispositivos que operan en los principios, tales como la fluencia de metales y los friccionantes por deslizamiento. El segundo grupo consiste de dispositivos que involucran deformación de sólidos viscoelásticos o fluidos y aquellos que emplean orificios para el paso de los fluidos.

En el tercer capítulo, se mencionan las características geométricas del modelo analítico y las propiedades de los materiales empleados en el análisis. También se describen las características de los elementos y las hipótesis adoptadas. Se presentan los resultados de los análisis dinámicos con comportamiento elástico de la estructura y con comportamiento inelástico de cada uno de los cuatro tipos de disipadores, y con la utilización de un registro sísmico peruano representativo. Luego con los resultados obtenidos se escoge el disipador con mejor comportamiento y se realiza un análisis inelástico de la estructura con el tipo de disipador escogido para tal fin.

En el cuarto capítulo se presentan los requerimientos generales para el diseño de los disipadores de energía. Se procede luego a seleccionar los criterios del desempeño estructural, diseñando dispositivos pasivos de disipación de energía a ser utilizados en el modelo. Luego se procede al análisis del modelo con la inclusión de los disipadores de energía diseñados para un determinado criterio de desempeño estructural. Finalmente, se presentan los resultados obtenidos realizando una comparación del comportamiento del modelo con y sin disipadores de energía.

En las conclusiones se discuten los resultados y las recomendaciones sobre el comportamiento estructural y los beneficios reportados por los disipadores de energía al sistema sismorresistente, así como la orientación de las futuras líneas de investigación.

La presente investigación está dirigida a ingenieros civiles, postgraduandos e investigadores en el área de Mecánica Estructural.

Dr. Genner Villarreal Castro
genner_vc@rambler.ru

M.Sc. Ricardo Oviedo Sarmiento
oviedos@ciplima.org.pe

Lima, Julio del 2009

INDICE

INTRODUCCION	06
 CAPITULO 1. ESTADO ACTUAL DEL PROBLEMA DE INVESTIGACION	
1.1. Diseño sismorresistente	10
1.2. Efecto del amortiguamiento viscoso en la respuesta dinámica	13
1.2.1. Movimientos del terreno impulsivo y sinusoidal	13
1.2.2. Movimientos sísmicos del terreno	17
1.3. Sistemas de control de la respuesta dinámica	22
1.3.1. Sistemas de control activo	24
1.3.2. Sistemas de control híbrido	26
1.3.2. Sistemas de control semiactivo	27
1.3.4. Sistemas de control pasivo	29
1.4. Dispositivos pasivos de disipación de energía	32
1.4.1. Disipadores histeréticos	32
1.4.2. Disipadores con comportamiento viscoelástico	40
1.5. Estructura con disipadores de energía vs. Estructura tradicional ...	43
1.5.1. Incremento significativo en el amortiguamiento	43
1.5.2. Amortiguamiento no proporcional	44
1.5.3. No-linealidades del dispositivo de disipación	44
 CAPITULO 2. MODELAMIENTO MATEMATICO	
2.1. Sistemas viscoelásticos	47
2.1.1. Disipadores viscoelásticos sólidos	47
2.1.2. Disipadores viscoelásticos de fluido	52
2.2. Sistemas histeréticos	58
2.2.1. Disipadores por plastificación de metales	59
2.2.2. Disipadores por fricción	67
2.3. Amortiguamiento y rigidez equivalente	72
 CAPITULO 3. ANALISIS SISMICO DE EDIFICACIONES CON DISIPADORES DE ENERGIA	
3.1. Objeto de investigación	74

3.2. Registro sísmico	77
3.3. Modelación del edificio por el programa SAP2000	78
3.4. Diseño de los dispositivos pasivos de disipación de energía	81
3.4.1. Disipadores viscoelásticos no-lineales	81
3.4.2. Disipadores viscoelásticos sólidos	82
3.4.3. Disipadores por fricción	83
3.4.4. Disipadores por plastificación de metales	83
3.5. Resultados de la investigación numérica	85
 CAPITULO 4. ANALISIS COMPARATIVO Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	
4.1. Análisis comparativo	90
4.1.1. Comparación Modelo disipadores viscosos no-lineales / Modelo sin disipadores	90
4.1.2. Comparación Modelo disipadores viscoelásticos / Modelo sin disipadores	90
4.1.3. Comparación Modelo disipadores por fricción / Modelo sin disipadores	91
4.1.4. Comparación Modelo disipadores por fluencia / Modelo sin disipadores	92
4.2. Distribución de energía	93
4.3. Formas de vibración	98
4.4. Discusión de resultados	104
4.5. Costo de estructura con disipadores vs. Costo de estructura tradicional	115
 CONCLUSIONES	117
 BIBLIOGRAFIA	120

INTRODUCCION

Históricamente el diseño sismorresistente de estructuras ha estado basado en una combinación de resistencia y ductilidad. Para pequeñas frecuencias sísmicas, se espera que la estructura permanezca en el rango elástico, con todos los esfuerzos bajo los niveles de fluencia. Asimismo, no es razonable esperar que una estructura tradicional responda elásticamente a un sismo muy raro. Se sabe, que el diseño utilizado por los ingenieros estructurales está basado en la ductilidad inherente de los edificios para prevenir fallas catastróficas, mientras que se acepta un determinado nivel de daño estructural y no estructural. Esta filosofía ha sido implementada en los códigos de diseño, ya sea en los métodos de diseño por fuerza lateral o diseño por espectro de respuesta. Últimamente con estas características la estructura es diseñada para resistir una carga estática equivalente, brindando resultados razonablemente satisfactorios.

Un número importante de avances para mejorar el desempeño en la respuesta sísmica y el control de daño en los edificios, puentes y otras estructuras han sido desarrolladas, y otras están por venir en el futuro cercano. Estos avances pueden estar divididos en tres grupos: *sistemas pasivos*, tales como aislamiento en la base y dispositivos suplementarios de disipación de energía; *sistemas activos*, los cuales requieren la participación activa de dispositivos mecánicos cuyas características están hechas para cambiar durante la respuesta sísmica basándose en medidas de respuesta; y *sistemas híbridos*, los cuales combinan los sistemas pasivos y activos en una manera tal que la seguridad del edificio no esté comprometida incluso si el sistema activo fallase.

En la actualidad, la técnica de aislamiento sísmico es ampliamente usada en el mundo. Un sistema de aislamiento sísmico es típicamente ubicado en la cimentación de la estructura. Debido a su flexibilidad y capacidad de absorción de energía, el sistema de aislamiento parcialmente absorbe la energía sísmica de entrada antes que esta energía sea transmitida a la estructura. El efecto es una reducción de la demanda de la disipación de energía en el sistema estructural, mejorando su desempeño.

Además, los sistemas de control activo y semi-activo son áreas de protección estructural, en la cual el movimiento de una estructura es controlado o modificado por la acción de un sistema de control con suministro de energía externa. Los sistemas semi-activos requieren solamente cantidades nominales de energía para ajustar sus propiedades mecánicas y a diferencia de los sistemas activos estos no pueden adicionar energía a la estructura. Una atención importante ha recibido el desarrollo de estos sistemas, especialmente en la mejora de la respuesta sísmica y de viento en los edificios. Esta tecnología actualmente, ha sido diseñada, construida e instalada en varios edificios del mundo.

Todas estas tecnologías presentan un incremento en el rol importante que juegan en el diseño estructural, es por ello, que la presente investigación está orientada a los sistemas pasivos de disipación de energía en edificios, pudiendo ampliarse para puentes y otros tipos de estructuras, ya que los principios básicos de trabajo son los mismos.

Las investigaciones y desarrollo de los dispositivos pasivos de disipación de energía para aplicaciones estructurales tienen aproximadamente 25 años de historia. La función básica de los dispositivos pasivos de disipación de energía cuando son incorporados a la superestructura de un edificio es la de absorber una parte de la energía de entrada, para de esta manera reducir la demanda de disipación de energía en los miembros primarios estructurales y minimizar el posible daño estructural. Estos dispositivos pueden ser muy efectivos contra los movimientos inducidos por los vientos, así como también aquellos inducidos por los sismos. Contrariamente a los sistemas activos, los sistemas pasivos no requieren de suministro externo de energía eléctrica.

En los últimos años, serios esfuerzos se han realizado para desarrollar el concepto de disipación de energía o amortiguamiento suplementario dentro de una tecnología trabajable, y un número de estos dispositivos han sido instalados en estructuras en varias partes del mundo.

Actualidad de la investigación

El Perú es un país altamente sísmico y según la clasificación mundial le corresponde 9 grados en la escala Mercalli Modificada. Cerca de 18 millones de peruanos viven en zonas sísmicas y están expuestos a las constantes amenazas de ocurrencias de sismos. Cabe indicar, que en investigaciones sísmicas, aún están lejos de poder resolver el peligro sísmico, el cual se incrementa y al que están expuestos cotidianamente.

Las construcciones en zonas sísmicas se incrementan a diario en nuestro país. En consecuencia, la seguridad estructural tiene un valor importante en el desarrollo nacional. La reducción de los costos, con la consecuente seguridad de las obras en zonas sísmicas es el problema central de la construcción en nuestro país. La razón fundamental en la solución de este problema es la elaboración de metodologías de cálculo sísmico de edificaciones con dispositivos pasivos de disipación de energía.

La disipación de energía se refleja en los períodos, frecuencias y formas de vibración libre de las estructuras, que a su vez influyen en la magnitud de las fuerzas sísmicas. En general, este problema se ha investigado en forma insuficiente y, por lo tanto, es un campo abierto para los investigadores.

Objetivo y problemas de investigación

El objetivo de la presente investigación es la elaboración de una metodología de uso y aplicación de los dispositivos pasivos de disipación de energía en edificios en zonas sísmicas.

Partiendo del objetivo planteado, se resolvieron los siguientes problemas:

1. Análisis de los dispositivos pasivos de disipación de energía en edificaciones.
2. Análisis y elección de los tipos de disipadores de energía para edificaciones en zonas sísmicas.
3. Elaboración de la metodología de modelación de edificaciones con dispositivos pasivos de disipación de energía, ante la acción sísmica y con el uso de programas informáticos basados en el método de elementos finitos.
4. Ejecución de los cálculos de edificios con los diferentes tipos de disipadores de energía, de acuerdo al análisis tiempo-historia bajo la acción de un acelerograma real e intenso en la historia nacional.
5. Comparación de los resultados obtenidos y la elaboración de las recomendaciones para el cálculo sísmico del edificio investigado, donde se consideró el efecto de disipación de energía.

Aporte científico

El aporte científico consiste en lo siguiente:

1. En base al análisis de la bibliografía estudiada, se eligieron los dispositivos pasivos de disipación de energía más adecuados para edificaciones en zonas sísmicas.
2. Se diseñó cada tipo de disipador de energía, a ser incorporado en la estructura.
3. Se elaboró la metodología de modelación de la edificación con dispositivos pasivos de disipación de energía, ante la acción sísmica en condiciones reales del Perú, documentos normativos y con el uso del programa SAP2000.
4. Se obtuvieron los resultados del cálculo de la edificación con los diferentes tipos de disipadores de energía.
5. Se realizó la comparación del edificio con disipadores de energía versus el mismo edificio sin disipadores, por medio del análisis tiempo-historia y a través de un acelerograma real e intenso en la historia nacional.
6. Se analizó y estudió el comportamiento de cada tipo de disipador de energía, con la finalidad de elegir el más adecuado para edificios peruanos.
7. Se realizó un análisis comparativo de costos entre una edificación con disipadores de energía y la misma edificación con esquema tradicional.
8. Se mostró la ventaja del uso de disipadores de energía en la reducción de la vulnerabilidad sísmica de edificaciones.

Argumentación y veracidad de resultados

Se fundamenta en la aplicación del método de elementos finitos para el cálculo sísmico de edificaciones, así como el uso del programa SAP2000, que cuenta con respaldo internacional en obras y proyectos de gran envergadura.

Valor práctico de la investigación

El valor práctico de la presente investigación, consiste en la posibilidad de la aplicación directa de la metodología elaborada para el cálculo sísmico de edificaciones aporticadas con dispositivos pasivos de disipación de energía.

Además, debido al insuficiente desarrollo de los métodos de cálculo en nuestro país, la presente investigación puede servir como manual práctico para los ingenieros e investigadores en esta área.

Aprobación de la investigación

Fue aprobado en el XIV Congreso Nacional de Ingeniería Civil (Ayacucho, 2005); XIX Simposio Internacional “Últimos avances en la Ingeniería Sísmica y Gestión del Riesgo de los Desastres” (CISMID-UNI, 2005); II Congreso Internacional de Ingeniería Estructural, Sísmica y Puentes (Lima, 2006); Jornadas Iberoamericanas sobre Predicción de la Vida Útil de las Estructuras de Hormigón (AECI-Bolivia, 2006); 7mo Simposio Internacional de Estructuras, Geotecnia y Materiales de Construcción (Villa Clara-Cuba, 2006); III Congreso Internacional de la Construcción (Lima, 2006); XIV Encuentro Científico Internacional de verano (Lima, 2007); Conferencia Internacional de Ingeniería Sísmica (CISMID-UNI, 2007) y XV Congreso Nacional de Ingeniería Civil (Arequipa, 2007).

CAPITULO 1

ESTADO ACTUAL DEL PROBLEMA DE INVESTIGACION

1.1 DISEÑO SISMORRESISTENTE

En el diseño sismorresistente convencional, el desempeño aceptable de una estructura durante un evento sísmico está basado en que el sistema resistente de fuerza lateral sea capaz de absorber y disipar energía de una manera estable por un largo número de ciclos. La disipación de energía ocurre en regiones de rótulas plásticas dúctiles espacialmente detalladas en las vigas y en las columnas, las cuales también forman parte del sistema de carga por gravedad. Las rótulas plásticas son regiones de daño concentrado del pórtico de gravedad, el cual frecuentemente es irreparable. Estas características de diseño son aceptables por sus consideraciones económicas, por supuesto, que el colapso estructural es prevenido y que la seguridad de la vida de las personas está asegurada.

Existen situaciones en donde las características del diseño convencional no son aplicables. Cuando una estructura debe permanecer funcional después de un sismo, como es el caso de estructuras importantes (hospitales, estaciones de policía, etc.), el diseño convencional es inapropiado. Para estos casos la estructura puede ser diseñada con suficiente resistencia para que la acción inelástica sea prevenida o sea mínima; lo que resulta bastante costoso. En algunas estructuras, precauciones especiales necesitan ser tomadas en salvaguarda del daño importante o la falla de sistemas importantes, los cuales son necesarios para la continuidad de la serviciabilidad. La experiencia reciente con dos de las instalaciones más nuevas de hospitales en el sismo de Northridge (Instituto de Investigación de Ingeniería Sísmica, 1995) demostró problemas que pueden ocurrir con un determinado diseño.

Existe un gran numero de estructuras antiguas que tienen insuficiente resistencia lateral y falta del detallado requerido necesario para un comportamiento dúctil. El reforzamiento sismorresistente de estas estructuras es necesario y debe ser conseguido con un diseño sísmico convencional, a pesar de que frecuentemente tiene un costo significativo y un desagradable deterioro de las características arquitectónicas. Lo posterior es una consideración significativa en el reforzamiento sismorresistente de estructuras históricas con importantes características arquitectónicas.

Procedimientos de diseño alternativo han sido desarrollados con incorporación de sistemas de protección sismorresistente en la estructura, estos sistemas pueden tomar la forma de sistemas de aislamiento sísmico o dispositivos suplementarios de disipación de energía. Un análisis al comportamiento y efectos de estos sistemas puede comenzar con la consideración de la distribución de la energía en la estructura. Durante un evento sísmico, una cantidad finita de energía entra a la estructura. Esta energía de entrada es

transformada en energía cinética y energía potencial (deformación), las cuales deben ser absorbidas o disipadas a través del calor. Si no hubiese amortiguamiento, las vibraciones podrían existir por todo el tiempo. Por otro lado, siempre existe algún nivel de amortiguación inherente la cual absorbe parte de la energía de entrada y reduce la amplitud de vibración hasta que el movimiento cese. El desempeño estructural puede ser mejorado si una porción de la energía de entrada puede ser absorbida, no por la estructura misma, pero si por algún tipo de dispositivo suplementario. Esto se muestra claramente en la relación de la conservación de la energía:

$$E = E_k + E_s + E_h + E_d \quad (1.1)$$

Donde:

E - energía de entrada del movimiento sísmico.

E_k - energía cinética.

E_s - energía de deformación elástica recuperable.

E_h - energía irrecuperable, disipada por el sistema estructural a través de la inelasticidad u otras formas de acción.

E_d - energía disipada por los dispositivos de amortiguamientos suplementarios.

La energía de entrada E , representa el trabajo hecho por la fuerza de corte total en la cimentación debido al desplazamiento del terreno y contiene el efecto de las fuerzas de inercia de la estructura.

En el diseño convencional, el desempeño estructural aceptable esta acompañado de la ocurrencia de deformaciones inelásticas. Este tiene el efecto directo de incrementar la energía E_h y también tiene un efecto indirecto. La ocurrencia de deformaciones inelásticas resulta en el sistema estructural, el cual modifica la energía de entrada. En efecto, el incremento de la flexibilidad actúa como un filtro, el cual refleja una porción de la energía sísmica. El resultado significativo es que tiende a reducir la aceleración y reduce las deformaciones en regiones alejadas de las rótulas plásticas.

La técnica de aislamiento sísmico presenta características similares debido a la introducción en la cimentación de la estructura, de un sistema el cual es caracterizado por la capacidad de flexibilidad y absorción de energía. La flexibilidad sola, típicamente expresada por un período del orden de 2 segundos, es suficiente para reflejar una mayor porción de la energía sísmica para que la acción inelástica no ocurra. La disipación de energía en el sistema de aislamiento de base es útil y limitada a la respuesta de desplazamiento y a evitar las resonancias. Por otro lado, los sismos con gran cantidad de períodos largos, no son posibles de proveer suficiente flexibilidad para la reflexión de la energía sísmica. En este caso, la absorción de energía juega un papel importante.

Los modernos sistemas de aislamiento sísmico incorporan mecanismos de disipación de energía. Como ejemplos se tienen sistemas elastoméricos de gran amortiguamiento, disipadores de acero, disipadores de fluido viscoso y disipadores por fricción, trabajando en conjunto con los sistemas de aislamiento de base.

En el mejoramiento en el desempeño de la respuesta sísmica y el control de daño, los sistemas suplementarios de disipación de energía trabajan muy bien. En estos sistemas, dispositivos mecánicos son incorporados en el pórtico de la estructura y disipa energía a lo largo de toda la altura de la estructura. Esto significa que la energía es disipada por fluencia de metales, fricción por deslizamiento, movimiento de un pistón o un plato con fluido viscoso, fluido a través de un orificio o la acción viscoelástica en materiales poliméricos.

Adicionalmente al incremento de la capacidad de disipación de energía por unidad de desplazamiento de una estructura, algunos sistemas de disipación de energía también incrementan la resistencia y rigidez. En estos sistemas están incluidos los siguientes tipos de dispositivos de disipación de energía: fluencia de metales, fricción y viscoelásticos. Los sistemas de disipación de energía llamados disipadores de fluido viscoso no incrementan la resistencia o rigidez de una estructura a menos que la frecuencia de excitación sea muy alta, por ejemplo en la figura 1.1 se muestran las curvas fuerza-deformación de una estructura simple de un nivel con y sin Sistemas de Disipación de Energía (SDE). Las curvas son mostradas hasta entrar al rango inelástico, como se espera sea el caso en las aplicaciones de peligro sísmico y mitigación.

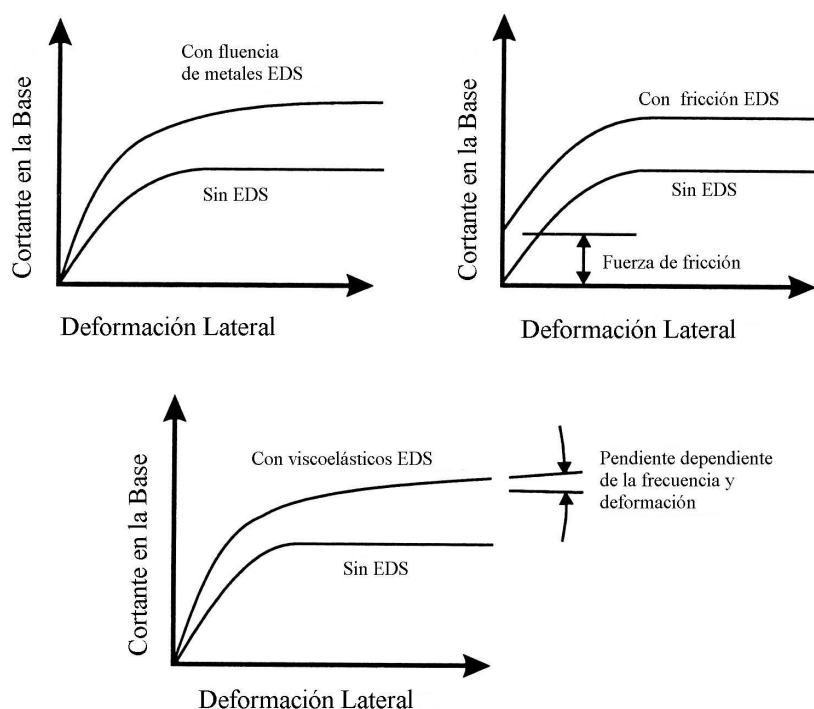


Fig. 1.1 Efectos de los sistemas de disipación de energía en las curvas fuerza-deformación de una estructura

La adición de sistemas de disipación de energía incrementa la resistencia y/o rigidez de la estructura. En general, la adición de un sistema de disipación de energía resultará en una reducción de la distorsión y, una reducción del daño (debido a la disipación de energía) y un incremento en la fuerza lateral total en la estructura (debido al incremento de la resistencia y/o rigidez).

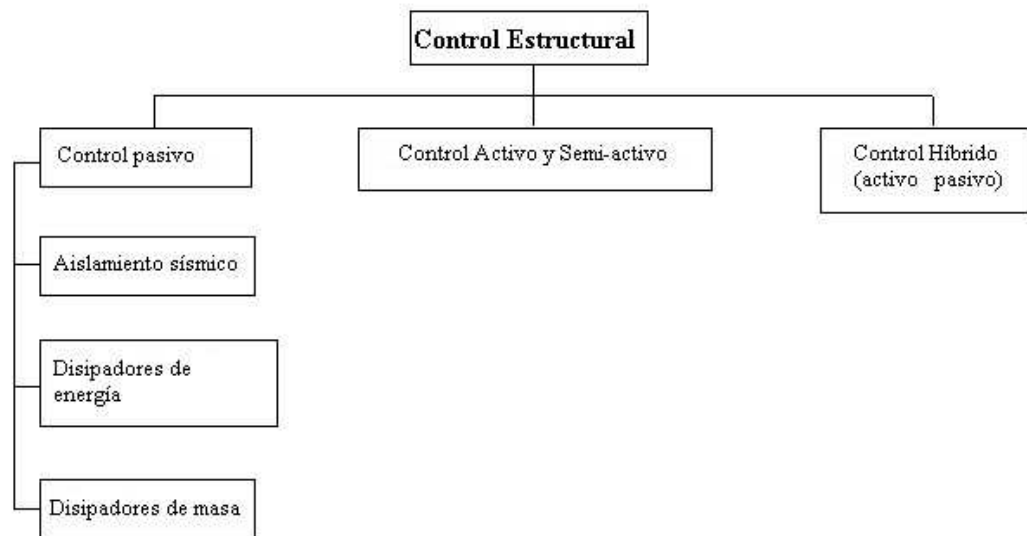


Fig. 1.2 Sistemas de control estructural

1.2 EFECTO DEL AMORTIGUAMIENTO VISCOSO EN LA RESPUESTA DINAMICA

Cuando son incorporados los disipadores en una estructura, estos disipan la energía inducida por los sismos y pueden adicionar rigidez y resistencia a la estructura. Como una introducción a sus principios de trabajo, la respuesta de un sistema dinámico simple de una masa con amortiguamiento viscoso suplementario es revisada, primero para el estado armónico, impulsivo, y larga duración y registros de movimiento sísmico de campo cercano. Después, son discutidas las consideraciones involucradas de sistemas de un grado de libertad (1 GDL), extendidas a edificios de varios niveles. Con esta información, el diseñador puede seleccionar las características del sistema suplementario de disipación de energía que pueda tener el más grande potencial para mejorar el desempeño sísmico a un nivel deseado.

1.2.1 MOVIMIENTOS DEL TERRENO IMPULSIVO Y SINUSOIDAL

La presencia de algún amortiguamiento (disipación de energía) en edificios convencionales ha sido reconocida y aceptada en la práctica por científicos e ingenieros. A pesar que la naturaleza de la disipación de energía inherente en los edificios no ha sido explícitamente identificada, el amortiguamiento viscoso inherente equivalente de alrededor del 2-5% del amortiguamiento crítico ha sido

aceptado en la práctica para el análisis de la respuesta lineal de edificios típicos. Por otra parte, la mayoría de los espectros de diseño desarrollados asumen el 5% del amortiguamiento viscoso crítico en el sistema. Asimismo, la adición de disipadores puede sustancialmente incrementar el amortiguamiento. En lo sucesivo, se resumirán los diferentes puntos de vista de los efectos del amortiguamiento en los sistemas de edificios; cuyo comportamiento lineal del sistema es asumido.

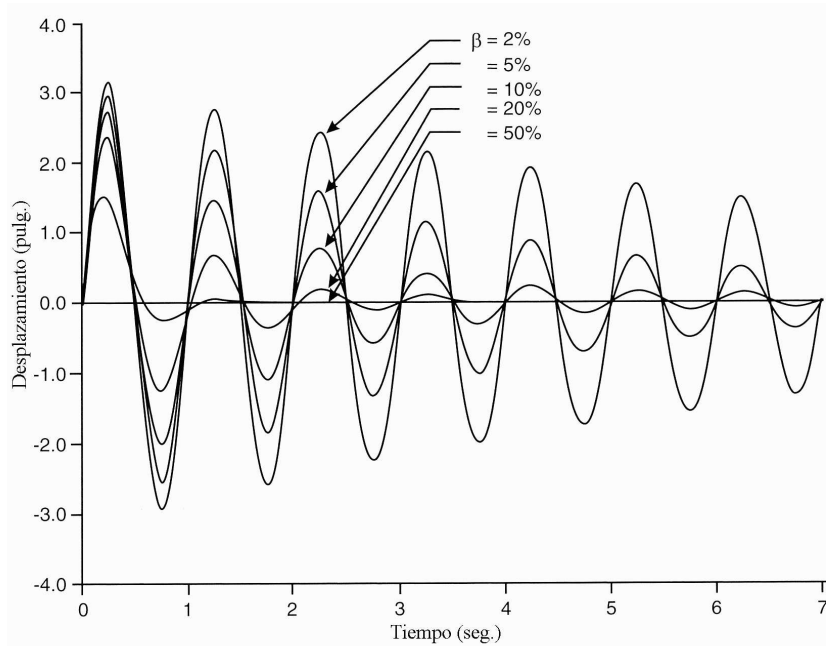


Fig. 1.3 Vibración libre – velocidad inicial

Analizamos un sistema de 1GDL que tiene inicialmente menos del amortiguamiento viscoso crítico, cuando el sistema está en reposo. Entonces este sistema está sujeto a un movimiento del terreno impulsivo que crea una velocidad inicial, tanto como una aceleración sísmica de un pulso. La resultante de la vibración libre de la estructura es mostrada en la figura 1.3 para 2%, 5%, 10% y 50% del amortiguamiento viscoso crítico. Dos efectos primarios del incremento del amortiguamiento son visualizados. Primero, la amplitud inicial de la respuesta estructural decrece con el incremento del amortiguamiento, de alrededor de 3" con 5% de amortiguamiento a menos de 1" para 50% de amortiguamiento. Segundo, el número de ciclos para reducir la amplitud inicial a la mitad de esa amplitud cambia de alrededor de 6 ciclos para 2% de amortiguamiento, a 2 ciclos para 5% de amortiguamiento, a 1 ciclo para 10% de amortiguamiento, y alrededor de $\frac{1}{2}$ ciclo para 20% de amortiguamiento. Cuando el movimiento sísmico del terreno son series de pulsos individuales, la respuesta del edificio a la serie de pulsos puede ser solamente una sumatoria de los movimientos de cada pulso, como se muestra en la figura 1.3, ajustado en el tiempo al tiempo cuando el pulso ocurrió. Se puede

concluir fácilmente que la respuesta de sistemas más amortiguados será más pequeña en comparación a los sistemas menos amortiguados, porque las amplitudes iniciales son más pequeñas, y las respuestas decaen rápidamente.

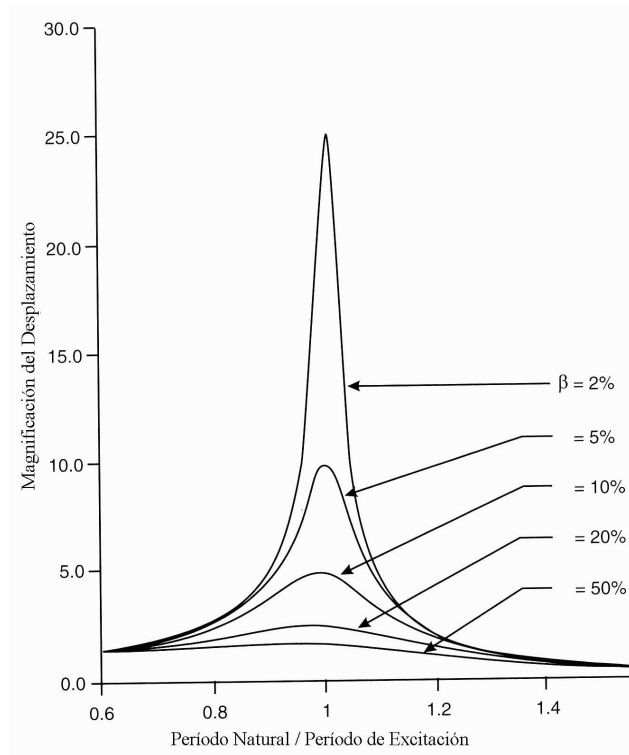


Fig. 1.4 Aceleración sinusoidal del terreno

Después, considere la respuesta del estado armónico de un sistema de 1GDL sujeto a una aceleración sinusoidal del terreno. Tradicionalmente para una fácil comparación la respuesta a una entrada sinusoidal es normalizada por su respuesta estática y su frecuencia natural no amortiguada. La magnificación del desplazamiento es definida como el desplazamiento de la estructura relativa al terreno, dividida por el desplazamiento estático de la estructura sujeta a una fuerza igual a la masa de la estructura, multiplicada por la máxima aceleración del terreno. El radio del período natural no amortiguado de la estructura al período de la excitación sinusoidal es la otra condición de normalización. El resultado es mostrado en la figura 1.4 para diferentes porcentajes de amortiguamiento viscoso crítico. Se puede observar que el incremento del amortiguamiento significativamente reduce el desplazamiento dinámico de la respuesta del sistema cuando el período de excitación está cerca al mismo período natural del sistema. Como el radio del período se incrementa o decrece de la unidad, el incremento en el amortiguamiento causa pequeños cambios en las respuestas del desplazamiento, el amortiguamiento es menos efectivo. Cuando el radio del período es alrededor de 0,8 a 1,2; el incremento del amortiguamiento de 5% a 50% reduce el desplazamiento alrededor

de 20%, en comparación al 80% a un radio del período de 1. Si los períodos del sistema no están cercanos a los períodos esperados de los movimientos de entrada, entonces el amortiguamiento viscoso adicional no afectará significativamente la respuesta.

Movimientos sísmicos del terreno en el campo cercano en la dirección normal de la falla pueden ser descritas como movimientos de tipo impulsivos. Considere una representación del movimiento del terreno normal a una falla cercana como una aceleración del terreno sinusoidal de medio ciclo. La magnificación máxima del desplazamiento relativo de la estructura es mostrada en la figura 1.5 (Ayre, 1961). Después que el pulso termina, el movimiento decrece, como en vibración libre. Las características generales de los resultados de estas respuestas impulsivas son algo similares a los resultados de pulso con velocidad inicial en la figura 1.3. La magnificación del desplazamiento máximo ocurre a un pulso de medio ciclo con una duración de alrededor de $\frac{3}{4}$ del período natural. Las magnificaciones del desplazamiento se vuelven pequeñas con el incremento del amortiguamiento; existiendo menos cambio que para un estado de respuesta armónica, pero el cambio es similar a los resultados de pulso con velocidad inicial. Los máximos rangos de magnificación de momentos varían desde 1,7 para $\beta = 1\%$ a 1,1 para $\beta = 50\%$.

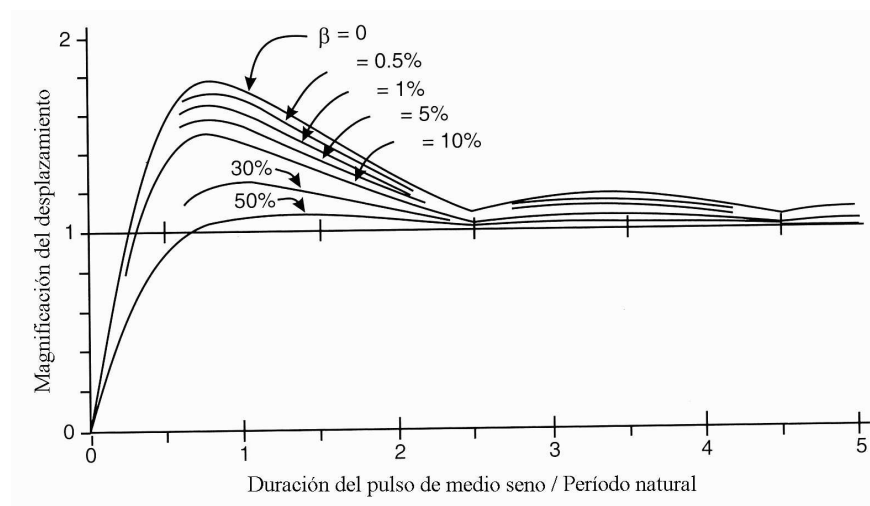


Fig. 1.5 Aceleración de pulso de medio seno del terreno

En resumen, el amortiguamiento viscoso suplementario es efectivo para todos los períodos con pulsos con velocidad inicial y a través de un amplio rango de períodos para aceleraciones del terreno con pulsos sinusoidales de medio ciclo. Bajo las condiciones de entrada de estado sinusoidal, la magnificación dinámica cerca de la resonancia es más larga que para los dos casos de entradas impulsivas. Asimismo, el amortiguamiento tiene un efecto más grande en la reducción de estas

respuestas resonantes. En todos los casos, un incremento en el amortiguamiento reduce la magnificación del desplazamiento dinámico de la respuesta.

1.2.2 MOVIMIENTOS SISMICOS DEL TERRENO

Las características de los movimientos sísmicos del terreno pueden variar de aquellos cercanos a las entradas sinusoidales, tales como el sismo de México de 1985, o medios ciclos o ciclos completos de ondas seno, tales como el sismo de California de 1992. Su aceleración del espectro de respuesta (SA), espectro de respuesta de velocidad (SV), o espectro de respuesta de desplazamiento (SD) describe estas variaciones en las características del movimiento del terreno. Estos espectros son definidos, respectivamente, como la aceleración máxima absoluta de la masa, la velocidad máxima relativa de la masa y el desplazamiento máximo relativo de la masa como función del período natural de la estructura. Históricamente (Newmark and Hall, 1982), el máximo desplazamiento relativo entre la masa y su base fue computado desde un movimiento de aceleración registrada del terreno para diferentes períodos estructurales para obtener el desplazamiento espectral, SD. Los correspondientes valores de seudos-SA y seudos-SV fueron calculados por factores de períodos desde SD. Estos valores de seudo-SA y seudo-SV han sido mostrados razonablemente cercanos a los valores actuales de SA y SV cuando el amortiguamiento es pequeño (menos del 10%). Para amortiguamientos más grandes, esta relación matemática simple no trabaja tan bien, y el actual valor de SA siempre igualará o excederá el valor de la seudo-SA. Para ser consistente con la práctica actual, esta investigación toma la SA como el valor de la seudo-SA y SV como el valor de la seudo-SV, a menos que se indique algo diferente.

Los desplazamientos relativos son desconocidos como un parámetro clave para la estimación de los daños en los edificios. De otra parte, los desplazamientos espectrales, SD, son utilizados para ilustrar el efecto de la adición de los disipadores. Sin embargo, SA es también considerado acá porque los coeficientes de las fuerzas de diseño provistos en los modelos de los códigos fueron desarrollados utilizando las técnicas de seudo-SA.

Un número de estudios analíticos de sistemas elásticos e inelásticos y sistemas de 1GDL con cantidades variables de amortiguamiento han sido investigados y publicados. Wu (1987) mostró que las modificaciones en la respuesta dinámica causado por la acción inelástica estructural y las modificaciones causadas por el amortiguamiento viscoso adicional pueden ser separados en dos diferentes factores. El mostró que el simple producto de estos dos factores podría producir su efecto combinado. Los acelerogramas sísmicos en este estudio incluyeron registros

reales y artificiales de sismos típicos de campo lejano. En este estudio, el asumió que la ductilidad del sistema estructural permaneció constante cuando el amortiguamiento estaba variando y que el amortiguamiento fue mantenido constante cuando la ductilidad varía. De esta manera, la estricta interpretación de estos resultados podría verse como el incremento del amortiguamiento, debido a la reducción de su desplazamiento de fluencia mientras se mantiene su ductilidad. En la figura 1.6 se muestran los datos para la SA normalizada por la aceleración pico del terreno con varios niveles de amortiguamiento desde 10% hasta 50% a períodos de 0,1 segundo y 0,5 segundos. La ordenada provee información para la respuesta elástica del sistema. La relación simple regresiva puede ser expresada como:

Para $T = 0,1\text{seg.}$

$$\text{Factor de amplificación} = -0,349[\ln(0,0959\beta) + \ln(2,89\mu - 1,89)^{-0,244}]$$

Para $T = 0,5\text{seg.}$

$$\text{Factor de amplificación} = -0,547[\ln(0,417\beta) + \ln(1,822\mu - 0,822)^{-0,562}]$$

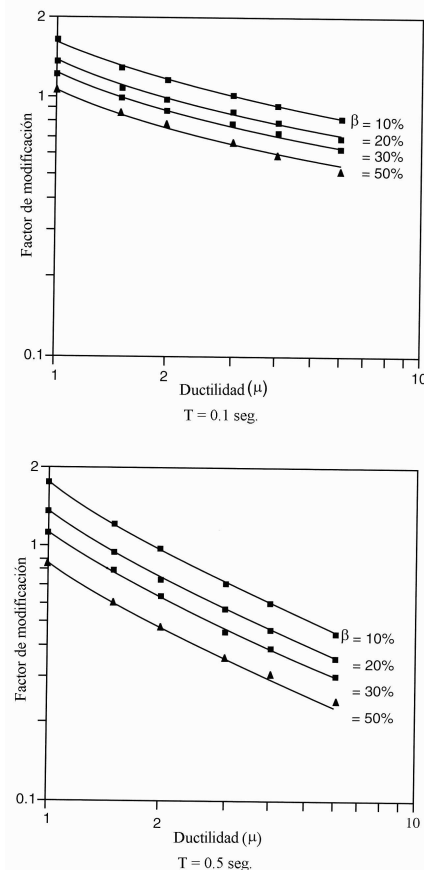


Fig. 1.6 Factores de codificación para seudo aceleración espectral

Donde:

$\ln$ - logaritmo natural

β - radio del amortiguamiento crítico.

T - período del edificio.

μ - ductilidad del sistema estructural elastoplástico (μ no es directamente comparable al valor de "R" utilizado en los códigos de diseño sismorresistente).

La información analítica (puntos) y las correspondientes ecuaciones de regresión (líneas) están dadas en la figura 1.6, para valores de radios de amortiguamiento de 10%, 20%, 30% y 50%. Resultados similares para la velocidad espectral normalizada por la velocidad pico del terreno son comparadas en la figura 1.7. De estos resulta:

$$\text{Factor de amplificación} = -0,417 \left[\ln(0,524\beta) + \ln(1,529\mu - 0,529) \right]^{-0,705}$$

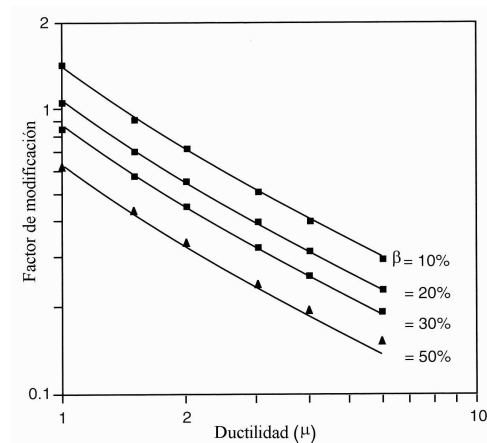


Fig. 1.7 Factores de modificación para pseudo velocidad espectral

Resultados similares para los desplazamientos espectrales normalizados por los desplazamientos picos del terreno a $T = 3\text{seg.}$ y a $T = 10\text{seg.}$, son mostrados en la figura 1.8. De estos resulta:

Para $T = 3\text{seg.}$

$$\text{Factor de amplificación} = -0,478 \left[\ln(0,475\beta) + \ln(1,0\mu) \right]^{-1,06}$$

Para $T = 10\text{seg.}$

$$\text{Factor de amplificación} = -0,291 \left[\ln(0,0473\beta) + \ln(1,0\mu) \right]^{-1,06}$$

Para un factor de ductilidad constante de 1 o más, el cambio en la respuesta estructural calculada por estas cinco ecuaciones de regresión, da los factores de modificación resumidos en la tabla 1.1. Estos valores son comparados con los valores sugeridos por otros autores. Es importante notar que estas ecuaciones de regresión de modificación de la respuesta incluyen la respuesta inelástica. Los

efectos de la respuesta inelástica puede ser similarmente establecida manteniendo el amortiguamiento constante y variando la ductilidad μ .

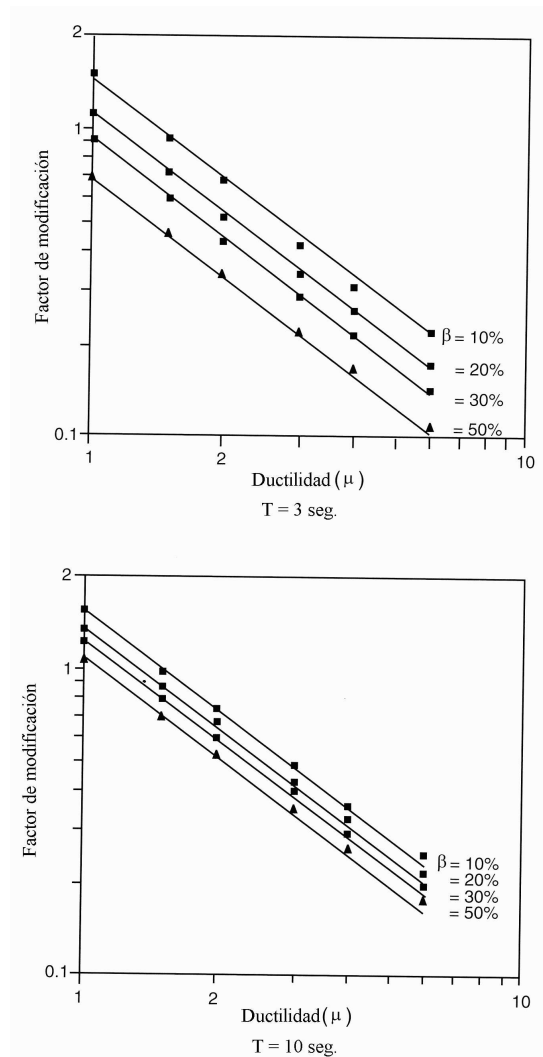


Fig. 1.8 Factores de modificación para desplazamiento espectral

Tabla 1.1

Factores de modificación como funciones de amortiguamiento viscoso
(Wu, 1987)

Radio de amortiguamiento	Período del edificio, T (seg.)				
	0,1	0,5	1,0	3,0	10,0
5	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
10	0,87	0,82	0,81	0,81	0,88
20	0,74	0,64	0,62	0,63	0,77
30	0,67	0,53	0,51	0,52	0,70
50	0,57	0,41	0,37	0,38	0,61

Tabla 1.2

Factores de modificación como funciones de amortiguamiento viscoso

Radio de amortiguamiento β (%)	FEMA 222A (1994)	FEMA 273 (1997a) $1/B_s$	FEMA 273 (1997a) $1/B_1$	FEMA 368 (2000) $1/B$
< 2	-	1,25	1,25	1,25
5	1,00	1,00	1,00	1,00
10	0,84	0,77	0,83	0,83
15	0,72	-	-	-
20	0,64	0,56	0,67	0,67
25	0,58	-	-	-
30	0,53	0,43	0,59	0,56
40	-	0,37	0,53	0,48
50	-	0,33	0,50	0,42
60	-	0,33	0,50	0,37
70	-	0,33	0,50	0,33
80	-	0,33	0,50	0,30
90	-	0,33	0,50	0,28
100	-	0,33	0,50	0,25

Otros investigadores usando diferentes filosofías y diferentes tipos de acelerogramas sísmicos han encontrado las mismas conclusiones generales acerca de la reducción de la respuesta espectral sísmica debido al incremento del amortiguamiento viscoso. El FEMA 222A (1994), incluye un apéndice al capítulo 2 que provee requerimientos mínimos de diseño para la incorporación de sistemas pasivos de disipación de energía. Los factores de reducción de los códigos para las fuerzas laterales a tomar en cuenta para el incremento del amortiguamiento en el edificio están dados en la tabla 1.2. El FEMA 273 (1997a) provee coeficientes para la reducción espectral como B_s y B_1 para los rangos de períodos espectrales abajo y sobre los 0,7 segundos. El FEMA 368 (2000) incluye un apéndice al capítulo 13, que provee una reducción permisible en los requerimientos mínimos de la fuerza de diseño para el amortiguamiento efectivo incrementado. Un coeficiente B que es constante bajo un período corto varía con el amortiguamiento. Estos valores fueron desarrollados con la inclusión de sismos con fallas normales en el campo cercano y se concluyó que los mismos factores de modificación de la respuesta pueden ser usados en los diseños para la mayoría de los sismos. Los valores $1/B_s$ y $1/B_1$ del

FEMA 273 y los valores 1/B del FEMA 368 aparecen en la tabla 1.2 para la comparación directa con los valores del FEMA 222A y los valores de la tabla 1.1.

Efecto de los sismos de campo cercano. Como parte del proyecto de pórticos de acero, Krawinkler y Seneviratna (1998) estudiaron un edificio de acero de tres niveles con pórticos de momento para el cual se utilizaron 20 registros sísmicos de campo cercano. Este estudio utilizó 2%, 5%, 10% y 20% de amortiguamiento viscoso. Una comparación de las respuestas medias para estos 20 registros sísmicos para los cuatro niveles de amortiguamiento normalizados a un valor de 1 al 5% de amortiguamiento, se muestran en la tabla 1.3. Se puede concluir que la variación entre los niveles de piso de la modificación de la respuesta producida por el amortiguamiento viscoso suplementario es pequeño y los valores de modificación mostrados en la tabla 1.3 son probados incluso para eventos de campo cercano. Es útil notar que los incrementos mayores al 30% del critico resultan en pequeñas disminuciones en la respuesta, tal como se puede apreciar en las tablas 1.1 y 1.2, y que estos incrementos, no necesariamente conllevan al uso económico de los disipadores.

Tabla 1.3

Comparación de la reducción de la distorsión media para un pórtico de acero de tres niveles como función del amortiguamiento viscoso
(Krawinkler y Seneviratna, 1998)

Radio de amortiguamiento β (%)	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3	Promedio
2	1,109	1,086	1,114	1,103
5	1,000	1,000	1,000	1,000
10	0,857	0,875	0,839	0,857
20	0,667	0,699	0,639	0,668

1.3 SISTEMAS DE CONTROL DE LA RESPUESTA DINAMICA

Cuando se diseñan la mayoría de los edificios y otras obras civiles, las acciones principales a considerar son aquellas debidas a los efectos gravitacionales. Estas cargas están siempre presentes y deben ser resistidas a través de toda la vida de la estructura. La magnitud de estas cargas puede ser rápidamente determinada basada en el peso propio y los requerimientos de ocupación. Despreciando la variación de estas cargas a través del tiempo, una idealización estática es considerada para el diseño de las estructuras. Esta

idealización grandemente simplifica el diseño estructural, y de alguna manera permitió a nuestros ancestros diseñar y construir estructuras antes de poseer un desarrollo racional de los principios científicos.

Por otra parte, cuando se trabaja con fuerzas laterales, existe una tendencia natural a manejar estas fuerzas con los mismos métodos utilizados para las cargas gravitacionales. Por ejemplo, los vientos y los sismos son frecuentemente idealizados como cargas estáticas “equivalentes” de determinada magnitud que deben ser resistidas por la estructura. Esto ha sentado las bases de varios códigos de diseño desde los inicios del siglo 20 y los resultados han sido bastante satisfactorios en varios casos. Asimismo, considerando las características de las cargas horizontales, importantes mejoras pueden ser hechas. Como resultado de este punto de vista dinámico, varias innovaciones para la protección estructural han sido propuestas. Una amplia gama de estrategias consideradas consisten en la incorporación de elementos externos a la estructura para mitigar su respuesta dinámica. La parte de la mecánica estructural que maneja estos conceptos es denominada **control estructural**.

El control estructural ante sollicitaciones sísmicas se está planteando como una alternativa al diseño sismorresistente convencional (figura 1.9). Los sistemas sismorresistentes avanzados tienen por objetivo el control de desplazamientos de una estructura haciendo uso de alguno de los siguientes recursos:

- Modificación de las propiedades dinámicas del edificio.
- Disipación de energía introducida al sistema a partir de dispositivos mecánicos.
- Control con dispositivos que ejerzan fuerzas que contrarresten la acción sísmica.

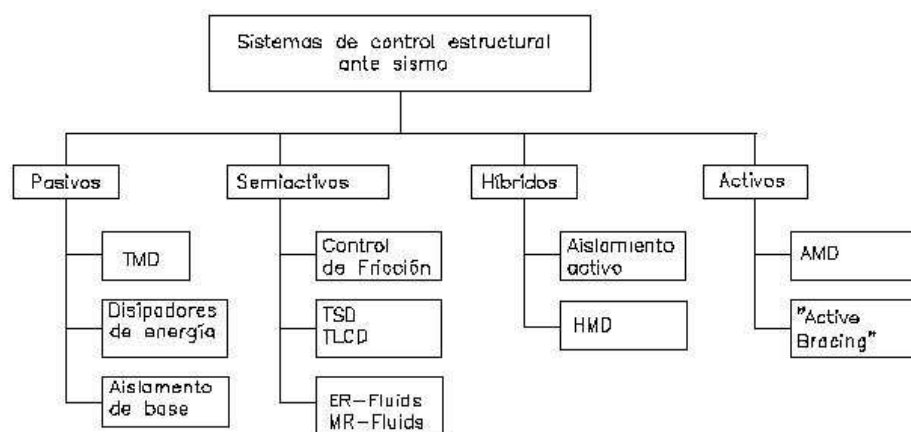


Fig. 1.9 Sistemas de control estructural ante sismos

Los sistemas de control pasivo se basan en elementos que responden de forma inercial a la acción sísmica y a diferencia del resto de sistemas no precisan de aporte energético para funcionar. Los sistemas activos, semiactivos e híbridos están formados por

actuadores de fuerza y/o elementos pasivos, controlador a tiempo real y dispositivos sensores instalados en la estructura.

Los sistemas pasivos se clasifican en sistemas de aislamiento de base, de disipación de energía y en osciladores resonantes. Los aisladores de base, situados sobre la cimentación y soportando al edificio, desacoplan parcialmente al edificio del suelo, disminuyendo la energía de entrada y por consiguiente su respuesta estructural. Los disipadores de energía no alteran la energía de entrada, que depende básicamente del período fundamental y de la masa del edificio, manifestando su eficiencia maximizando la energía disipada y disminuyendo la respuesta estructural. Los sistemas inerciales acoplados tales como el Tuned Mass Dampers (TMD) introducen masas adicionales, normalmente situadas en la parte alta de los edificios, cuya excitación absorbe parte de la energía cinética introducida por el sismo. Las propiedades más valiosas de los sistemas pasivos son su robustez, no dependen de fuentes de energía, son mecánicamente simples y su costo es competitivo. Existen actualmente cientos de edificios construidos en el mundo con estos sistemas.

Los sistemas activos contrarrestan directamente los efectos del sismo mediante actuadores. La gran demanda de energía que comporta su actuación ante un sismo severo y la complejidad de los algoritmos de control los convierte en sistemas poco robustos. Los sistemas híbridos y semiactivos nacen ante la necesidad de respuesta en una banda amplia de frecuencias y de menor consumo energético. Los sistemas híbridos son muy similares a los sistemas activos, sin embargo en ellos intervienen elementos pasivos que permiten reducir el consumo energético del sistema ante un sismo. Los sistemas semiactivos emplean dispositivos de control pasivo, sin consumo energético, cuyas características resistentes permiten ser modificadas y controladas a tiempo real mediante actuadores de bajo consumo a través de sistemas de control parecidos a los empleados en los sistemas activos e híbridos.

1.3.1 SISTEMAS DE CONTROL ACTIVO

Un sistema de control activo (figura 1.10) consiste en:

- a) Sensores situados en la propia estructura empleados para medir variables correspondientes a la excitación externa, o variables de la respuesta estructural, o de ambos tipos.
- b) Sistemas controladores que se basan en las medidas de los sensores y calculan la fuerza a aplicar por los actuadores para contrarrestar los efectos sísmicos.
- c) Actuadores que habitualmente son alimentados por fuentes de energía externa para ejercer fuerzas.



Fig. 1.10 Esquema de funcionamiento de un sistema de control activo

El Active Mass Damper (AMD), es un ejemplo de un sistema de control activo, el cual es una masa auxiliar móvil usualmente inferior al 1% de la masa total de la estructura y es instalada en una de las últimas plantas del edificio, con un actuador conectado a ella (figura 1.11). La fuerza inercial que presenta la masa oscilante debe contrarrestar los efectos de la acción sísmica y reducir la respuesta estructural a valores aceptables.

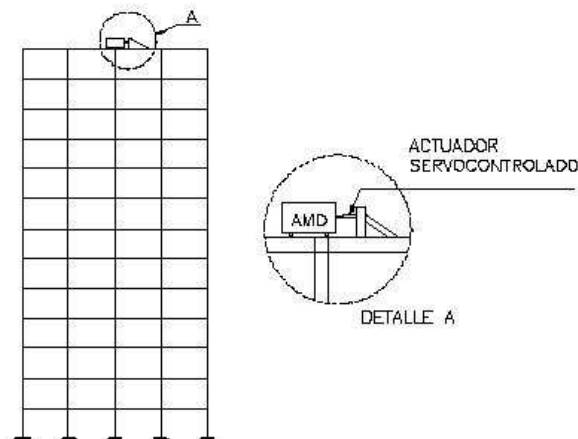


Fig. 1.11 Edificio con control de desplazamientos mediante AMD

En comparación con los sistemas pasivos, los sistemas activos presentan numerosas ventajas:

- Mayor efectividad en control de respuesta estructural.
- Afectividad menos sensible a las condiciones locales del suelo y a las características del sismo.
- Aplicación ante diversos eventos: viento o sismos.
- Selección de los objetos de control.

Esto permite enfatizar el confort humano sobre aspectos del movimiento estructural en momentos no críticos e incrementar la seguridad estructural ante una acción dinámica severa, pero también presenta serios inconvenientes, tales como:

- Elevado costo de mantenimiento.
- Dependencia respecto a las fuentes de alimentación.

- La respuesta dinámica de edificios con muchos grados de libertad y un posible comportamiento lineal resulta imprevisible.

Su control a partir de un número limitado de sensores y actuadores plantea un problema dinámico complejo.

1.3.2 SISTEMAS DE CONTROL HÍBRIDO

Los sistemas híbridos son la combinación de sistemas activos y los sistemas pasivos (figura 1.12). 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 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.

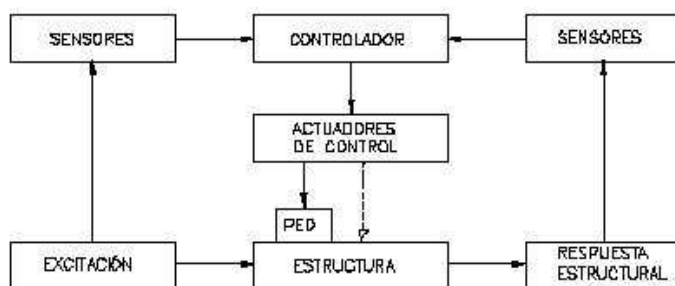


Fig. 1.12 Esquema de funcionamiento de un sistema de control híbrido

Los sistemas híbridos que han despertado mayor interés son el Hibrid Mass Damper (HMD) y el aislamiento de base con control activo del desplazamiento de base.

El HMD dispone de una masa oscilante pasiva que por si misma reduce la respuesta del edificio y de un actuador activo, el cual mejora la eficiencia del sistema y además le da una mayor robustez frente a cambios dinámicos que afectan a la estructura (figura 1.13).

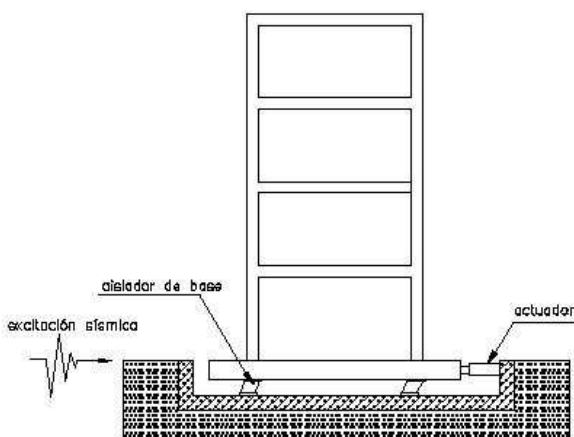


Fig. 1.13 Aislamiento de base con control activo de desplazamiento

El comportamiento pasivo desacopla parcialmente la estructura del terreno, producto de un desplazamiento significativo entre subestructura y superestructura. El objetivo del componente activo es controlar este movimiento mediante un actuador. Desde un punto de vista práctico, es importante que el control se consiga con una única fuerza y que la demanda energética de esta se encuentre dentro de los límites aceptables. Sin embargo, la evaluación de dicha fuerza de control tiene una cierta dificultad relacionada tanto con el comportamiento no lineal del aislamiento con las incertidumbres asociadas a la modelación del sistema global estructura-aislamiento y de la excitación.

1.3.3 SISTEMAS DE CONTROL SEMIACTIVO

Los sistemas semiactivos tienen un esquema de funcionamiento muy similar a los sistemas activos, diferenciándose de estos en que el control estructural se obtiene a partir de dispositivos de carácter reactivo, cuyas características mecánicas (rigidez o amortiguamiento) son controlables, lo cual permite modificar las propiedades dinámicas de la estructura con costos energéticos muy reducidos (figura 1.14).

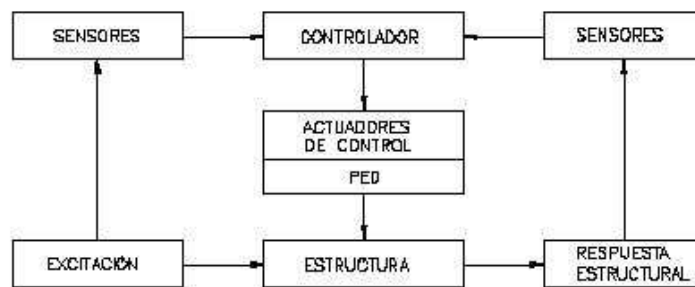


Fig. 1.14 Esquema de funcionamiento de un sistema de control semiactivo

Algunas de las técnicas de control empleadas por los sistemas semiactivos son:

- La fricción variable
- El movimiento de masas de líquido en el interior de tanques (Tuned Sloshing Dampers) o columnas dentro del edificio (Tuned Liquid Column Dampers).
- La incorporación de dispositivos hidráulicos de rigidez o amortiguamiento variable.
- Amortiguadores con fluidos de viscosidad controlable a partir de campos eléctricos o magnéticos.

En la figura 1.15, se muestra un dispositivo de amortiguamiento variable (Variable Hydraulic Damper), a través de una válvula de flujo variable, la cual permite modificar la pérdida de carga entre ambas cámaras de un cilindro hidráulico.

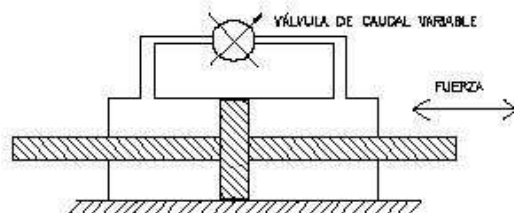


Fig. 1.15 Dispositivo para control semiactivo

Los líquidos controlables tienen la propiedad de variar sus características reológicas ante campos eléctricos o ante campos magnéticos. La característica esencial de estos líquidos es su reversibilidad de fluido con viscosidad lineal a estado semisólido en milisegundos, cuando están expuestos a un campo eléctrico o magnético. En la figura 1.16 se puede observar un dispositivo basado en el comportamiento de un fluido magnetoreológico. Se trata de un pistón de doble efecto, soportado por un eje con doble apoyo sobre la carcasa. El cilindro tiene la particularidad de formar parte de un circuito magnético. Entre pistón y cilindro se abre un paso entre ambas cámaras. El estado que presenta el fluido permite un desplazamiento restringido o relativamente libre, en función de que el campo magnético esté o no activado. Una posible integración del dispositivo en el seno estructural sería la que se indica en la figura 1.17.

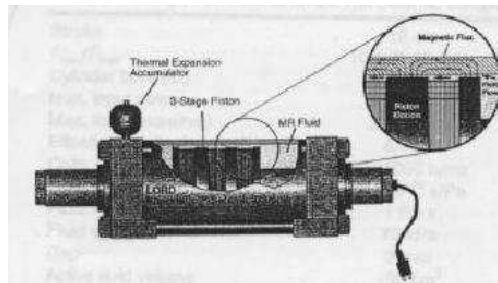


Fig. 1.16 Esquema de un amortiguador

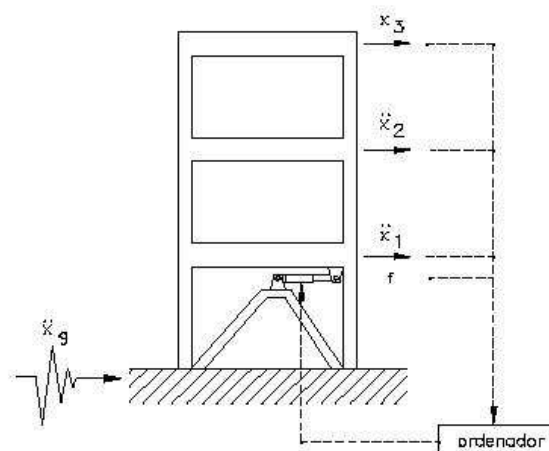


Fig. 1.17 Dispositivo para control semiactivo

1.3.4 SISTEMAS DE CONTROL PASIVO

Los dispositivos pasivos son elementos de carácter reactivo, cuya respuesta no es controlable y depende únicamente de las condiciones de trabajo en que se encuentran. Estos intervienen alterando las propiedades dinámicas del edificio y provocando una reducción de su respuesta estructural, teniendo ventajas económicas. Los sistemas de control pasivo se pueden clasificar en control pasivo con aislamiento en la base, control pasivo con sistemas inerciales acoplados y control pasivo con disipadores de energía.

a) CONTROL PASIVO CON AISLAMIENTO EN LA BASE

El aislamiento de la base es una estrategia de diseño que se fundamenta en el desacoplamiento de la estructura del movimiento del suelo, para proteger a esta del efecto de los sismos. Se consigue a partir de dispositivos flexibles al movimiento horizontal y rígido al desplazamiento vertical, ubicados entre los cimientos y la superestructura. Su presencia alarga el período fundamental, con lo cual desacopla de forma parcial la estructura del movimiento del terreno y limita la entrada de energía. Es reciente la introducción de amortiguamiento estructural para limitar los desplazamientos de la superestructura a valores aceptables.

El aislamiento de la base es más recomendable en estructuras rígidas sobre terrenos rígidos. El principal inconveniente que se presenta en estructuras con una elevada relación altura-ancho son los elevados momentos de volteo que pueden suponer la pérdida de equilibrio. Además, al incrementarse la altura las ventajas obtenidas al variar el período de vibración disminuyen.

Los aisladores de neopreno zunchado intercalan placas delgadas de acero en un bloque cúbico o cilindro de neopreno. Su rigidez vertical aumenta considerablemente, manteniendo su flexibilidad lateral. Estos dispositivos dotan de flexibilidad al edificio pero su capacidad disipativa resulta baja. Se han realizado pruebas con disipador de neopreno zunchado con núcleo de plomo (figura 1.18), logrando un aumento de la capacidad disipativa, que permite un mejor control en el desplazamiento de la base.

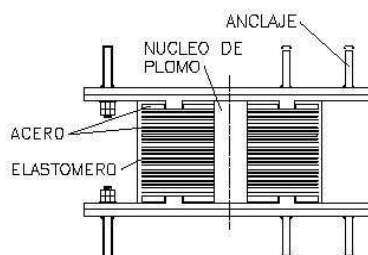


Fig. 1.18 Dispositivo de neopreno zunchado con núcleo de plomo

Un segundo grupo de aisladores de base corresponde a los de fricción. Estos trabajan de forma distinta a los aisladores de neopreno, al limitar la fuerza máxima transmitida a la estructura mediante el coeficiente de fricción (figura 1.19). Su principal ventaja es el costo y no tener prácticamente limitación en la carga vertical que puede transmitir. Un inconveniente es la modelación de la fricción a lo largo del tiempo y en función de la velocidad de deslizamiento y de la presión actuante.

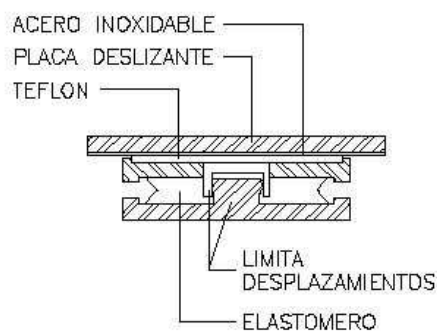


Fig. 1.19 Aislamiento de base de fricción

En la figura 1.20, se muestra un sistema de aislamiento basado en el movimiento pendular del edificio sobre las superficies cóncavas de los aisladores de base. El período del péndulo es convertido en modo de vibración fundamental de la estructura y depende solamente del radio de curvatura de la superficie deslizante del aislador. El aislador proporciona una rigidez relativa al desplazamiento lateral directamente proporcional al peso de la estructura e inversamente proporcional al radio de curvatura. Uno de los elementos de interés de este dispositivo es su capacidad de proporcionar períodos y desplazamientos largos manteniendo su capacidad portante de utilidad ante la presencia de sismos cercanos a la falla, caracterizados por pulsos largos.

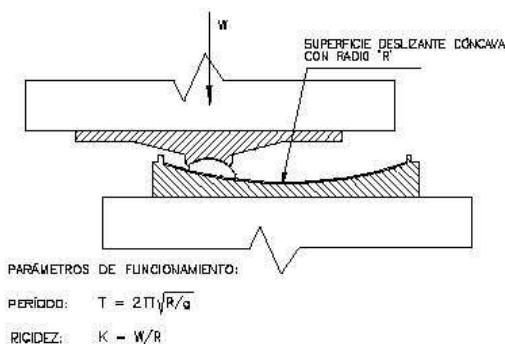


Fig. 1.20 Aislador pendular

b) CONTROL PASIVO CON SISTEMAS INERCIALES ACOPLADOS

El Tuned Mass Damper (TMD) (figura 1.21) consta de los siguientes componentes:

- Un oscilador de un grado de libertad.
- Un mecanismo de muelle.
- Un mecanismo de amortiguamiento.

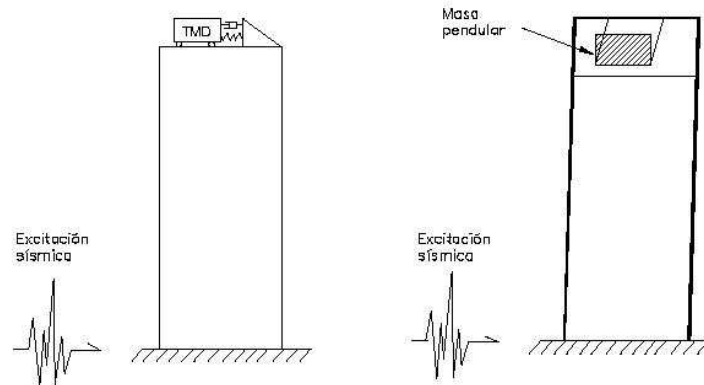


Fig. 1.21 TMD concepción clásica y con tanques de agua

Generalmente se instala en la parte superior de los edificios, y la masa y la rigidez del muelle se determinan de forma que la frecuencia de oscilación sea la misma que la frecuencia fundamental de la estructura.

El TMD también es efectivo para reducir la vibración del viento. La mayor desventaja es que requiere de una gran masa e importante disponibilidad de espacio para su instalación. Para compensar este problema recientemente se ha propuesto el uso de cubiertas con aislamiento respecto a la estructura inferior o tanques de agua para ser usados como masas pendulares (figura 1.21). Otro inconveniente del sistema es que su efectividad se reduce a una banda estrecha de frecuencias cercanas al período fundamental del edificio y pueden presentarse situaciones en las que el edificio se sitúe fuera de su período fundamental, como son los casos:

- En un edificio esbelto se pueden manifestar con distinta intensidad modos de vibración diferentes al fundamental, en función a las características de la excitación.
- Durante sismos severos la estructura puede llegar a comportarse plásticamente, alargando el período de la estructura y aportando una pérdida de sintonía con el TMD.

c) CONTROL PASIVO CON DISIPADORES DE ENERGIA

Los disipadores de energía se pueden clasificar en disipadores histeréticos y viscoelásticos.

Los dispositivos histeréticos dependen básicamente del desplazamiento y se basan en:

- La plastificación de metales por flexión, cortante o extrusión.
- Fricción entre superficies.

Los disipadores viscoelásticos dependen fundamentalmente de la velocidad y se basan en:

- Sólidos viscoelásticos.
- Fluidos conducidos a través de orificios.
- Fluidos viscoelásticos.

1.4 DISPOSITIVOS PASIVOS DE DISIPACION DE ENERGIA

1.4.1 DISIPADORES HISTERETICOS

a) DISIPADORES POR PLASTIFICACION DE METALES

La plastificación de metales en disipadores se puede producir a partir de esfuerzos estructurales o bien a partir del proceso de extrusión. Cualquier esfuerzo, sea de torsión, flexión, cortante o axial puede conducir a procesos de plastificación en metales. El acero ha sido sin duda el metal más empleado en disipadores. Entre sus virtudes están las posibilidades constructivas que ofrece, su bajo costo y su elevada ductilidad.

Existen resultados experimentales que indican que el acero ensayado bajo condiciones cuasiestáticas puede llegar a manifestar valores del límite de fluencia y de tensión máxima de rotura inferiores en un 17% y 3% respectivamente a los obtenidos con velocidades de deformación del 10%/s. Pese a estos resultados se han venido realizando estos ensayos. Probablemente, dada la alta variabilidad de la acción sísmica, y observado el buen comportamiento de los modelos adoptados basándose en la caracterización estática, la observación de una caracterización dinámica aumenta la complejidad del problema de forma desproporcionada.

Se concluye que para reducir la respuesta estructural, es preferible disipar energía a partir de rangos bajos de fuerza y desplazamiento. Es por eso que se han ensayado disipadores con aceros de bajo límite elástico y con gran capacidad de alargamiento en relación a los aceros de construcción convencionales y de determinadas aleaciones de aluminio. Estos disipadores se han basado en la plastificación por esfuerzo cortante, dando como resultado

dispositivos de elevada rigidez, esfuerzos de plastificación de valores reducidos y gran uniformidad en la distribución de la deformación plástica.

DISIPADORES POR FLEXION

Se han desarrollado numerosos dispositivos que plastifican debido a flexión. Se ha estudiado el comportamiento de dos placas en forma de U que disipan energía por flexión pura al enrollarse por efecto del desplazamiento relativo entre sus extremos (figura 1.22). Su comportamiento histerético se demostró muy estable.

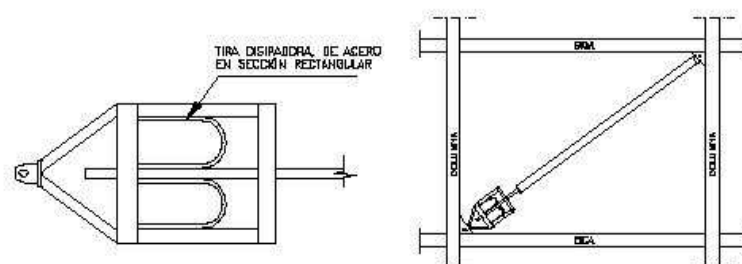


Fig. 1.22 Disipador por flexión

Uno de los disipadores más conocidos y estudiados es el conocido sistema con el nombre de ADAS (Added Camping And Stiffness), el cual es un dispositivo formado por un conjunto de chapas en paralelo, de espesor constante y sección variable en forma de X (figura 1.23). Este sistema frontalmente es similar a dos trapecios unidos por la base menor. El número frontal de chapas en paralelo resulta variable, permitiendo ajustar el disipador a las necesidades de la estructura a la cual se incorpora. Cada placa del dispositivo se encuentra impedida de 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.

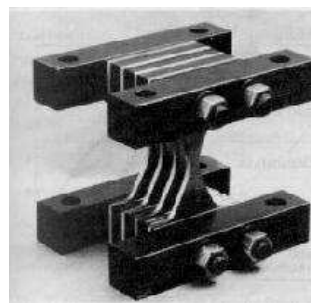


Fig. 1.23 Sistema ADAS

El ancho del dissipador 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. En la figura 1.24, se muestra su respuesta histerética en los primeros ciclos, manifestándose una notable flexibilidad en comportamiento elástico.

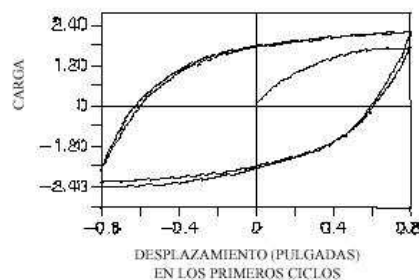


Fig. 1.24 Respuesta histerética ADAS en los primeros ciclos de carga

El dispositivo indicado en la figura 1.25 es conocido como el sistema TADAS. Al igual que el ADAS, está formado por un conjunto de placas trapecoidales de acero paralelas y de espesor constante. El hecho de que las placas se encuentren con un extremo empotrado y el otro articulado, condiciona la forma trapecoidal, que posibilita también una distribución global de la plastificación. La base menor de la placa se conecta al nivel de viga a una estructura aporticada, mientras que la otra se articula con una unión de bulón a dos contravientos dirigidos a la base de los pilares del pórtico. Con un desplazamiento relativo entre extremos de la placa perpendicular a su plano, se consigue la plastificación por flexión por curvatura simple. Al incorporar este sistema en un pórtico de acero a escala natural se ha observado que las reducciones en la respuesta son similares a las obtenidas con el ADAS.

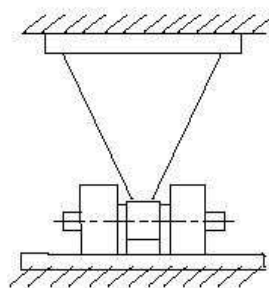


Fig. 1.25 Sistema TADAS

También se ha investigado el comportamiento de un dissipador construido en una placa de acero mecanizada con la geometría indicada en la figura 1.25. Debido a los espacios vacíos que deja entre dissipadores se le conoce

genéricamente como disipador de tipo panal, y se comercializa con el nombre de “Honeycomb” (figura 1.26). Su geometría tiene como objeto una plastificación lo más uniforme posible en la zona disipativa. Su comportamiento histerético (figura 1.27) es muy estable y de forma casi rectangular, con una respuesta más próxima a la rígida-plástica que es el caso del ADAS, la cual es mas flexible.

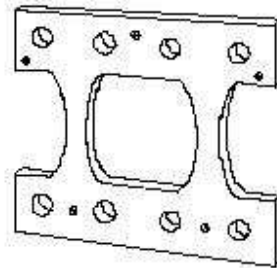


Fig. 1.26 Disipador Honeycomb

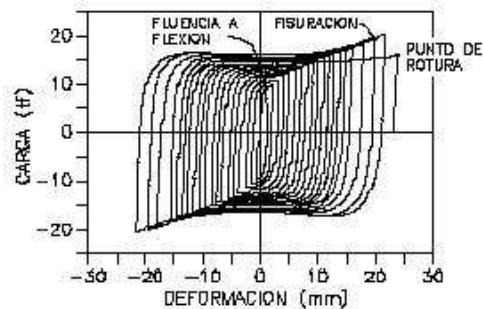


Fig. 1.27 Respuesta histerética

También se han desarrollado dos disipadores, uno establecido a partir de la flexión de pernos (figura 1.28) 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 de su capacidad última disipativa bajo la acción sísmica.

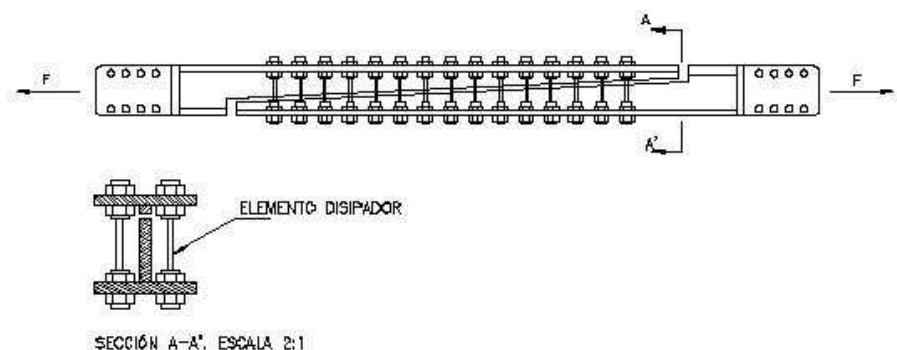


Fig. 1.28 Sistema DUR

DISPOSITIVOS A CORTANTE

El sistema estructural de los brazos excéntricos es el precursor de los disipadores a cortante. La mayoría de los disipadores adoptan una geometría similar: sección en doble T con alma rigidizada. Este sistema era de una gran ductilidad (la UBC97 considera a las estructuras que lo incorporan de máxima ductilidad), y que permitía ciclos histeréticos estables y de gran capacidad disipativa siempre que la rigidización fuera correcta. Se han establecido criterios simples para poder determinar la aparición de la abolladura en el alma del elemento, los cuales han sido posteriormente validados para dispositivos disipadores.

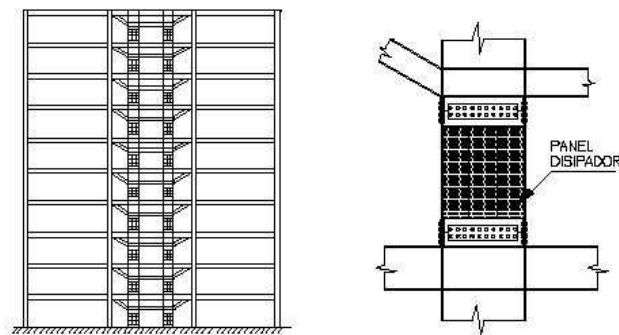


Fig. 1.29 Disposición de paneles de cortante

Los paneles de cortante son placas de acero rigidizadas (figura 1.30). Su estructura, con rigidizadores distanciados, obliga a espesores relativamente importantes para evitar el problema de la abolladura. Los aceros de alta ductilidad y bajo límite elástico (80MPa, 46-60 % de alargamiento) se muestran de gran interés para permitir espesores mayores a iguales esfuerzos cortantes, con una inferior necesidad de rigidización.

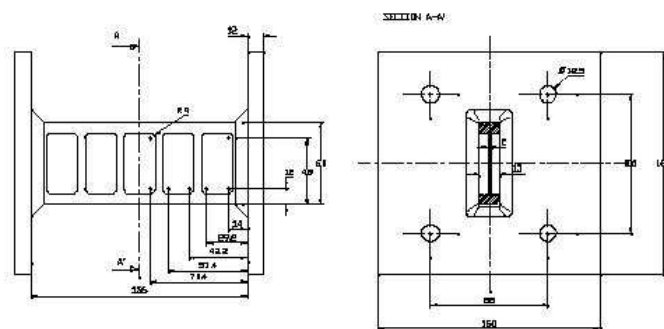


Fig. 1.30 Disipador por cortante con su cuerpo disipador (Cahis et al)

En 1997 se ensaya un diseño preliminar del disipador de cortante. Su cuerpo disipativo está construido a partir de un solo bloque de acero de construcción mecanizado por fresado, lo que permite 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 pequeño (0,5mm) y disipación de energía a partir de ciclos histeréticos estables.

En 1998 se analizó el comportamiento de un dispositivo de cortante con sección en doble T y alma rigidizada (figura 1.31), diseñado para actuar como nexo entre un pórtico y su arriostramiento en A. Su unión con los brazos de arriostramiento, mediante bulones, admite solo la acción horizontal, libre de momento y de acción vertical. Con ello se consigue desacoplar el sistema rígido del sistema flexible y reducir solicitaciones de montaje.

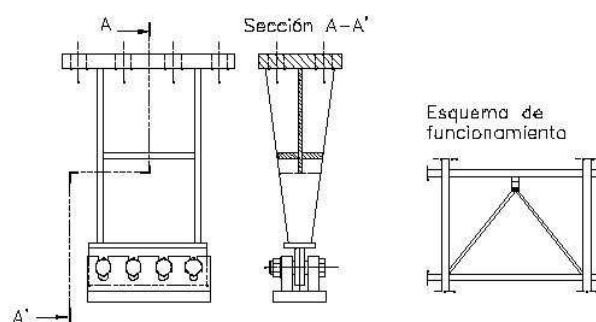


Fig. 1.31 Disipador por cortante (Tsai et al)

En 1998 se desarrolló un dispositivo (figura 1.32) a partir de placas soldadas de aluminio mediante procedimiento TIG. El disipador permite cargas de plastificación reducidas con espesores superiores a los necesarios con acero dúctil. Para evitar problemas de fragilidad, los rigidizadores del alma están únicamente soldados a las alas y produce un normalizado final de tensiones. El resultado más significativo es la elevada ductilidad que se consigue con algunas de las aleaciones usadas, que llega incluso al 30% en ensayo a tracción. Debido a una insuficiente rigidización, los dispositivos manifiestan abolladura del alma, la cual deriva en una disminución de su capacidad disipativa.

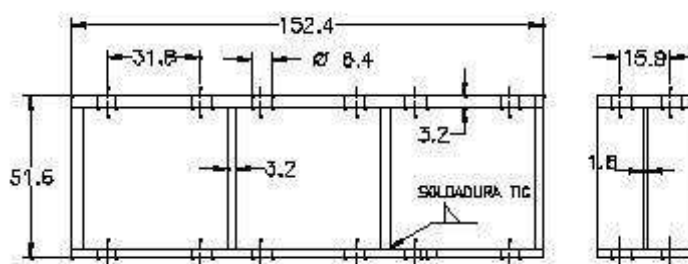


Fig. 1.32 Disipador por cortante con soldadura TIC

DISIPADORES BASADOS EN LA EXTRUSION DE METALES

Se diseñó el PVD (Penguin Vibration Damper) en 1976, el cual permite disipar energía a partir de la extrusión del plomo. En la figura 1.33 se muestra un esquema de este sistema, en el cual el plomo pasa por un orificio y forzado a un cambio de sección, disipando energía. Su respuesta histerética resulta muy estable, tras muchos ciclos de desplazamiento. Un modelo de 200kN, apto para desplazamientos de hasta 10mm y que disipa desde 0,05mm, mantiene su curva histerética sin modificaciones apreciables tras 144000 ciclos a una amplitud de ± 4 mm.

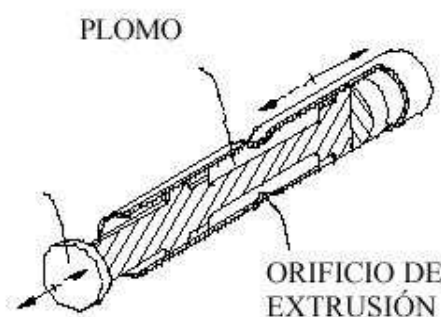


Fig. 1.33 Disipador de extrusión

b) DISIPADORES POR FRICCIÓN

Los sistemas de fricción disipan energía, basándose en el rozamiento existente entre dos superficies en 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. El sistema mostrado en la figura 1.34, permite ser emplazado en la intersección de un arriostramiento en X. Sus curvas histeréticas son prácticamente rectangulares (figura 1.35) con lo cual la energía disipada por ciclo es máxima para un determinado valor de la fuerza de deslizamiento. El mecanismo desliza ante una carga predeterminada, regulable a partir de la presión ejercida por pernos a través de una llave dinamométrica. Existe un método simplificado de diseño sísmico para estructuras que incorporan este sistema disipativo. A partir de un estudio paramétrico se determina la distribución en altura de la fuerza umbral óptimo de deslizamiento y se establece un espectro de diseño para su determinación práctica. En 1986 se planteó un dispositivo de fricción para ser empleado como conector entre una estructura aporticada y un muro de mampostería armada (figura 1.36) y se estableció un método de determinación de la fuerza umbral que proporciona la respuesta estructural óptima.

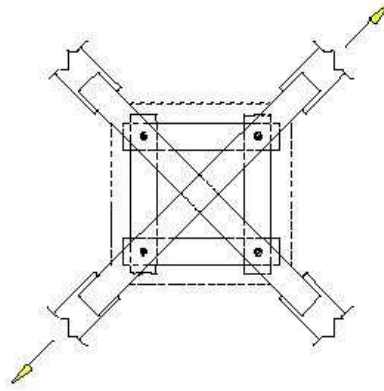


Fig. 1.34 Disipador por fricción

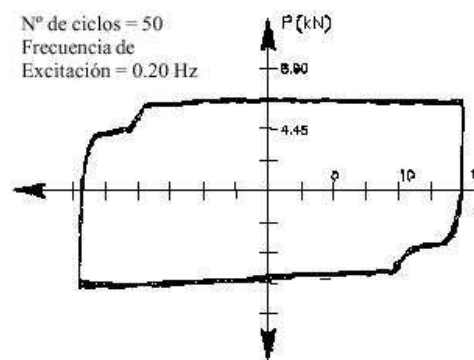


Fig. 1.35 Respuesta histerética

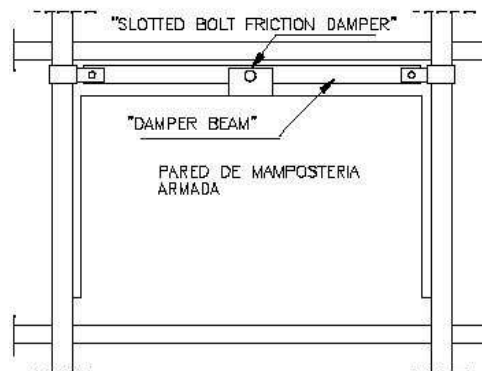


Fig. 1.36 Slotted Bolt Friction Damper

El mayor inconveniente que presentan estos dispositivos disipadores es que el coeficiente de fricción, durante el desplazamiento, depende de la velocidad, de 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 esta influencia puede ser significativa si esta entra en rango no lineal.

En 1998 se diseñó un disipador de fricción de concepción distinta a los dos anteriormente descritos. Mientras que los primeros generan las fuerzas de fricción a través de uniones atornilladas, este disipador las obtiene a partir del deslizamiento entre una serie de anillos interiores y exteriores (figura 1.37). El deslizamiento va acompañado de un aumento progresivo de la presión entre las superficies de contacto de los anillos, debido a la interferencia que se produce entre estos durante su desplazamiento. Resultados de los ensayos efectuados mostraron que el comportamiento histerético (figura 1.38) resulta estable, repetible y predecible. Su acción sobre la estructura es autocentradora y su respuesta fuerza – desplazamiento resulta prácticamente independiente del contenido frecuencial de la excitación sísmica. Sus características mecánicas y geométricas permiten la incorporación de disipadores en una diagonal rigidizadora o en un arriostramiento en X.

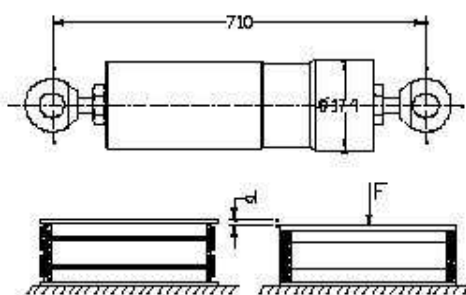


Fig. 1.37 Disipador Shapia

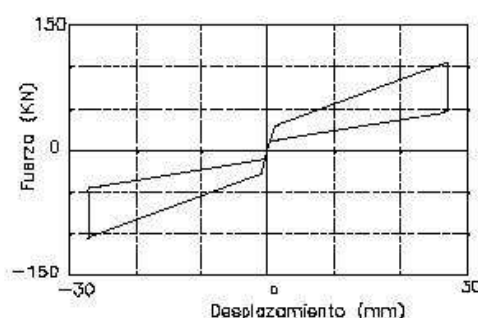


Fig. 1.38 Relación carga-desplazamiento

1.4.2 DISIPADORES CON COMPORTAMIENTO VISCOELASTICO

a) DISIPADORES VISCOELASTICOS

Los disipadores viscoelásticos han sido empleados con éxito, durante los últimos treinta años, para reducir la respuesta de edificios altos ante la acción del viento. De forma más reciente se ha estudiado su utilización con fines

sismorresistentes. Los disipadores viscoelásticos sólidos están formados con chapas metálicas unidas con capas finas de material viscoelástico (figura 1.39) y presentan unos ciclos histeréticos característicos elípticos (figura 1.40).

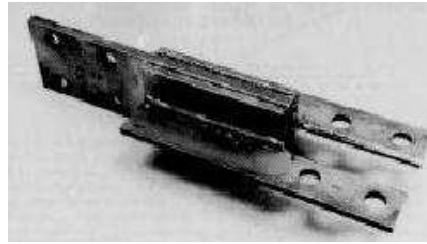


Fig. 1.39 Dispositivo viscoelástico

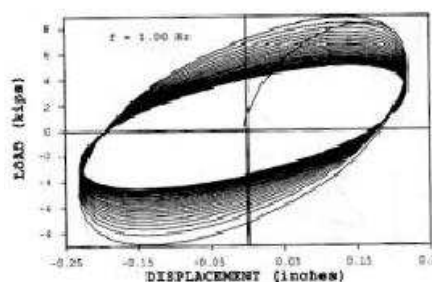


Fig. 1.40 Respuesta histerética

Su acción disipativa se basa en el aumento del amortiguamiento estructural.

Presentan algunas ventajas con relación a los disipadores histeréticos, tales como:

- No precisan de una fuerza umbral para disipar energía
- No cambian significativamente los periodos de vibración, con lo cual resulta posible linearizar el comportamiento estructural y realizar una modelación más sencilla.

Como inconvenientes de su uso y aplicación tenemos:

- La poca variación del periodo fundamental no evita el comportamiento resonante.
- Los materiales viscoelásticos, en general, son sensibles a los cambios de temperatura, frecuencia y deformación, resultando necesario minimizar la influencia de estas variables en sus rangos de servicio en estructuras sismorresistentes para que su comportamiento resulte predecible.
- Para conseguir un aumento del amortiguamiento estructural a valores que reduzcan significativamente la respuesta estructural ante un sismo severo es necesaria una gran cantidad de dispositivos.

En un estudio experimental llevado a cabo en el año 1990, se analizaron disipadores viscoelásticos en una estructura de 9 plantas, en escala 1/4, solicitada en una mesa vibradora por señales procedentes de diversos sismos. Entre sus conclusiones destacan:

- Que las características dinámicas del edificio no varían de forma significativa: la frecuencia fundamental pasaba de 2,04Hz a 2,76Hz, para un aumento de la fracción de amortiguamiento del 0,74% al 8,07% con disipadores.
- El incremento en temperatura del dispositivo debido a la acción sísmica apenas afectaba a las propiedades dinámicas del sistema.
- Que la teoría viscoelástica lineal se puede aplicar para describir el comportamiento de los disipadores.

b) DISIPADORES DE FLUIDO VISCOSO

Los disipadores de fluido viscoso tienen la propiedad de reducir simultáneamente los esfuerzos y las deflexiones de la estructura. Esto es debido a que los disipadores de fluido varían su fuerza solamente con la velocidad, la cual provee una respuesta que es inherentemente fuera de fase con los esfuerzos debido a la flexibilidad de la estructura. Otros disipadores pueden normalmente ser clasificados como histeréticos, donde una fuerza de amortiguamiento es generada bajo una deflexión o los viscoelásticos que son disipadores con un complejo resorte combinado con un amortiguamiento.

Inclusive en estos disipadores no fluidos tienen elementos de fluencia, fricción, rótulas plásticas. Ninguno de estos dispositivos tiene una respuesta fuera de fase debido a esfuerzos estructurales de flexión. Esto es simplemente porque estos dispositivos son dependientes de otros parámetros aparte de la velocidad. Los disipadores no fluidos disminuyen las deflexiones en la estructura, pero al mismo tiempo incrementan los esfuerzos en las columnas. Los esfuerzos en las columnas tienen su valor máximo, cuando el edificio llega a su deformación máxima. Si se adiciona un disipador de fluido viscoso, la fuerza de amortiguamiento se reduce a cero en este punto de máxima deformación. Esto es debido a que la velocidad del disipador es cero en este punto.

Los disipadores de fluido viscoso son esencialmente mecanismos llenos de fluido, el cual debe ser capaz de mantenerse en servicio durante grandes períodos de tiempo sin mantenimiento. Los requerimientos de los materiales son que deben ser resistentes a la corrosión, resistencia al despostillamiento, libre

de esfuerzos de ruptura y alta resistencia al impacto. Esto es especialmente cierto para el cilindro del disipador, el cual debe resistir esfuerzos triaxiales.

En la industria americana existen varios estándares de materiales de diversas organizaciones independientes. Algunas de estas organizaciones se muestran a continuación:

- Sociedad de Ingenieros Automovilísticos “Aerospace Materials Specifications” (AMS).
- Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos “ASME Standards”.
- Departamento de Defensa de los Estados Unidos, MIL – Handbook 5, “Metallic Materials and Elements for Aerospace Vehicle Structures”.
- NASA, Goddard Space Flight Center “Materials Selection Guide”.

Un disipador de fluido viscoso es un dispositivo que disipa energía aplicando una fuerza resistiva a un desplazamiento finito. La fuerza de salida del disipador es resistiva y actúa en la dirección opuesta al movimiento de entrada. Debido a que el disipador se comporta de acuerdo a las leyes de la mecánica de fluidos, el valor de la fuerza resistiva varía con respecto a la velocidad traslacional del disipador en cualquier punto en el tiempo.

1.5 ESTRUCTURA CON DISIPADORES DE ENERGIA vs. ESTRUCTURA TRADICIONAL

Para la discusión previa de los efectos de los sismos de campo cercano, sólo los sistemas de 1GDL han sido considerados. No hay revisión provista acá de análisis dinámicos de sistemas de múltiples grados de libertad (MGDL). Desde el punto de vista del análisis estructural de varios niveles, diferencias significantes pueden existir entre las propiedades de una estructura tradicional y aquella estructura con amortiguamiento adicionado. Para estos casos, los métodos tradicionales de análisis pueden necesitar ser modificados para contemplar estas diferencias. Algunas diferencias potenciales significativas son anotadas a continuación.

1.5.1 INCREMENTO SIGNIFICATIVO EN EL AMORTIGUAMIENTO

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. Algunos componentes de la respuesta modal que tienen menor contribución en la respuesta total de la estructura tradicional puede volverse importante después de que los disipadores son adicionados.

1.5.2 AMORTIGUAMIENTO NO PROPORCIONAL

Por conveniencia analítica, el amortiguamiento proporcional es usualmente asumido en el análisis de una estructura tradicional. Esto simplifica el análisis estructural utilizando superposición modal. La consecuencia de adicionar disipadores a una estructura tradicional depende de las ubicaciones y características de los dispositivos seleccionados. Si el amortiguamiento adicionado es proporcional, esto quiere decir que si las formas de modo no amortiguadas de la estructura con rigidez adicional debida a los disipadores diagonalizan la matriz de amortiguamiento de la estructura, entonces la estructura tiene amortiguamiento proporcional. En este caso, las aproximaciones del análisis modal tradicional trabajan bien. Esto es, los modos normales de vibración del sistema amortiguado son idénticos a aquellos de la estructura no amortiguada, haciendo del cálculo de las propiedades modales un procedimiento de rutina.

La suposición del amortiguamiento proporcional, no es generalmente válido para estructuras con disipadores, porque no debe de unirse las características de los disipadores a las variaciones de la rigidez estructural y a la masa del edificio. Por otra parte, en algunos casos puede ser mejor solo adicionar disipadores a algunos niveles del edificio. Esto se debe, a que la distribución de las propiedades de amortiguamiento en la estructura probablemente no sea proporcional. En esta situación, las modificaciones del análisis tradicional deben ser consideradas.

La capacidad de caracterizar apropiadamente el desempeño de una estructura amortiguada y su respuesta depende del grado de acción no proporcional.

1.5.3 NO-LINEALIDADES DEL DISPOSITIVO DE DISIPACION

Una estructura tradicional se comporta linealmente o no linealmente (debido a la fluencia) bajo una condición de carga dada, una estructura con disipadores generalmente exhibe 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.

CAPITULO 2

MODELAMIENTO MATEMATICO

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. Los principios básicos involucrados en la determinación del desempeño y el diseño de estos sistemas han sido presentados en el capítulo anterior. En este capítulo, haremos una discusión más detallada del desempeño de los dispositivos pasivos, con énfasis en el desarrollo de los modelos matemáticos apropiados. Esta información es necesaria para un mejor entendimiento de las principales suposiciones empleadas en los procedimientos simplificados de diseño y para una mejor apreciación de las capacidades y las limitaciones de los diversos disipadores de energía.

El esquema de clasificación basado en el desempeño resumido en la tabla 2.1, es empleada para categorizar los sistemas pasivos de disipación de energía. La disipación de energía puede ser interpretada incluso como la conversión de la energía cinética a calor o por la transferencia de la energía a los modos de vibración. El primer mecanismo incorpora ambos, los dispositivos histeréticos que disipan energía con un insignificante radio de dependencia y los dispositivos viscoelásticos que exhiben considerable radio o frecuencia de dependencia. Incluidos en el primer grupo están los dispositivos que operan en los principios tales como la fluencia de metales y los friccionantes por deslizamiento, mientras que el otro grupo consiste de dispositivos involucrando deformación de sólidos viscoelásticos o fluidos y aquellos que emplean orificios para el paso de los fluidos. Una estructura idealizada de un grado de libertad (1GDL) es mostrada en la figura 2.1,a con un dispositivo histerético pasivo, viscoelástico operando en paralelo. Un modelo microscópico definiendo las características de rigidez y amortiguamiento del dispositivo es necesario para determinar toda la respuesta estructural.

En el siguiente capítulo, se analizará detalladamente cada tipo de los sistemas pasivos. Se pondrá énfasis en los principios físicos para su comportamiento y en los modelos matemáticos apropiados para la caracterización de su respuesta. Para el diseño y análisis preliminar, simples aproximaciones son siempre deseables, mientras que para el diseño final detallado, representaciones más precisas pueden ser requeridas.

Tabla 2.1

Sistemas pasivos de disipación de energía

Clasificación	Principios de Operación	Materiales y Tecnologías	Objetivos de Desempeño
Dispositivos Viscoelásticos	Deformación de sólidos viscoelásticos	Polímeros viscoelásticos	Disipación de energía, incremento de rigidez
	Deformación de fluidos viscoelásticos	Fluidos altamente viscosos	
	Fluidos por orificio	Fluidos, orificios de diseño avanzado y densidad de fluidos	
Dispositivos Histeréticos	Fluencia de metales	Acero o plomo	Disipación de energía, incremento de resistencia
	Fricción	Contacto metal a metal o no metal	

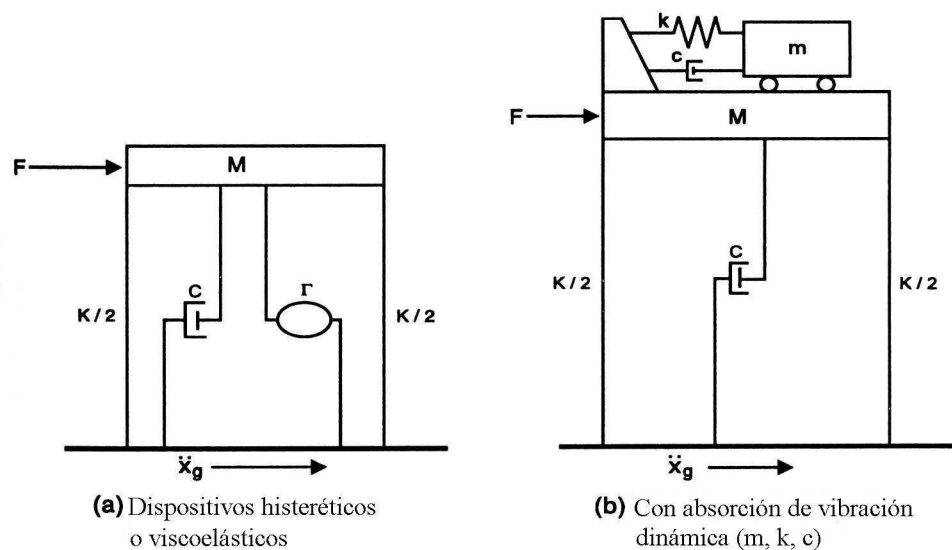


Fig. 2.1 Idealizaciones para estructuras de 1GDL disipadas pasivamente (m, k, c)

2.1 SISTEMAS VISCOELASTICOS

En esta parte, se analizará un rango de sistemas pasivos que disipan energía de una manera radio dependiente. Como se indicó en la tabla 2.1, este agrupamiento incluye disipadores viscoelásticos sólidos y disipadores viscoelásticos fluidos, con la posterior incorporación de dispositivos basados en orificios y deformación de fluidos. Las respuestas típicas fuerza-desplazamiento obtenidas para estos dispositivos bajo amplitud constante, condiciones cíclicas de desplazamiento controlado son provistas en la figura 2.2,a. En general, estos dispositivos exhiben amortiguamiento y rigidez, por otra parte el caso importante de un disipador puramente viscoso en el cual la fuerza y el desplazamiento son 90° fuera de fase está ilustrada en la figura 2.2,b. En general, nótese que para los dispositivos viscoelásticos, la respuesta es dependiente de la frecuencia. Por otra parte, en la figura 2.2 y en muchas aplicaciones, el comportamiento es confinado al rango lineal. Esto generalmente simplifica enormemente los procedimientos de análisis requeridos. Desde que la disipación de energía ocurre, incluso para deformaciones infinitesimales, los dispositivos viscoelásticos tienen potencial aplicación tanto para protección sísmica como para viento.

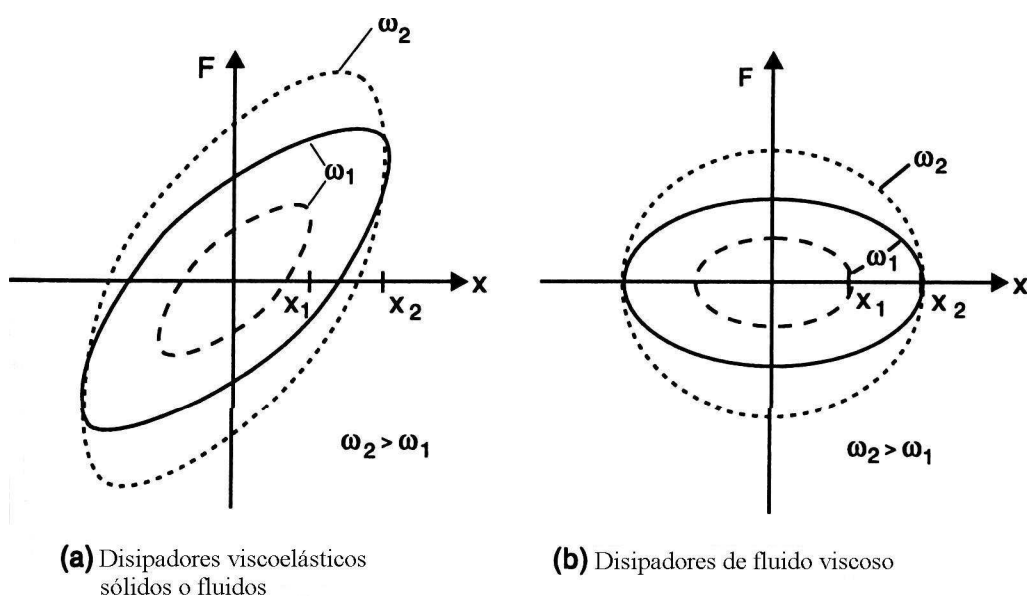


Fig. 2.2 Respuesta idealizada fuerza-desplazamiento de dispositivos viscoelásticos

2.1.1 DISIPADORES VISCOELASTICOS SÓLIDOS

Los materiales viscoelásticos sólidos empleados en estructuras, son usualmente copolímeros o sustancias vidriosas que disipan energía cuando están sujetas a deformación por corte. Un disipador viscoelástico típico (VE), el cual consiste en capas viscoelásticas entre platos de acero, es mostrado en la figura 2.3. Cuando son montadas en una estructura, la deformación por corte y por consiguiente la disipación de energía ocurre cuando la vibración estructural induce el movimiento relativo entre las láminas de acero exteriores y el plato central.

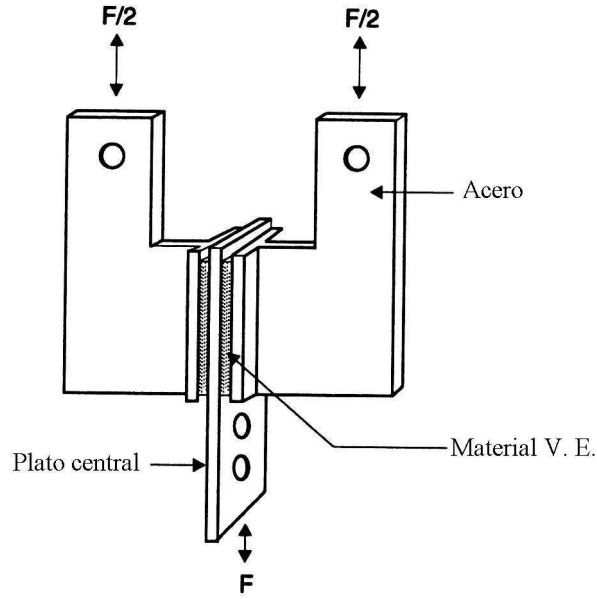


Fig. 2.3 Configuración típica de un disipador viscoelástico sólido

La respuesta de estos materiales viscoelásticos bajo carga dinámica depende de la frecuencia de vibración, el nivel de deformación y la temperatura del ambiente. Bajo excitación armónica infinitesimal con la frecuencia ω , la relación entre el esfuerzo de corte $\tau(t)$ y la deformación por corte $\gamma(t)$ puede ser expresada como:

$$\tau(t) = G'(\omega)\gamma(t) + \frac{G''(\omega)}{\omega}\dot{\gamma}(t) \quad (2.1)$$

Donde $G'(\omega)$ y $G''(\omega)$ son respectivamente el módulo de almacenamiento y pérdida por corte. El factor de pérdida es entonces definido por $\eta(\omega) = G''(\omega)/G'(\omega)$.

Para una excitación más general, el principio de superposición de Boltzmann puede ser transformado para proveer la siguiente relación constitutiva para materiales polímeros:

$$\tau(t) = \int_0^t G(\xi)\dot{\gamma}(t-\xi)d\xi + G(t)\gamma(t) \quad (2.2)$$

Para el caso usual de deformación inicial cero $\gamma(0) = 0$, ésta se reduce a:

$$\tau(t) = \int_0^t G(\xi)\dot{\gamma}(t-\xi)d\xi \quad (2.3)$$

En la ecuación anterior $G(t)$ representa el módulo de relajación del esfuerzo, el cual es definido como el ratio del esfuerzo a la deformación para el caso de deformación constante. El valor de $G(t)$ puede ser determinado experimentalmente para un material dado. Los resultados para un copolímero particular son mostrados

en la figura 2.4. Diferentes expresiones pueden ser asumidas para el módulo de relajación del esfuerzo, incluyendo aquellos asociados con los modelos clásicos de Kelvin y Maxwell. Sin embargo, para capturar el comportamiento viscoelástico en un rango de frecuencia suficientemente amplio, una mayor exactitud es siempre requerida. El siguiente modelo de cuatro parámetros originalmente desarrollado por Williams (1964), particularmente efectivo para la representación de los materiales viscoelásticos en los sistemas pasivos de disipación de energía (Shen y Soong, 1995):

$$G(t) = G_e + \frac{G_g - G_e}{[1 + t/t_0]^\alpha} \quad (2.4)$$

Donde:

G_e - módulo elástico.

G_g - módulo vidrioso.

t_0 - tiempo de relajación.

α - constante real dada por la pendiente de la curva de relajación a través de la región de transición entre el comportamiento tipo caucho y el comportamiento quebradizo.

El módulo de relajación del esfuerzo $G(t)$ mostrado en la ecuación 2.4, predice un módulo límite para todos los tiempos no negativos y ha sido encontrado razonablemente preciso para la mayoría de los materiales viscoelásticos. Inicialmente $G(t)$ coincide con el módulo vidrioso, pero suavemente se aproxima al módulo tipo caucho con el incremento del tiempo.

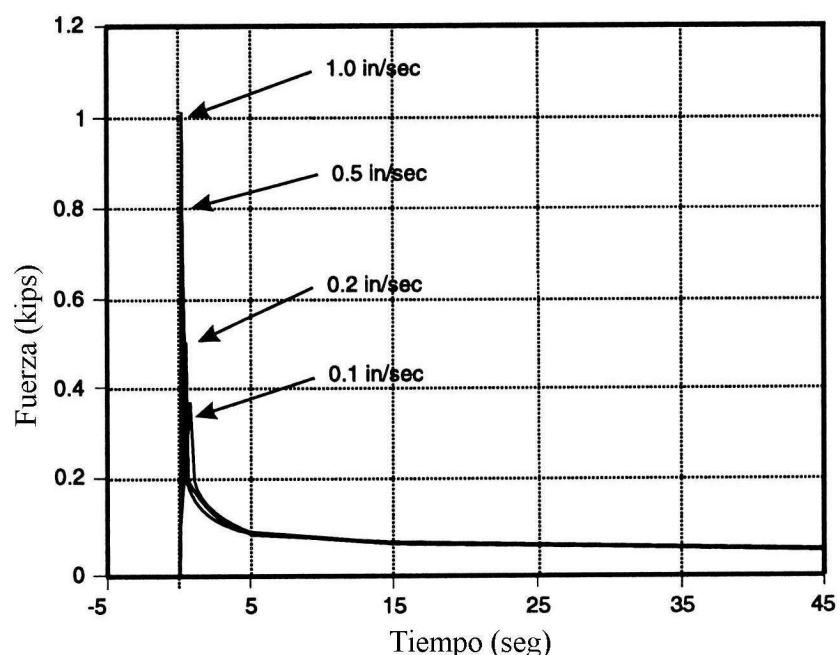


Fig. 2.4 Pruebas de relajación de esfuerzo a diferentes radios de deformación

Realizando una transformación laplaciana a la ecuación 2.4, los parámetros del modelo pueden ser relacionados al módulo de almacenamiento y al de pérdida. Las expresiones resultantes se muestran en las fórmulas 2.5 y 2.6.

$$G'(\omega) = G_e + (G_g - G_e)\Gamma(1-\alpha)(\omega t_0)^\alpha \cos\left(\frac{\alpha\pi}{2} + \omega t_0\right) \quad (2.5)$$

$$G''(\omega) = (G_g - G_e)\Gamma(1-\alpha)(\omega t_0)^\alpha \sin\left(\frac{\alpha\pi}{2} + \omega t_0\right) \quad (2.6)$$

Donde $\Gamma(\xi)$ representa a la función gamma.

En la publicación de Shen y Soong (1995), los parámetros del material fueron primero determinados por un ajuste en la curva de datos de relajación del esfuerzo, y después, chequeados con las mediciones involucrando excitaciones sinusoidales. En la figura 2.5 se muestra una comparación típica entre el módulo calculado de las ecuaciones 2.5 y 2.6 versus aquellas determinadas por las pruebas sinusoidales. Una buena correlación es obtenida en el rango de 1Hz a 3Hz.

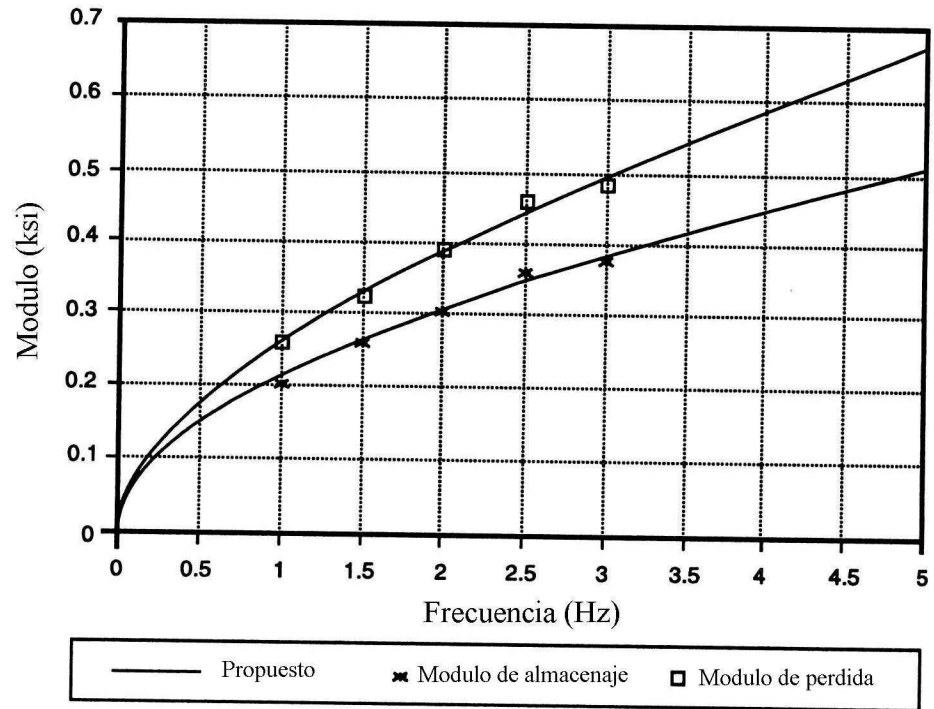


Fig. 2.5 Comparación del módulo de almacenamiento y el módulo de pérdida entre la simulación y el ensayo

Modelos alternativos con materiales viscoelásticos basados en derivativas fraccionales han aparecido en la literatura (Germant, 1936; Bagley y Torvik, 1983), incluyendo algunas recientes aplicaciones a los disipadores sólidos viscoelásticos (Kasai et al., 1993; Tsai y Lee, 1993). Una mayor discusión de estos modelos derivativos fraccionales se presenta en la sección de disipadores viscoelásticos fluidos.

Como se indicó previamente, los materiales típicos utilizados en disipadores viscoelásticos sólidos son también dependientes de la temperatura. Por otra parte, para una amplia clase de polímeros, la forma de la superficie de la curva del módulo dinámico versus la frecuencia es similar cuando es evaluada a varias temperaturas. Esto llevó al desarrollo del método de variables reducidas (Ferry, 1980), el cual muestra una conveniente simplificación en la separación de las dos variables principales, la frecuencia y la temperatura. Utilizando este método, la dependencia de la temperatura del módulo viscoelástico puede ser obtenido de la siguiente manera:

$$G'_{T_0}(\omega) = G'_T(\omega) \rho_0 T_0 / \rho T \text{ vs. } \beta_T \quad (2.7)$$

$$G''_{T_0}(\omega) = G''_T(\omega) \rho_0 T_0 / \rho T \text{ vs. } \omega \beta_T \quad (2.8)$$

$$G_{T_0}(t) = G_T(t) \rho_0 T_0 / \rho T \text{ vs. } t / \beta_T \quad (2.9)$$

Donde:

T - temperatura de ambiente de interés.

T_0 - temperatura de referencia arbitrariamente seleccionada, donde las mediciones son hechas.

ρ - densidad del material viscoelástico.

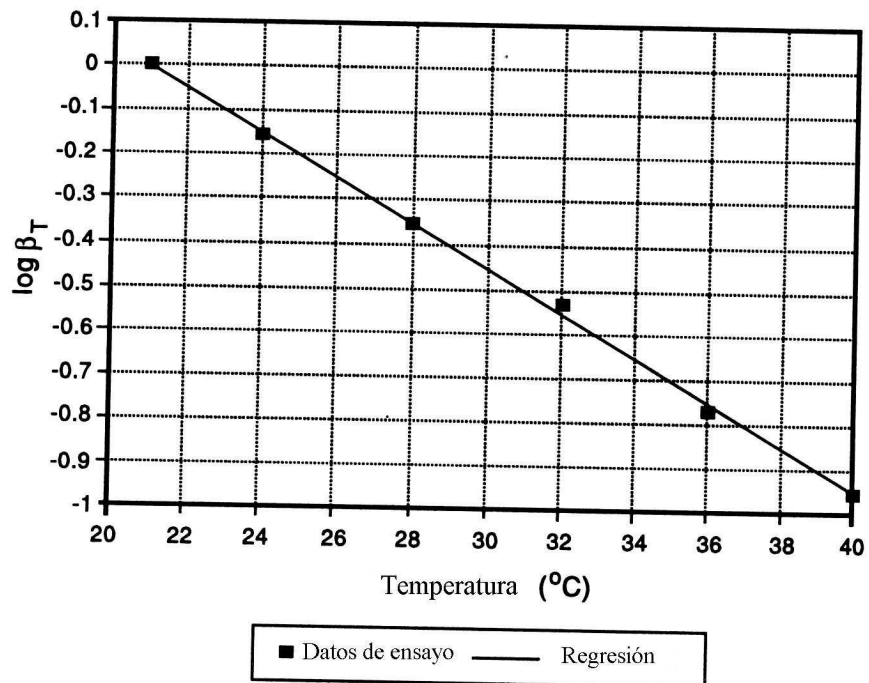


Fig. 2.6 regresión del factor de escala β_T

Todas las temperaturas deben ser medidas a una escala absoluta. La función remanente en la ecuación 2.9, β_T es un factor de cambio del tiempo o frecuencia, el cual es determinado experimentalmente. Frecuentemente una impresión del $\log \beta_T$

versus la temperatura produce casi una línea recta, como es indicado por los datos experimentales mostrados en la figura 2.6. Consecuentemente, los parámetros a y b en la siguiente regresión pueden ser determinados con mínima prueba.

$$\log \beta_T = aT + b \quad (2.10)$$

Una aplicación del método de los disipadores de materiales viscoelásticos es provista en la publicación de Shen y Soong (1995).

Una vez que el modelo constitutivo ha sido establecido para la respuesta del material del disipador en corte, todo el modelo fuerza-deformación para el disipador puede ser construido. Debido a la simplicidad geométrica del área de corte típico del disipador A y el espesor δ , la siguiente relación fuerza-deformación es obtenida para la respuesta bajo la excitación armónica en el tiempo.

$$F(t) = k'(\omega)x(t) + c'(\omega)\dot{x}(t) \quad (2.11)$$

Donde:

$$k' = \frac{AG'(\omega)}{\delta} \quad (2.12)$$

$$c' = \frac{AG''(\omega)}{\omega\delta} \quad (2.13)$$

La analogía con la ecuación 2.1 es obvia. Se debe recalcar que esta expresión es exacta solamente para excitación armónica. Para una respuesta más general, una forma integral basado en la ecuación 2.2 puede ser desarrollada.

En la mayoría de las aplicaciones estructurales, las aproximaciones involucradas en la adopción del modelo de Kelvin definido en la ecuación 2.12 son razonablemente provistas para que uno seleccione un valor propio de ω . Por ejemplo, en sistemas estructurales de múltiples grados de libertad (MGDL), Soong y Lai (1991) han propuesto el uso del método de energía de deformación modal para establecer los radios de amortiguamiento modal y las frecuencias modales modificadas debido a la adición de los disipadores viscoelásticos.

2.1.2 DISIPADORES VISCOELASTICOS DE FLUIDO

Los dispositivos pasivos viscoelásticos sólidos utilizan la acción de sólidos para mejorar el desempeño de la estructura a diversas acciones externas. Por otra parte los fluidos también pueden ser efectivamente empleados para obtener el nivel deseado de control pasivo. Un esfuerzo significativo ha sido orientado recientemente al desarrollo de los disipadores de fluido viscoso para aplicaciones estructurales, primeramente hacia la conversión de la tecnología para la milicia y la industria pesada. Varios ejemplos de disipadores fluidos son mostrados en la figura 2.7.

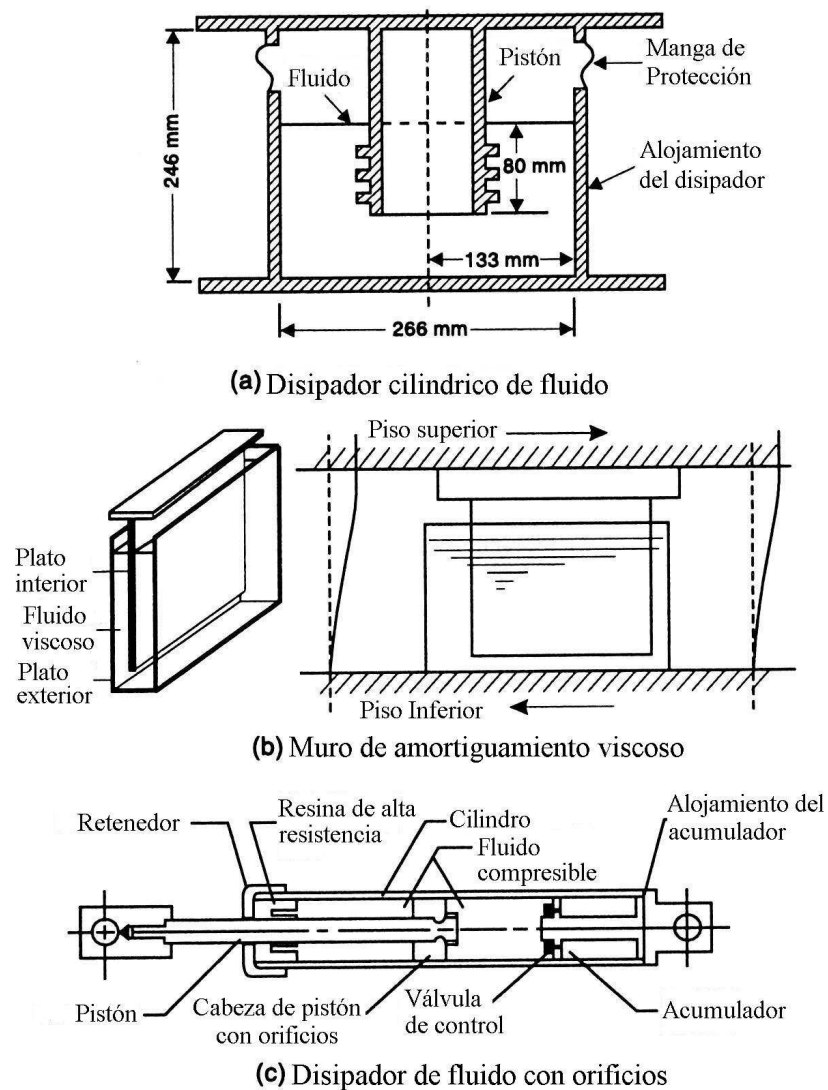


Fig. 2.7 Disipadores viscoelásticos fluidos

La disipación de energía ocurre vía conversión de la energía mecánica al calor relacionada a la deformación del pistón y a la sustancia altamente viscosa similar a un gel de silicona. En la figura 2.7,a se muestra un disipador que ha encontrado su aplicación como un componente en los sistemas de aislamiento de base (Huffmann, 1985; Makris y Constantinou, 1990). Mientras que estos dispositivos también pueden ser empleados en la superestructura, una alternativa, y quizás más efectiva, involucra el concepto de diseño del desarrollo del muro de amortiguamiento viscoso (MAV) ilustrado en la figura 2.7,b (Arima et al., 1988). En este diseño, el pistón es simplemente un plato de acero fijado para moverse solo en su plano con un estrecho contenedor de acero lleno de un fluido viscoso. Para instalaciones típicas en pórticos, el pistón es fijado el piso superior, mientras que el contenedor es fijado al piso inferior. El movimiento relativo de entrepiso desplaza el fluido y provee disipación de energía.

Ambos dispositivos discutidos arriba cumplen sus objetivos a través de la deformación de un fluido viscoso residiendo en un contenedor abierto. Para maximizar la densidad de la disipación de energía de estos dispositivos, uno debe emplear materiales con altas viscosidades. Típicamente, esto lleva a la selección de materiales que exhiben comportamientos dependientes de la temperatura y la frecuencia.

Hay otra clase de disipadores de fluido que poseen un fluido que fluye en un contenedor cerrado. En estos diseños, el pistón actúa, no solamente para deformar el fluido localmente, también para forzar el fluido a pasar a través de pequeños orificios. Como resultado, extremadamente altos niveles de densidad de disipación de energía son posibles. También, altos niveles de sofisticación es requerido para el diseño propio interno de la unidad del disipador.

Un típico disipador de fluido por orificio para aplicación sísmica se muestra en la figura 2.7,c (Constantinou et al., 1993; Constantinou y Symans, 1993). Este dispositivo cilíndrico contiene un aceite de silicona compresible, el cual es forzado a fluir vía la acción de un pistón de acero con una cabeza de bronce. La cabeza incluye un diseño de orificio de control fluídico. En adición, un acumulador es provisto para compensar el cambio en volumen debido al posicionamiento de la barra. Alternativamente, estos dispositivos uniaxiales, los cuales fueron originalmente diseñados para la milicia, han encontrado recientemente aplicación en sistemas sísmicos de aislamiento de base, así como para brindar amortiguamiento suplementario durante vibraciones inducidas por eventos sísmicos o vientos.

Mientras que la construcción de un disipador viscoelástico fluido varía considerablemente uno de cada otro y del disipador viscoelástico sólido, los modelos matemáticos fuerza-desplazamiento tienen una forma similar. En general, ambos dispositivos son dependientes de la frecuencia y la temperatura, y en algunos casos la dependencia en la amplitud es también evidente. A través de los años, numerosos modelos constitutivos han sido propuestos para los disipadores viscoelásticos fluidos. Una particular clase efectiva está basada en la generalización de los modelos clásicos para incorporar operadores fraccionales derivados. Como se vio anteriormente esto fue primero sugerido por Gemant (1936). Más reciente, Makris y Constantinou (1991) aplicaron los modelos fraccionales derivados de Maxwell para representar el comportamiento de los disipadores viscoelásticos fluidos y después extenderlo a modelos incorporando derivadas de orden complejo (Makris y Constantinou, 1993).

Considere, por ejemplo, el modelo constitutivo de Maxwell de derivada compleja que ha sido usada para caracterizar un particular fluido polibutano sobre

un amplio rango de frecuencia y temperatura (Makris et al., 1995). A alguna temperatura referencial T_0 , bajo la suposición de una deformación infinitesimal incompresible, el modelo propuesto puede ser escrito en términos de esfuerzos de corte τ y deformación de corte γ .

$$\tau + [\lambda(T_0)]^v \frac{d^v \tau}{dt^v} = \mu(T_0) \frac{d\gamma}{dt} \quad (2.14)$$

Donde $\lambda = \lambda_1 + i\lambda_2$, $v = v_1 + iv_2$ y $\mu = \mu_1 + i\mu_2$ son parámetros de material de valores complejos.

Como se indicó, ambos parámetros λ y μ son funciones de temperatura. El símbolo d^v/dt^v denota una derivada generalizada de orden v con respecto al tiempo (Oldham y Spanier, 1974). Para $v = 1$, la ecuación 2.14 se reduce al clásico modelo de Maxwell.

El módulo de ganancia G' y el módulo de pérdida G'' corresponden al modelo mostrado, que puede ser obtenido realizando una transformada de Fourier. Utilizando la relación para la transformada de Fourier de una derivada generalizada (Erdelyi et al., 1954; Makris, 1992):

$$F\left\{\frac{d^v f(t)}{dt^v}\right\} = [i\omega]^v F\{f(t)\} \quad (2.15)$$

Uno obtiene:

$$G'(\omega, T_0) = \Re(G^*(\omega, T_0)) \quad (2.16)$$

$$G''(\omega, T_0) = \Im(G^*(\omega, T_0)) \quad (2.17)$$

Con cálculo dinámico:

$$G^*(\omega, T_0) = \frac{i\omega\mu(T_0)}{1 + [i\omega\lambda(T_0)]^v} \quad (2.18)$$

En las ecuaciones 2.16 y 2.17, $\Re$ y $\Im$ extraen respectivamente la parte real e imaginaria de su argumento. Los parámetros del material son entonces obtenidos de información experimental utilizando una regresión algorítmica no-lineal en el espacio complejo, con una restricción adicional casual para asegurar un retraso en la fase no negativa (Makris et al., 1995).

Habiendo establecido los parámetros del material en el modelo de Maxwell de derivada compleja, la dependencia de la frecuencia es completamente caracterizada a la temperatura de referencia T_0 . Sólo queda determinar la dependencia de la temperatura de la respuesta. Otra vez el método de variables reducidas puede ser

frecuentemente aplicado. En ese caso, la función de frecuencia β_T caracteriza la dependencia de la temperatura.

Una impresión del módulo dinámico reducido versus la frecuencia angular reducida, $\beta_T \omega$, es mostrado en la figura 2.8 para un fluido polibutano. Esta información experimental obtenida a tres diferentes temperaturas, claramente delinea un par de curvas maestras para el módulo de ganancia y pérdida, y valida el uso del método de variables reducidas para este material. También se grafica en esa figura el módulo dinámico de corte obtenido del modelo de Maxwell de derivada compleja. La correlación es buena en un amplio rango de frecuencias. La única desviación notable ocurre en el módulo de ganancia a baja frecuencia. Por otra parte, en ese rango, el módulo de pérdida es un orden de magnitud más grande, a pesar de que se reduce significativamente la desviación.

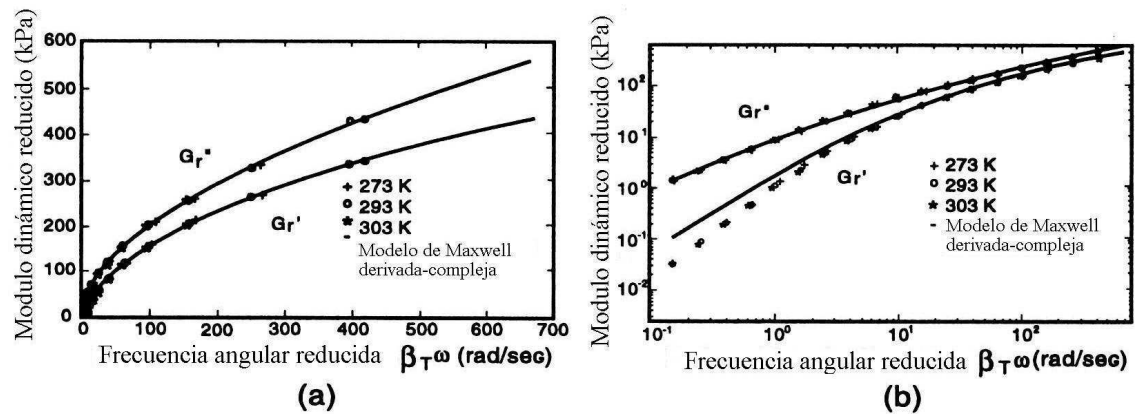


Fig. 2.8 Módulo dinámico para fluido polibutano

Como se definió anteriormente, en muchos casos, se podría esperar que toda la respuesta fuerza-deformación de los disipadores fluidos cercanamente siga el comportamiento constitutivo. En Makris y Constantinou (1991) y Makris et al., (1993), el siguiente modelo fuerza-desplazamiento de Maxwell de derivada fraccional fue utilizado para modelar toda la respuesta del disipador:

$$F(t) + \lambda^\nu \frac{d^\nu F(t)}{dt^\nu} = C_0 \frac{dx(t)}{dt} \quad (2.19)$$

Con F como la fuerza aplicada al pistón y x como la resultante del desplazamiento del pistón. Los parámetros del disipador C_0 , λ y ν , representan respectivamente, el coeficiente de amortiguamiento de frecuencia cero, el tiempo de relajación y el orden de la derivada fraccional. En Makris y Constantinou (1991), los parámetros del disipador son determinados directamente de información experimental, mientras que en Makris et al. (1993) los parámetros son estimados de la información del material y un modelo analítico simplificado. Un resultado típico es el mostrado en la figura 2.9. Se puede notar que para frecuencias suficientemente

bajas, los efectos de la inercia son importantes, y se corrobora que los parámetros macroscópicos λ y ν coinciden con aquellos obtenidos de la modelación constitutiva, a pesar, de que solamente C_0 es una función de la geometría del disipador.

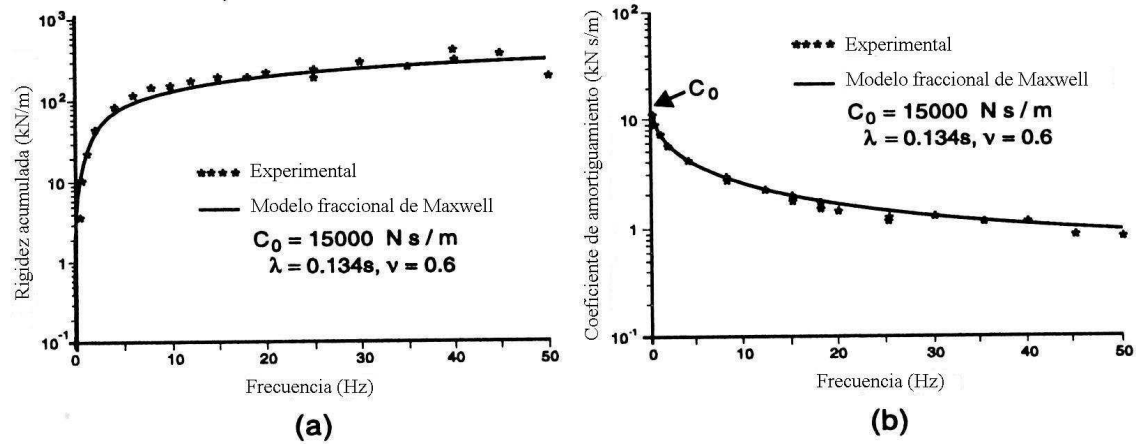


Fig. 2.9 Modelo microscópico para la respuesta de disipador fluido cilíndrico

La modelación del disipador de fluido con orificios, está ilustrado en la figura 2.7,c y está desarrollada en la publicación de Constantinou y Symans (1993). Medidas típicamente experimentales a temperatura del ambiente de los lazos histeréticos de fuerza-deformación son mostrados en la figura 2.10. Para este disipador la dependencia de la frecuencia es mucho menos dramática, y un modelo clásico de Maxwell es adecuado para el rango de frecuencia de interés. La ecuación 2.19 se reduce a la siguiente:

$$F(t) + \lambda \frac{dF(t)}{dt} = C_0 \frac{dx(t)}{dt} \quad (2.20)$$

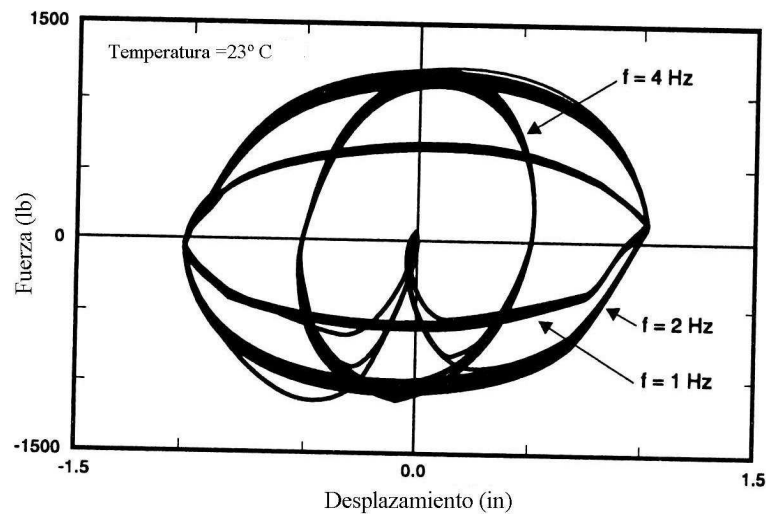


Fig. 2.10 Relación fuerza-desplazamiento de un disipador fluido con orificio

Con parámetros reales λ y C_0 representando respectivamente el tiempo de relajación y el coeficiente de amortiguamiento. Comparaciones del modelo con la rigidez almacenada experimentalmente, el coeficiente de amortiguamiento y el ángulo de fase son mostradas en la figura 2.11. Nótese que el tiempo de relajación $\lambda = 0,006s$ es bastante pequeño. Esto indica que, bajo una frecuencia de aproximadamente 4Hz, la ecuación 2.20 puede ser simplificada obviando el segundo término de la izquierda, el cual se vuelve insignificante. Entonces uno se queda con el lineal, modelo puramente viscoso, el cual simplifica en cálculo estructural.

$$F(t) = C_0 \frac{dx(t)}{dt} \quad (2.21)$$

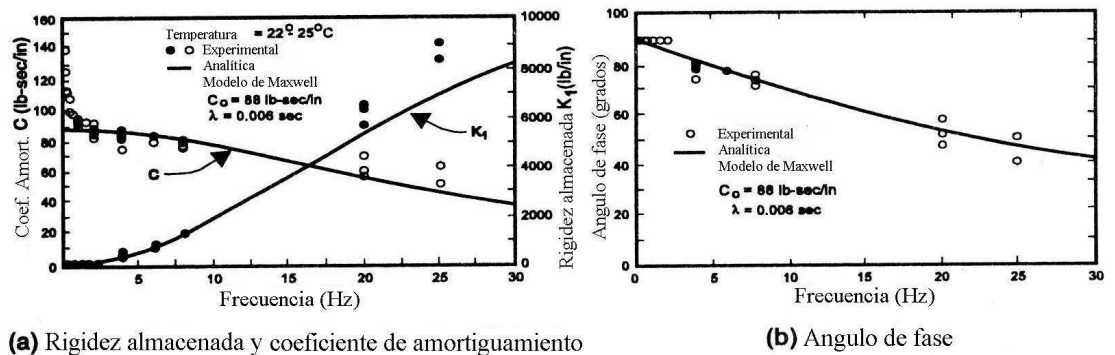


Fig. 2.11 Comparación entre valores experimentales y analíticamente derivados para disipadores fluidos con orificios a temperatura ambiente

Se puede notar que las dependencias de la frecuencia en disipadores fluidos con orificios resultan del uso de acumuladores o partes similares que involucran la operación de las válvulas. Las válvulas por si mismas tienen características dinámicas y típicamente no pueden ser compatibles con el movimiento dinámico del pistón del disipador a altas frecuencias. Esto ocasiona una restricción del flujo del fluido al acumulador y la reducción del volumen del fluido. Si se desea, este fenómeno puede ser enteramente prevenido vía el uso de una varilla guía para el pistón. Este tipo de construcción ha sido utilizada en todas las aplicaciones de los disipadores fluidos en sistemas estructurales.

2.2 SISTEMAS HISTERETICOS

Los sistemas histeréticos, por definición, disipan 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 como el mecanismo disipativo y los disipadores friccionantes que generan calor a través de la fricción de deslizamiento.

Respuestas típicas fuerza-desplazamiento para estos dispositivos son obtenidos bajo amplitud constante, las condiciones cíclicas de desplazamiento controlado son mostrados en la figura 2.12. Las cantidades F y x representan toda la fuerza y el desplazamiento del dispositivo. Para una carga cíclica a una amplitud de desplazamiento X_0 y a una frecuencia circular ω , el desplazamiento en el tiempo t puede ser escrito como:

$$x(t) = x_0 \sin \omega t \quad (2.21)$$

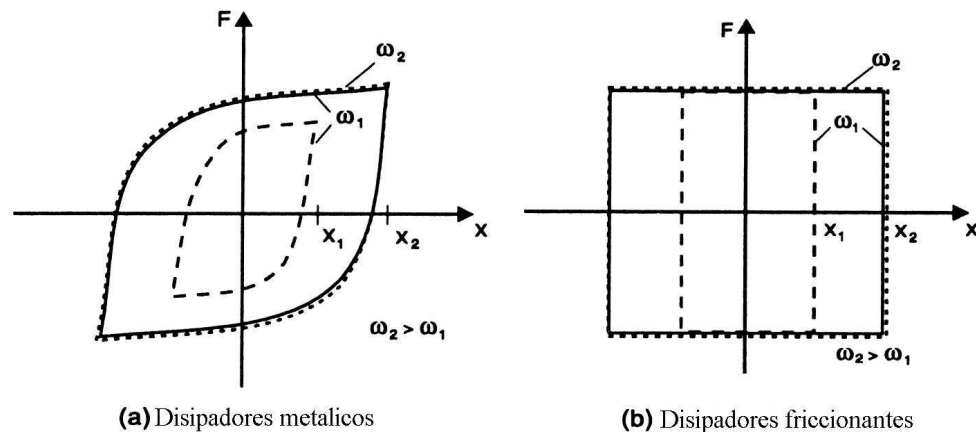


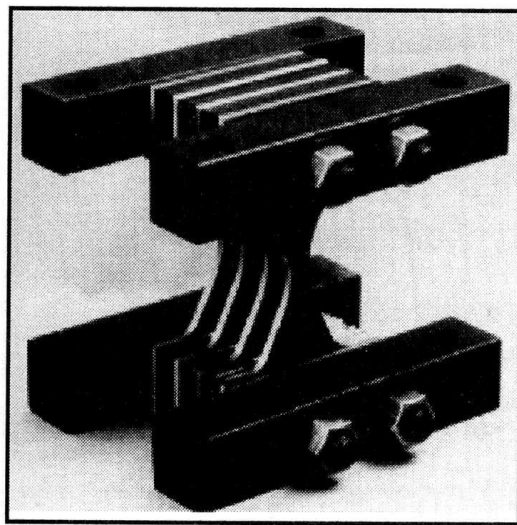
Fig. 2.12 Respuesta fuerza-desplazamiento idealizada de dispositivos histeréticos

Nótese de la figura 2.12 que para ambos dispositivos, el metálico y el de fricción, la respuesta permanece esencialmente sin cambios para varias frecuencias de excitación, lo cual demuestra independencia. Por otra parte, los dispositivos son inherentemente no-lineales. La fuerza de salida claramente no escala con el desplazamiento, y la dependencia significativa es aparente. Esta no-linealidad de dispositivos histeréticos debe ser considerada en el análisis estructural y en el diseño. Se debe también notar que en todos los casos, la disipación de energía ocurre solamente después de que una determinada fuerza es excedida. Consecuentemente, los disipadores histeréticos son primariamente adecuados para aplicaciones sísmicas.

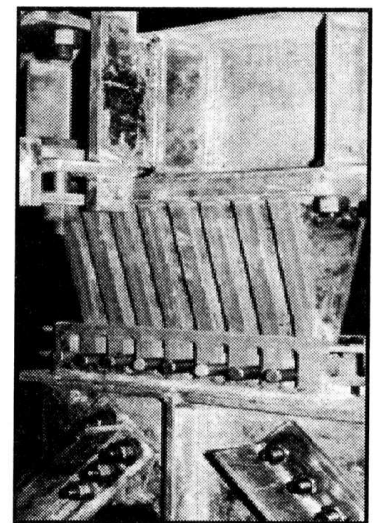
2.2.1 DISIPADORES POR PLASTIFICACION DE METALES

Uno de los mecanismos más efectivos disponibles para la disipación de energía, dentro de una estructura durante un sismo, es a través de la deformación inelástica de sustancias metálicas. En tradicionales estructuras de acero, el diseño sismorresistente recae en la ductilidad post-fluencia de los miembros estructurales para proveer la requerida disipación. Por otra parte, la idea de utilizar disipadores histeréticos metálicos en la superestructura para absorber una gran porción de la energía sísmica comenzó con el trabajo conceptual y experimental de Kelly et al., (1992) y Skinner et al., (1975). Durante años, considerable progreso ha sido hecho en el desarrollo de disipadores metálicos y han sido propuestos nuevos diseños.

Ejemplos de disipadores metálicos que han recibido significativa atención en los años recientes incluye a los disipadores de superficie-X y a los de plato triangular mostrados en la figura 2.13. Estos dispositivos de platos paralelos son típicamente instalados en un pórtico entre un brazo chevron y la viga superior. Como resultado, el disipador primariamente resiste las fuerzas horizontales asociadas a la distorsión de entrepiso vía la deformación por flexión de los platos individuales. A un determinado nivel de fuerza, los platos fluyen y proveen una cantidad suplementaria de disipación de energía. La forma curva de los platos provee una fluencia uniforme en toda su longitud.



(a) Disipador de plato con forma de X



(b) Disipador de plato triangular

Fig. 2.13 Geometría de disipadores metálicos

A pesar de que existen diferencias en la configuración geométrica de varios dispositivos metálicos, el mecanismo de disipación en todos los casos resulta de la deformación inelástica de un metal. Usualmente ese metal es acero, a pesar que algunas veces es empleado el plomo. En cualquier caso, para emplear efectivamente un disipador metálico para diseño estructural sismorresistente, uno debe construir un modelo matemático razonable de sus características relevantes fuerza-deformación. Debido a que toda la respuesta está íntimamente relacionada con el comportamiento cíclico esfuerzo-deformación del metal, es beneficioso revisar detalladamente la respuesta estructural típica de esfuerzo-deformación del acero estructural.

La respuesta de un espécimen de acero, sometido a una carga uniaxial monotónica, se muestra en la figura 2.14,a. Esta es una imagen muy familiar que incluye la apariencia en esfuerzo de fluencia superior e inferior, una platea de esfuerzo-deformación y también una zona de endurecimiento por deformación. Bajo ciclos controlados de deformación de amplitud constante, resulta la respuesta

mostrada en la figura 2.14,b. A cualquier amplitud dada, una curva estabilizada es eventualmente obtenida, la cual es independiente de la carga histórica (Cofie y Krawinkler, 1985). Nótese en la figura 2.14,b que el pico de la rótula es suavizada y que la platea ha desaparecido. Lógicamente, uno debería esperar que toda la respuesta fuerza-deformación de los disipadores metálicos tengan una apariencia similar. Este es generalmente el caso, como se indica en los resultados experimentales mostrados en la figura 2.15 para el disipador de plato de superficie-X (Wittaker et al., 1991).

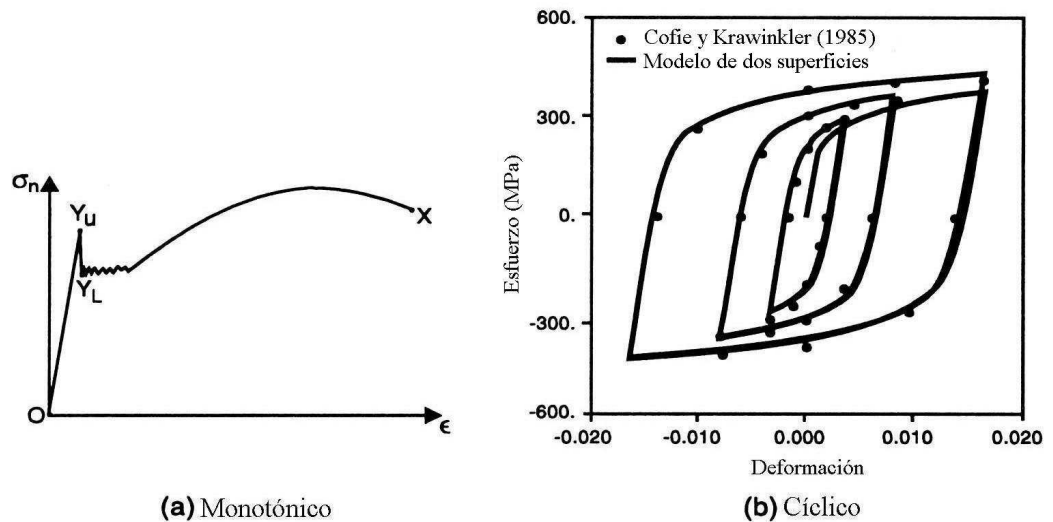


Fig. 2.14 Respuesta esfuerzo-deformación del acero estructural

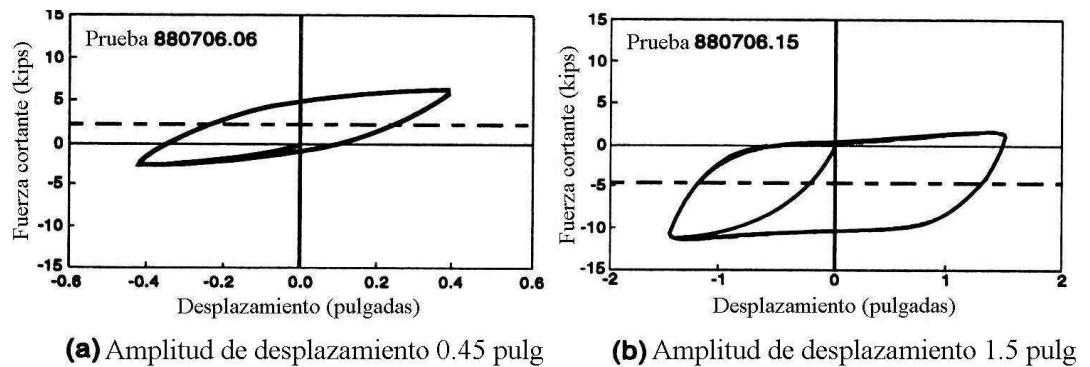


Fig. 2.15 Respuesta fuerza-desplazamiento del disipador de plato de superficie-X

Existen al menos dos diferentes aproximaciones que pueden ser tomadas para construir un modelo de disipador fuerza-desplazamiento. La primera aproximación involucra el uso directo de la información experimental obtenida de las pruebas de los componentes de los disipadores metálicos. La forma básica del modelo fuerza-desplazamiento es seleccionado, usualmente basado en analogía con la teoría plástica y después los parámetros del modelo son determinados vía un procedimiento de ajuste de curva. Este experimento basado en la modelación es

discutido en mayor detalle posteriormente. En la segunda aproximación, el modelo fuerza-desplazamiento de una relación constitutiva apropiada para el metal, se obtiene aplicando los principios de la mecánica. Esta aproximación posterior puede frecuentemente proveer adicional perspicacia en el comportamiento del dispositivo, mientras se reducen los requerimientos para las pruebas de los componentes. Detalles concernientes al desarrollo de estos mecanismos basados en los modelos, pueden ser encontrados en las publicaciones de Tsai y Tsai (1995) y Dargush y Soong (1995).

El primer avance serio para desarrollar una relación racional fuerza-desplazamiento para un disipador metálico fue investigado por Ozdemir (1976). El enfoque en ese estudio fueron los disipadores de vigas torsión, cuyas formulaciones desarrolladas tienen aplicaciones más generales.

La respuesta de cualquier disipador metálico es una función de su geometría y las características mecánicas del metal del cual es fabricado. Consecuentemente, como se mencionó, es bastante lógico utilizar modelos fuerza-desplazamiento que tienen una forma similar a aquellos empleados para el modelamiento constitutivo de ese metal. Esto es exactamente la característica tomada por Ozdemir. La estructura de sus modelos de disipadores está basada en aquellos frecuentemente usados en estados variables de viscoplasticidad.

El modelo de Ozdemir para el disipador puede ser escrito de la siguiente manera:

$$\dot{F} = k_0 \dot{x} - k_0 \left| \dot{x} \left(\frac{F - B}{F_0} \right)^n \right| \quad (2.22)$$

$$\dot{B} = \alpha k_0 \left| \dot{x} \left(\frac{F - B}{F_0} \right)^n \right| \quad (2.23)$$

Siendo F la fuerza del disipador, x el desplazamiento y B la variable interna, que representa la fuerza de retorno. Los puntos sobrepuestos representan la diferenciación con respecto al tiempo o una cantidad pseudo tiempo. Los cuatro parámetros k_0 , F_0 , n y α son requeridos para definir la respuesta del disipador. En las ecuaciones 2.22 y 2.23, el exponente " n " es restringido a integradores impares, a pesar de que la forma de las ecuaciones pueden ser fácilmente generalizadas para permitir a " n " como cualquier numero real (Graesser y Cozzarelli, 1991).

Observe que la integración de las ecuaciones 2.22 y 2.23 en el tiempo es requerida para la determinación de la respuesta del disipador. Esto es más fácil realizarlo utilizando, por ejemplo, una fórmula Runge-Kuta de orden superior con tamaño de paso adaptivo (Press et al., 1992). Como una ilustración del

comportamiento potencial en la ecuación 2.22, considere la respuesta mostrado en la figura 2.16 debido a la variación sinusoidal del desplazamiento. Nótese de la figura 2.16,a que la respuesta es independiente del rango de desplazamiento. El parámetro k_0 representa la rigidez elástica inicial del dispositivo. Además, es evidente de la figura 2.16,b que el parámetro "n" controla la superficie de la rótula, mientras que α determina la curvatura en el rango inelástico como se muestra en la figura 2.16,c. Para $n \rightarrow \infty$, la idealización de la respuesta es un endurecimiento por deformación elástico-lineal.

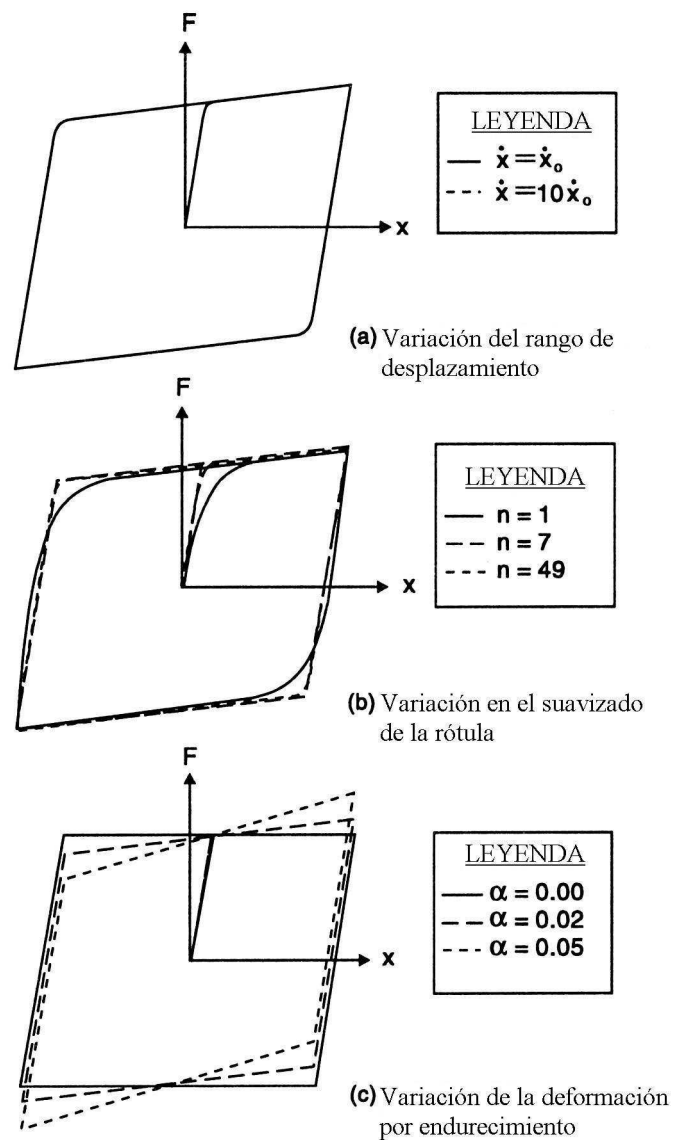


Fig. 2.16 Modelo radio-independiente de Ozdemir

Adicionalmente, cuando $\alpha = 0$, el modelo clásico plástico perfectamente elástico es recuperado. Se puede notar que la cantidad de energía disipada por el dispositivo pasivo modelado por las ecuaciones 2.22 y 2.23 pueden ser determinados fácilmente en cualquier instante vía integración numérica.

En el trabajo original de Ozdemir (1976), los parámetros del disipador k_0 , F_0 , n y α fueron seleccionados para proveer un mejor ajuste con los resultados experimentales para una carga sinusoidal de desplazamiento controlado. El modelo fue subsecuentemente verificado vía comparaciones que involucraban excitaciones de desplazamiento controlado y se encontró una buena relación con los modelos para magnitudes moderadas de desplazamiento.

Las extensiones de las ecuaciones 2.22 y 2.23 son también posibles para modelar respuestas cíclicas más complicadas. En particular, Ozdemir examinó modelos que incluían la deteorización del esfuerzo de fluencia, el módulo elástico y las características de endurecimiento al introducir variables internas adicionales. Estas versiones extendidas con pequeñas variaciones, tienen aplicación directa a muchos de los disipadores mecánicos actualmente en existencia. Además, algún cuidado es necesitado, desde que la estructura del modelo radio independiente de Ozdemir está cercanamente relacionado a versiones tempranas de la teoría de la plasticidad endocrónica (Valanis, 1971). Como un resultado, este modelo surge de algún defecto teórico presente en las formulaciones iniciales de Valanis (Rivlin, 1981). A pesar de que resultados estables son obtenidos, un control cuidadoso es necesario para aproximar soluciones que son obtenidas de aplicaciones de radio independiente.

Alternativamente, uno puede desarrollar un modelo basado en la analogía con los modelos populares de plasticidad de dos superficies (Dafalias y Popov, 1975; Krieg, 1975). Considere, por ejemplo, la siguiente versión uniaxial escrita en el espacio fuerza-deformación, donde dos distintas superficies de fluencia son definidas en el espacio fuerza, tal como se muestra en la figura 2.17. La carga, la cual separa los regímenes de respuesta elástico e inelástico, está caracterizada por su centro y radio representado por la fuerza anterior B y la fuerza de fluencia F_y^L , respectivamente. Asimismo, la superficie de borde, la cual completamente contiene la superficie interior más pequeña, está siempre centrada en el origen de la fuerza espacio con radio igual a una variable exterior de fluencia F_y^B . La traslación de la superficie interna corresponde al endurecimiento cinemático, mientras que la expansión de la superficie exterior produce endurecimiento isotrópico del dispositivo.

El criterio de fluencia, reglas de flujo y regla de endurecimiento están establecidas para asegurar que las fuerzas actuales F siempre descansen en ambas superficies, que todas las transiciones durante la carga sean suaves y que los ciclos de deformación infinitesimal no causen comportamientos anómalos. El

modelo, el cual requiere la determinación de seis parámetros del dispositivo (k , F_y^L , $F_{y_0}^B$, h_0^B , h_1^B y n) está definido en la tabla 2.2. Note que $F_{y_0}^B$ corresponde al valor inicial de F_y^B . Los valores de dichos parámetros pueden ser obtenidos de informaciones de respuesta cíclicas de disipadores fuerza-desplazamiento utilizando el algoritmo de Marquardt (1963) para ajustes de curvas no-lineales. Una similar aproximación, basado en un modelo de dos superficies, es descrito en la publicación de Popov et al. (1994).

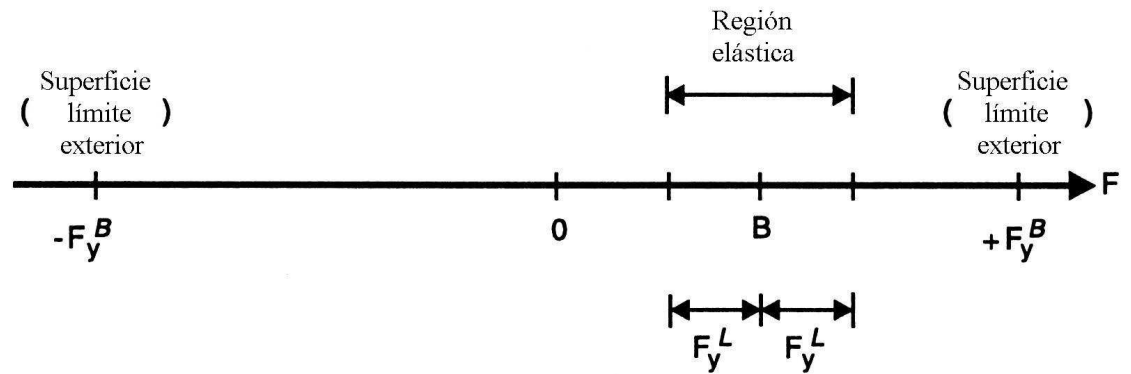


Fig. 2.17 Modelo fuerza-desplazamiento de dos superficies

La mayoría de los esfuerzos recientes de la modelación de los disipadores metálicos reportados en diversas investigaciones, han empleado representaciones más simplistas. Por ejemplo, uno encuentra numerosas aplicaciones de idealizaciones plásticas perfectamente-elásticas o modelo de Ramberg – Osgood (Su y Hanson, 1990; Xia y Hanson, 1992). El modelo de Ramberg – Osgood esencialmente establece una ley que relaciona el esfuerzo y la deformación inelástica y consecuentemente es efectiva en la modelación de la respuesta de una variedad de metales bajo carga monotónica. Otra característica que ha aparecido involucra formulaciones en donde el comportamiento inelástico es convertido en amortiguamiento viscoso lineal equivalente en la base de disipación de energía por ciclo (Hanson, 1993; Scholl, 1993). Estas aproximaciones simplificadas pueden ser apropiadas para el diseño preliminar.

Tabla 2.2

Modelo de dispositivo uniaxial de doble superficie

Si $|F - B| < F_y^L$ o $(F - B)\dot{x} \leq 0$, entonces

Carga elástica o descarga

$$\dot{F} = k \dot{x}$$

$$\dot{B} = 0$$

$$\dot{F}_y^B = 0$$

Además si $|F| < F_y^B$, entonces

Carga inelástica dentro de la superficie exterior

$$\dot{F} = [k^P / (k + k^P)] k \dot{x}$$

$$\dot{B} = \dot{F}$$

$$\dot{F}_y^B = 0$$

Donde

$$k^P = h^B (\beta / \gamma)^n$$

$$h^B = h_0^B + h_1^B F_y^B$$

$$\beta = F_y^B + F \operatorname{sgn}(\dot{x})$$

$$\gamma = 2F_y^B$$

Además

Carga inelástica en la superficie exterior

$$\dot{F} = [k^P / (k + k^P)] k \dot{x}$$

$$\dot{B} = \dot{F}$$

$$\dot{F}_y^B = |\dot{F}|$$

Donde

$$k^P = h^B$$

$$k^P = h^B + h_1^B F_y^B$$

Fin

2.2.2 DISIPADORES POR FRICCION

El mecanismo involucrado en la disipación de energía para disipadores metálicos puede ser categorizado como una forma de fricción interna. Por otro lado, la atención ahora se centrará en los disipadores que utilizan el mecanismo de fricción entre dos cuerpos sólidos deslizándose relativamente uno respecto al otro para proveer la disipación de energía deseada. Los efectos del amortiguamiento friccional en la respuesta de estructuras de edificios fue investigada por Mayes y Mowbray (1975), a pesar de que Keightley (1977) fue el primero en considerar dispositivos friccionales para aplicaciones de edificios. Subsecuentemente, basado principalmente a una analogía de los frenos de los automóviles, Pall et al., (1980) continuó con el desarrollo de disipadores friccionales pasivos para mejorar la respuesta sísmica de las estructuras. El objetivo es disminuir el movimiento de los edificios “frenando en vez de quebrando” (Pall y Marsh, 1982).

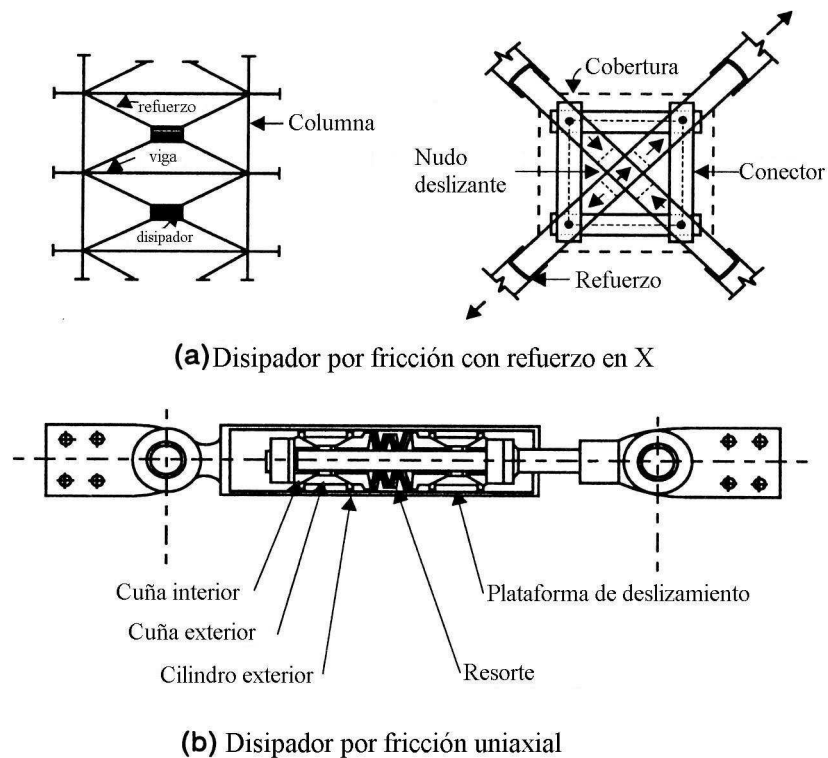


Fig. 2.18 Dispositivos friccionales representativos

Durante los últimos años han existido numerosas investigaciones y se han desarrollado un considerable número de dispositivos. En la figura 2.18 se muestran dos tipos representativos de disipadores friccionales. La figura 2.18,a muestra un diseño propuesto por Pall y Marsh (1982) para aplicaciones en conjunto con estructuras aporticadas con brazos diagonales. Otro dispositivo friccional, basado en un disipador industrial, es mostrado en la figura 2.18,b. Este dispositivo uniaxial fue probado por Aiken y Kelly (1990), donde las planchas de cobre se deslizan

sobre la superficie interna del cilindro de acero. La requerida fuerza normal es provista a través de la acción del resorte contra los bordes interior y exterior.

Mientras existan numerosas formas de fricción que pueden ser efectivamente utilizadas para mitigar el daño a las estructuras durante perturbaciones, todos los dispositivos a discutirse emplearán la fricción del deslizamiento del sólido, como su mecanismo disipativo básico. En los disipadores por fricción, el trabajo irrecuperable está hecho por la fuerza tangencial requerida para deslizar un cuerpo sólido a lo largo de la superficie de otro. Es naturalmente importante que una consistente y predecible respuesta friccional sea mantenida a lo largo de la vida del disipador. Esta respuesta depende de considerables condiciones de su superficie, la cual puede verse afectada por factores ambientales.

Los estudios científicos de fricción tienen una larga historia que data desde el trabajo de Da Vinci, Amontons y Coulomb. La teoría básica está basada en la hipótesis, la cual fue inicialmente usada para experimentos físicos involucrando deslizamiento plano de bloques rectilíneos:

1. La fuerza friccional total que puede ser desarrollada es independiente del área de superficie aparente de contacto.
2. La fuerza friccional total que puede ser desarrollada es proporcional a la fuerza normal actuando a lo largo de la interfase.
3. Para el caso de deslizamiento con bajas velocidades relativas, la fuerza friccional total es independiente de esa velocidad.

Como resultado de estas suposiciones, en el instante del deslizamiento independiente o durante el deslizamiento propiamente, se obtendrá:

$$F_t = \mu F_n \quad (2.24)$$

Donde:

F_t - fuerza friccional.

F_n - fuerza normal.

μ - coeficiente de fricción.

Como se puede apreciar, el coeficiente de fricción es un poco mayor cuando el deslizamiento es inminente, lo cual sucede durante el deslizamiento y son introducidos los coeficientes estático (μ_s) y cinético (μ_k). La fuerza friccional F_t actúa tangencialmente en el plano interfacial a la dirección opuesta al movimiento o impidiendo el movimiento.

Para extender la teoría a condiciones más generales, involucrando distribuciones no uniformes o superficies no planas, estas suposiciones básicas son frecuentemente abstraídas al límite infinitesimal. Las fuerzas totales son

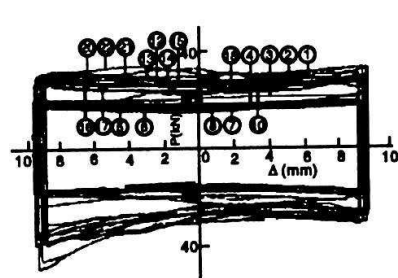
reemplazadas por tracciones de superficie y generalizando la ecuación 2.24 se obtiene en términos de las tracciones tangencial τ_t y normal τ_n .

$$\tau_t = \mu \tau_n \quad (2.25)$$

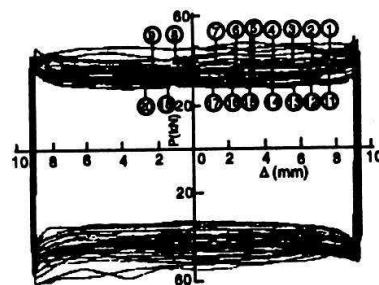
Esta forma también es útil para determinar los esfuerzos de contacto que son frecuentemente requeridos para el propio diseño. Note que una integración de la ecuación 2.25 sobre un área de contacto plano se transforma en la ecuación 2.24.

El concepto de la fricción de Coulomb, como se describió arriba, provee las bases teóricas para la mayoría de investigaciones que han aparecido con respecto a los disipadores por fricción. Por otra parte, se debe de entender que los procesos friccionales son simples. En la práctica, la teoría de Coulomb es solamente cierta en forma aproximada. El coeficiente de fricción μ , el cual aparece en las ecuaciones 2.24 y 2.25, no debe ser visto como una constante. El coeficiente de fricción μ , es un parámetro variable que depende no solamente de la selección de los materiales deslizantes, sino también de la condición presente en la superficie de interfase. Esta dependencia posteriormente incrementa notoriamente la complejidad de la modelación del problema, a partir de que las superficies son frecuentemente el sitio de numerosos procesos físicos y químicos. Estos procesos pueden cambiar las características físicas y químicas de las superficies y consecuentemente producir un impacto significativo en la respuesta friccional a través del cambio en el área verdadera de contacto. En particular, el uso de planchas galvánicas (acero y cobre) debe ser evitado y medidas adicionales de protección deben ser empleadas en condiciones ambientales para prevenir la corrosión.

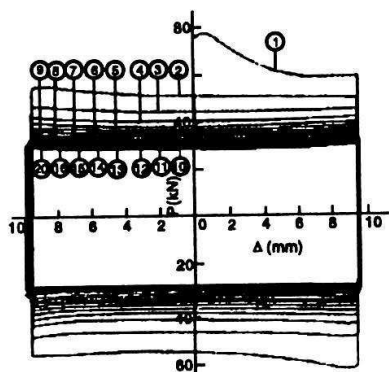
Considerables esfuerzos han sido directamente orientados hacia el desarrollo de un moderno mecanismo para la fricción sólida, el cual tiende a un mejoramiento cualitativo del entendimiento del proceso, debido a que un cálculo cuantitativo de la respuesta friccional desde el principio no es todavía posible. A partir de que no hay todavía una teoría para la fricción por deslizamiento comparable con la bien establecida teoría de plasticidad de metales, existe una necesidad por mayor cantidad de ensayos físicos. De acuerdo a esto, Pall et al. (1980) comenzó con su desarrollo de disipadores por fricción conduciendo ensayos estáticos y dinámicos en una variedad de elementos simples de deslizamiento teniendo diferentes tratamientos en su superficie. Su objetivo no era necesariamente obtener la máxima disipación de energía, sino identificar un sistema que posea una consistente y predecible respuesta. Para estos ensayos, el contacto fue mantenido entre las dos caras de la superficie pretensionándolas con pernos de alta resistencia. El resultado de las curvas carga-desplazamiento obtenidas bajo amplitud de carga cíclica constante de desplazamiento controlado es mostrado en la figura 2.19.



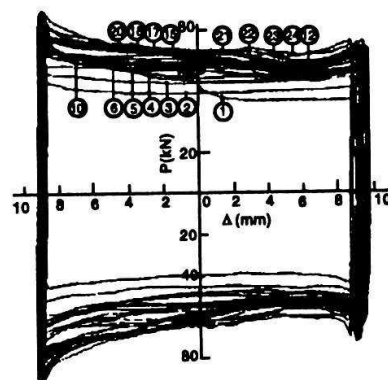
(a) Escala Mill



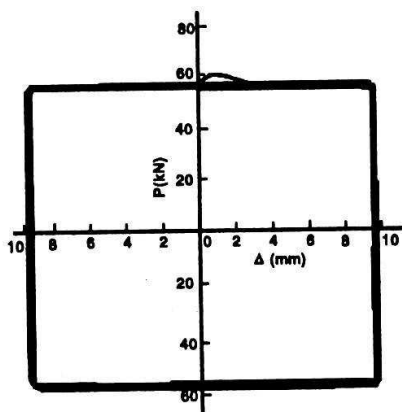
(b) Arena



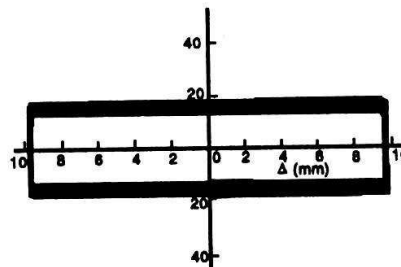
(c) Pintado inorgánico rico en Zinc



(d) Metalizado



(e) Plataforma de freno



(f) Revestimiento de Polietileno

Fig. 2.19 Lazos histeréticos de superficies limitadas por uniones emperradas

En las superficies consideradas por Pall et al. (1980), las superficies conteniendo planchas pesadas de frenos insertadas entre las laminas de acero proporcionaron una consistente y predecible respuesta. Basado en el comportamiento obtenido por Pall et al. (1980) e ilustrado en la figura 2.19, e la caracterización de su sistema friccional simple de línea de freno en términos de un modelo plástico perfectamente elástico es apropiado. Incluso una forma limitada del modelo de Ozdemir puede ser utilizada como explicación del modelo simple de plasticidad de superficie única definida en la tabla 2.3 puede ser adoptada, donde k_0 y F_s representan la rigidez elástica y la carga de deslizamiento.

Tabla 2.3

Modelo del dispositivo plástico perfectamente elástico

Si $ F < F_s$ o $F\dot{x} \leq 0$, entonces
Elástico
$\dot{F} = k_0 \dot{x}$
Deslizamiento
$\dot{F} = 0$
Fin

En algunos disipadores por fricción, un estado de comportamiento rígido ocurre para desplazamientos cercanos a una superficie de deslizamiento dada. Un modelo histerético para ese caso es definido en la tabla 2.4, donde los parámetros adicionales x_b y k_2 representan el desplazamiento total al primer contacto con la superficie y la rigidez. El modelo, el cual asume rigidez cero durante el deslizamiento ($k_1 = 0$), es especificado en una razón de forma para describir apropiadamente las arbitrarias historias de carga y descarga. Un resultado típico para los ciclos de desplazamiento controlado a dos diferentes amplitudes es mostrado en la figura 2.20, donde todos los parámetros del modelo son detallados.

Tabla 2.4

Modelo de dispositivo histerético con límites simétricos

Si $ F < F_s$ o $\left(F\dot{x} \leq 0 \text{ y } x \leq x_b \right)$, entonces
Elástico
$\dot{F} = k_0 \dot{x}$
Además, si $ x < x_b$, entonces
Deslizamiento
$\dot{F} = 0$
Comportamiento
$\dot{F} = k_2 \dot{x}$
Fin

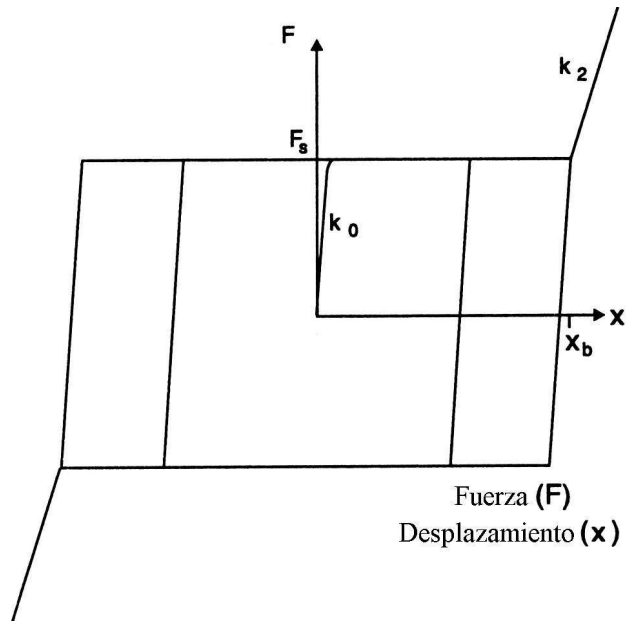


Fig. 2.20 Elemento de fricción de Coulomb

2.3 AMORTIGUAMIENTO Y RIGIDEZ EQUIVALENTE

Los coeficientes de amortiguamiento viscoso equivalente y rigidez están agrupadas en la tabla 2.5.

Tabla 2.5
Coeficientes de amortiguamiento viscoso equivalente y rigidez
a) Disipadores histeréticos (fluencia)

Modelo	Elastoplástico
Amortiguamiento equivalente (C_d)	$0, d_0 < d_y$
Rigidez equivalente (k_d)	$k_e, d_0 < d_y$
Modelo	Bilineal
Amortiguamiento equivalente (C_d)	$4(k_e - k_h)d_y(d_0 - d_y)\Gamma/(2\pi^2 d_0^2), d_0 \geq d_y$
Rigidez equivalente (k_d)	$[k_e d_y + k_h(d_0 - d_y)]/d_0, d_0 \geq d_y$
Modelo	Polinomial
Amortiguamiento equivalente (C_d)	$4d_y p_y T[(r-1)/(r+1)](p_0/p_y)^{r+1}/(2\pi^2 d_0^2)$
Rigidez equivalente (k_d)	$p_0/d_0, d_0/d_y = p_0/p_y + \alpha(p_0/p_y)^r$

b) Disipadores histeréticos (fricción)

Modelo	Elastoplástico
Amortiguamiento equivalente (C_d)	$4p_y d_0 T/(2\pi^2 d_0^2)$
Rigidez equivalente (k_d)	Rigidez del brazo (sin deslizamiento) 0 (durante el deslizamiento)

c) Disipadores viscoelásticos (sólidos)

Amortiguamiento equivalente (C_d)	$AG''(\omega)/\omega h$
Rigidez equivalente (k_d)	$AG'(\omega)/h$

d) Disipadores fluidos (viscoso)

Modelo	No-lineal
Amortiguamiento equivalente (C_d)	$\lambda c_v(\omega)\omega^{\alpha-1}d_0^{\alpha-1}/\pi$
Rigidez equivalente (k_d)	0
Modelo	Lineal
Amortiguamiento equivalente (C_d)	$c_v(\omega)$
Rigidez equivalente (k_d)	0

CAPITULO 3

ANALISIS SISMICO DE EDIFICIOS CON DISIPADORES DE ENERGIA

3.1 OBJETO DE INVESTIGACION

En el presente capítulo analizaremos una edificación típica de concreto armado de 3 pisos. La estructura consta de 3 vanos de sistema aporticado de diferentes dimensiones en ambos sentidos y con losas aligeradas de concreto armado de 0,20m de espesor en los entrepisos. La dimensión total en planta en el eje X es de 12m y en el eje Y de 18m, con una altura total de 9,50m.

Como se sabe, las fuerzas horizontales son resistidas principalmente por los diafragmas rígidos verticales, debido a que la parte principal de la fuerza horizontal es transmitida a dichos elementos y el restante la recibe el sistema aporticado. Con la inclusión de los disipadores de energía en la estructura, gran parte de la fuerza horizontal será resistida por los disipadores de energía con la consecuente disminución e incluso eliminación de los diafragmas rígidos verticales.

Las características consideradas en el análisis sísmico de la estructura de concreto armado se muestran en las figuras 3.1 y 3.2. El edificio presenta una altura del primer piso de 3,5m y del segundo y tercer piso de 3,0m. En el modelo utilizado, la distancia horizontal entre columnas del eje OX es de 4,0m y la distancia horizontal entre columnas del eje OY es de 6,0m. Se realizó el metrado de cargas del edificio, considerando una sobrecarga de 250kg/m^2 con lo que se obtuvieron los resultados de los pesos de cada piso y su respectiva masa por piso. Las alturas de los entrepisos, pesos y masas utilizados en el modelo se muestran en la tabla 3.1. Las dimensiones de los elementos se muestran en la tabla 3.2.

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

- | | |
|---|-------------------------------|
| - Resistencia a compresión del concreto | $f'_c = 210\text{kg/cm}^2$ |
| - Módulo de elasticidad del concreto | $E_c = 217371\text{kg/cm}^2$ |
| - Peso específico del concreto | $\gamma = 2400\text{kg/m}^3$ |
| - Coeficiente de Poisson del concreto | $\nu = 0,20$ |
| - Esfuerzo de fluencia del acero | $f_y = 4200\text{kg/cm}^2$ |
| - Módulo de elasticidad del acero | $E_s = 2000000\text{kg/cm}^2$ |

En la tabla 3.3 se muestran los períodos, frecuencias y masas participativas para el caso del edificio sin disipadores de energía, habiéndose elegido 12 modos o formas de vibración libre.

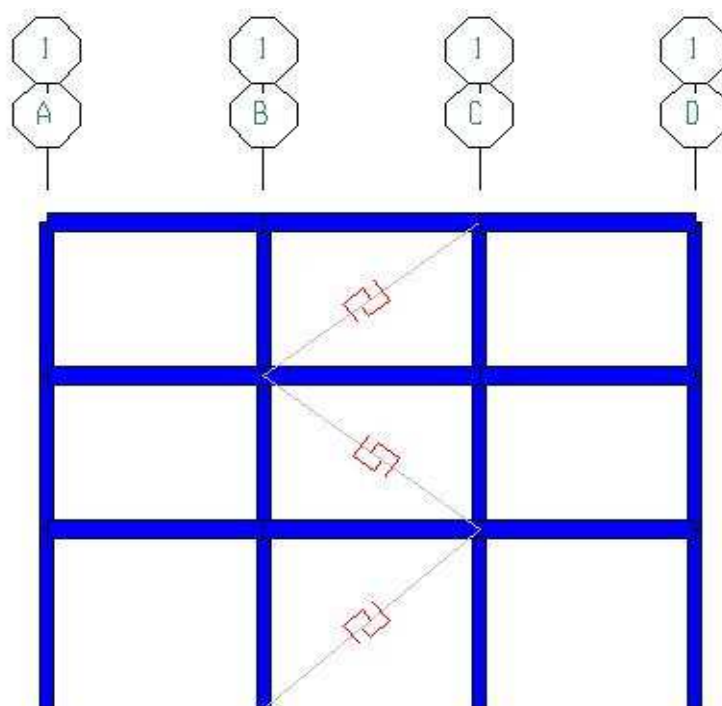


Fig. 3.1 Vista lateral del modelo en el eje OX

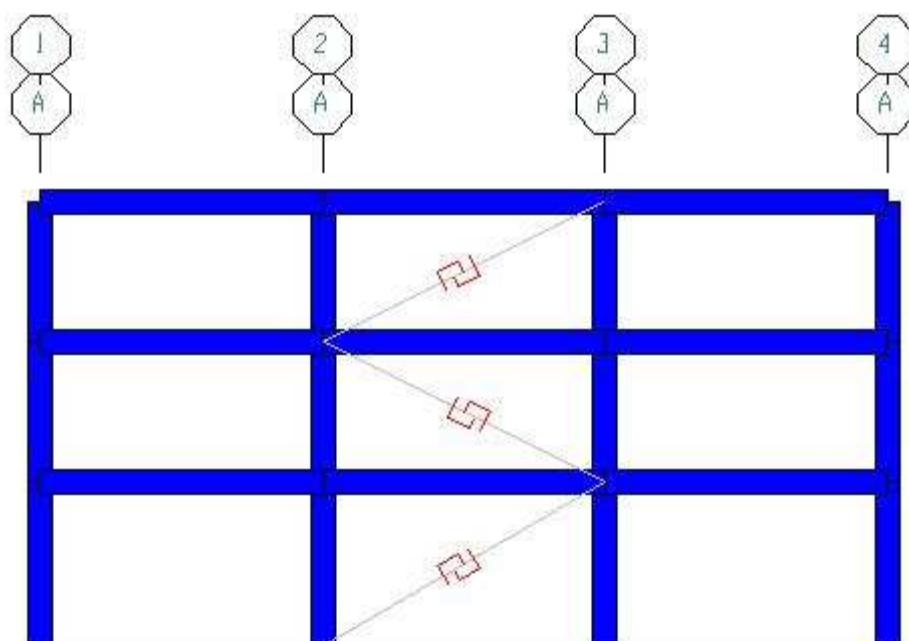


Fig. 3.2 Vista lateral del modelo en el eje OY

Tabla 3.1

Alturas, pesos, masas traslacionales y rotacionales

Piso	Altura (m)	Peso (T)	Masa traslacional (T.s ² /m)	Masa rotacional (T.s ² .m)
1	3,5	159,51	16,26	634,13
2	3,0	158,61	16,17	630,55
3	3,0	116,34	11,86	462,50

Tabla 3.2

Dimensiones de los elementos

Ejes	Distancia (cm)	Viga (cm)	Columna (cm)
A – B	400	25 x 50	25 x 50
B – C	400	25 x 50	25 x 50
C – D	400	25 x 50	25 x 50
1 – 2	600	20 x 35	50 x 25
2 – 3	600	20 x 35	50 x 25
3 – 4	600	20 x 35	50 x 25

Tabla 3.3

Períodos, frecuencias y masas participativas

Modo	Período (s)	Frecuencia (cic/s)	UX	UY	RZ	SumUX	SumUY	SumRZ
1	0,906	1,104	0,912	0,000	0,027	0,912	0,000	0,027
2	0,568	1,761	0,004	0,100	0,819	0,916	0,100	0,846
3	0,502	1,991	0,000	0,801	0,063	0,916	0,901	0,909
4	0,281	3,559	0,073	0,000	0,002	0,989	0,901	0,911
5	0,175	5,730	0,000	0,008	0,072	0,989	0,909	0,983
6	0,158	6,320	0,011	0,000	0,000	1,000	0,909	0,983
7	0,153	6,554	0,000	0,077	0,004	1,000	0,986	0,987
8	0,096	10,366	0,000	0,001	0,012	1,000	0,987	0,999
9	0,083	12,091	0,000	0,013	0,001	1,000	1,000	1,000
10	0,027	36,493	0,000	0,000	0,000	1,000	1,000	1,000
11	0,027	37,102	0,000	0,000	0,000	1,000	1,000	1,000
12	0,027	37,221	0,000	0,000	0,000	1,000	1,000	1,000

Para el análisis inelástico del edificio con el dissipador de energía seleccionado con el mejor comportamiento mostrado según los resultados de los análisis previos realizados, se consideraron las áreas de acero de los elementos estructurales para la formación de rótulas plásticas en los elementos analizados. Para la obtención de las áreas de acero de los elementos se tomaron en consideración las Normas Peruanas de Estructuras y el Código del ACI.

Estas áreas de acero corresponden al refuerzo longitudinal por flexión y son suficientes para definir las propiedades plásticas de la sección. Se debe tener en consideración que para el diseño final es necesario definir el refuerzo por corte de manera que se garantice un comportamiento adecuado de la estructura.

3.2 REGISTRO SISMICO

Se consideró un registro sísmico completo para la realización de los análisis sísmicos con los dissipadores de energía. Los datos del registro sísmico de Lima del 17 de octubre de 1966 fueron proporcionados por Sistema Nacional de Datos Geofísicos del Instituto Geofísico del Perú. El registro sísmico seleccionado es uno de los más representativos y frecuentemente utilizado para el diseño sísmico en el Perú. Presenta una aceleración máxima de $269,3\text{cm/s}^2$, una velocidad de $21,6\text{cm/s}$ y un desplazamiento de $16,3\text{cm}$. El gráfico del acelerograma seleccionado se muestra en la figura 3.3 y su espectro de respuesta con amortiguaciones al 0%, 2%, 5%, 10% y 20% de amortiguamiento son mostrados en las figuras 3.4 y 3.5.

El registro sísmico completo tiene intervalos de tiempo de $0,02\text{s}$, y cuenta con un total de 3282 pasos, lo que nos da un tiempo total de duración de $65,6\text{s}$.

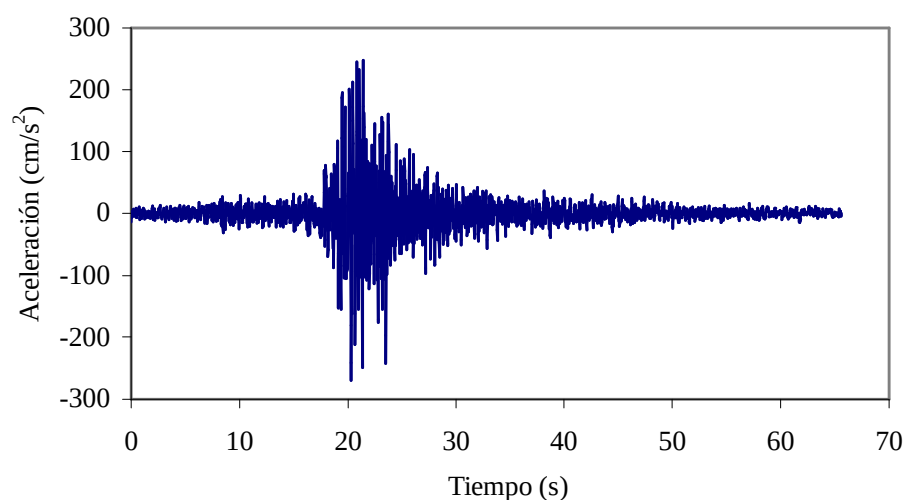


Fig. 3.3 Registro completo de Lima, Perú, I.G.P. 17/10/66 comp. N08E

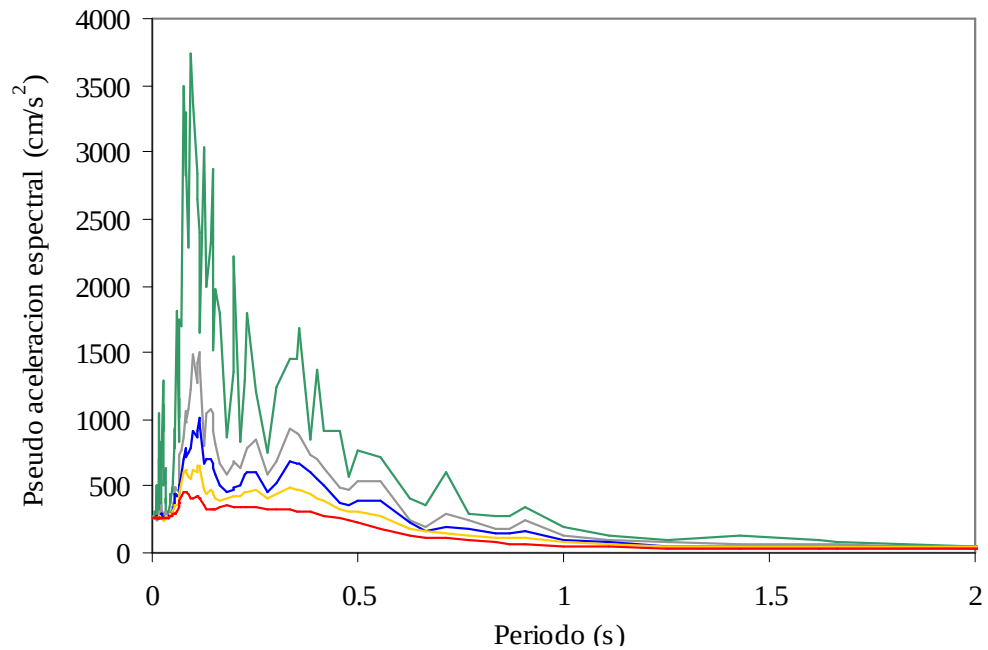


Fig. 3.4 Espectro de aceleraciones
Lima, Perú, I.G.P. 17/10/66 comp. N08E
Amortiguamientos: 0%, 2%, 5%, 10% y 20%
Registro completo

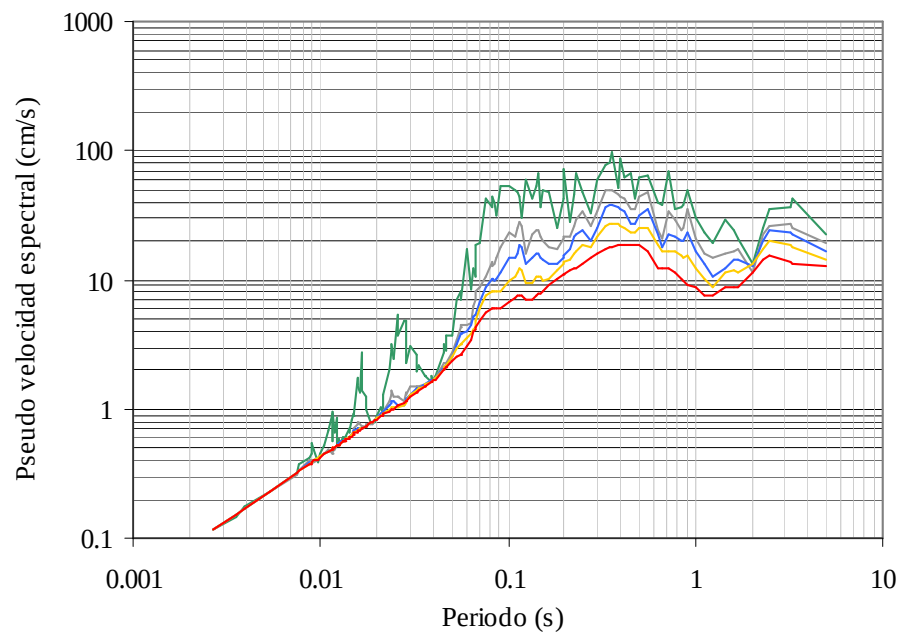


Fig. 3.5 Espectro de velocidades
Lima, Perú, I.G.P. 17/10/66 comp. N08E
Amortiguamientos: 0%, 2%, 5%, 10% y 20%
Registro completo

3.3 MODELACION DEL EDIFICIO POR EL PROGRAMA SAP2000

En el modelo, se utilizaron brazos rígidos para modelar la unión de las columnas con las vigas. Estas barras de rigidez equivalente utilizan brazos de rigidez absolutamente rígidos en una distancia del 50% de la longitud total elemento.

Los ejes locales de los elementos los coloca el programa SAP2000, teniendo en cuenta que el eje local 1 es el eje longitudinal, el eje local 2 es el eje transversal al eje 1 y está orientado en el sentido de la mayor dimensión del elemento y el eje 3 es el eje perpendicular al eje 2.

Haciendo uso de la opción DIAPHRAGM CONSTRAINT se consideró en el modelo del edificio los diafragmas rígidos en el plano horizontal, con lo que se estaría analizando el movimiento de los nudos de una manera dependiente por piso del centro de masas de dicho nivel.

Según la Norma Peruana de Diseño Sismorresistente E030-2006, los centros de masas de cada nivel se encuentran ubicados en el centroide del área con una excentricidad accidental del 5% de la dimensión perpendicular a la dirección de análisis.

$$e_x = 0,05 \cdot 12,00\text{m} = 0,60\text{m} \text{ (excentricidad accidental en el eje X)}$$

$$e_y = 0,05 \cdot 18,00\text{m} = 0,90\text{m} \text{ (excentricidad accidental en el eje Y)}$$

Además en cada piso se debe de introducir en el programa SAP2000 las masas traslacionales y rotacionales, cuyos valores se muestran en la tabla 3.1.

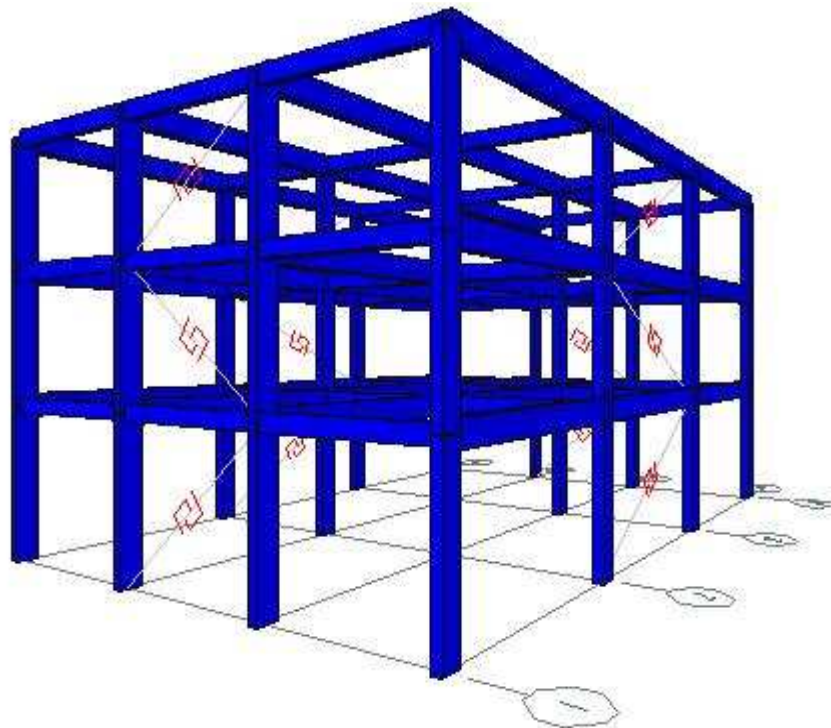


Fig. 3.6 Modelo tridimensional de la edificación

En la figura 3.6 se muestra una vista tridimensional del modelo del edificio realizado en el programa SAP2000, en donde se ha tenido en consideración para la elaboración del modelo lo escrito líneas arriba.

En la figura 3.7 se muestra la distribución de los elementos de concreto armado de todo el edificio, del primer al tercer piso. También se muestran los disipadores de energía considerados en el modelo.

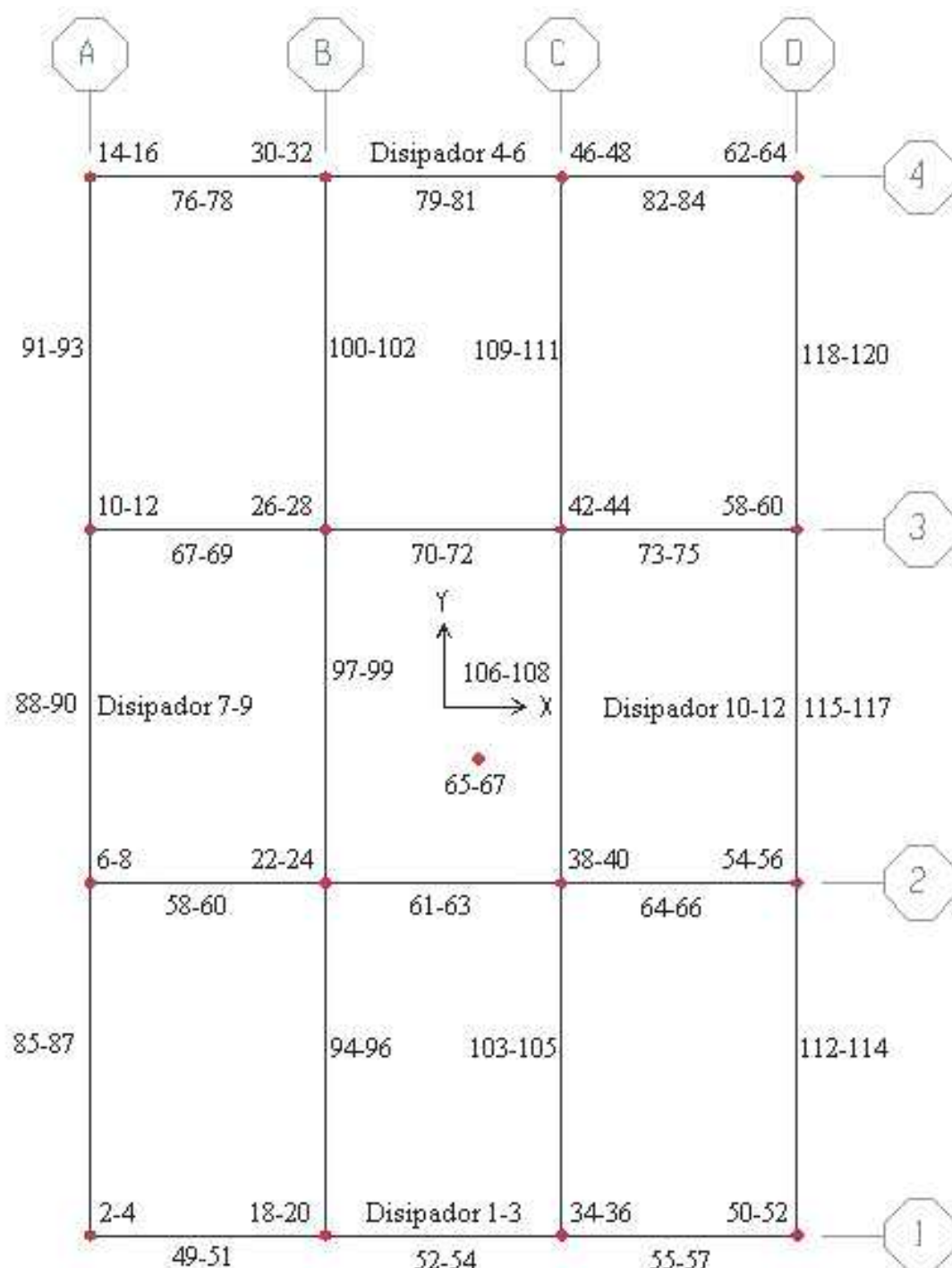


Fig. 3.7 Distribución de los elementos y disipadores del edificio del 1er al 3er piso

Para los análisis dinámicos realizados se consideraron todos los nudos de la base como perfectamente empotrados.

El modelo del edificio se analizó bajo la acción sísmica de un registro sísmico completo, el cual corresponde al sismo de Lima del año 1966, ejecutándose el análisis tiempo-historia, por medio de la opción TIME HISTORY ANALYSIS e ingresando los valores del tiempo y sus aceleraciones en un intervalo de tiempo de 0,02s a través de la función TIME HISTORY CASE DATA.

Se eligieron 12 modos de vibración de la estructura y se introdujo al programa SAP2000 a través de la función DYNAMIC ANALYSIS PARAMETERS, considerando un tipo de análisis modal de vector propio.

3.4 DISEÑO DE LOS DISPOSITIVOS PASIVOS DE DISIPACION DE ENERGIA

3.4.1 DISIPADORES VISCOSOS NO-LINEALES

Determinamos la amplitud de desplazamiento por medio de la siguiente relación:

$$D_{\text{roof}} = \frac{10gr_1S_{d1}T_1}{4\beta_{1D}\pi^2}$$

$$D_{\text{roof}} = \frac{(10).(981).(1,26949).(0,40).(0,906)}{(4).(1,20).(3,14)^2} = 95,36\text{mm}$$

Donde:

D_{roof} - amplitud de desplazamiento.

g - aceleración de la gravedad.

r_1 - factor de participación del modo fundamental de vibración.

S_{d1} - aceleración espectral del sismo de diseño.

T_1 - período del primer modo de vibración.

β_{1D} - coeficiente de amortiguamiento.

Luego, calculamos el coeficiente de amortiguamiento viscoso equivalente:

$$C_d = \frac{\beta_{vi}(D_{\text{roof}})^{1/2} \left[\sum (\omega_i \phi_{r1}^2) \right] 322,46}{(\lambda / 2\pi)(T_1 / 2\pi)^{3/2} (10g)(\cos^{3/2} \theta) \cdot \left(\sum \{\phi_{r1}\}^{3/2} \right)}$$

$$C_d = \frac{(0,40).(95,36)^{1/2} \cdot (11430,09) \cdot (0,032246)}{(3,496 / 2\pi)(0,906 / 2\pi)^{3/2} \cdot (9810) \cdot (0,741) \cdot (0,5983)} = 10,85\text{T.s} / \text{m}$$

Donde:

C_d - coeficiente de amortiguamiento viscoso equivalente.

β_{vi} - radio de amortiguamiento proveído por el sistema de amortiguamiento.

ω_i - peso tributario por piso.

ϕ_{r1} - desplazamiento del primer modo de vibración.

λ - parámetro dependiente del exponente.

θ - ángulo de inclinación de los disipadores.

De esta manera, la rigidez del disipador se obtendrá por la relación:

$$K_d = \frac{C_d}{10.(\Delta t)} = \frac{10,85}{10.(0,02)} = 54,25 \text{ T / m}$$

Donde:

K_d - rigidez del disipador.

Δt - intervalo de tiempo del registro sísmico.

3.4.2 DISIPADORES VISCOELASTICOS SÓLIDOS

Determinamos la rigidez del disipador viscoelástico, mediante la siguiente fórmula:

$$K_d = \frac{2\beta K_e}{(\eta - 2\beta)\alpha_d}$$

$$K_d = \frac{2.(0,18).(1429)}{(1,39 - 2.0,18).(0,566)} = 882,43 \text{ T / m}$$

Donde:

K_d - rigidez del disipador viscoelástico.

K_e - rigidez de la estructura sin disipadores.

β - radio de amortiguamiento adicionado.

η - factor de pérdida e igual a la relación $G''(\omega) / G'(\omega)$

α_d - coeficiente de acoplamiento del disipador a la estructura.

Posteriormente, calculamos el área del disipador viscoelástico:

$$A = \frac{K_d h}{G'(\omega)}$$

$$A = \frac{(882,43).(0,0157)}{(126,54)} = 0,11 \text{ m}^2$$

Siendo:

A - área del disipador viscoelástico.

h - espesor del disipador.

$G'(\omega)$ - módulo de almacenamiento de corte del material.

Luego, determinamos el coeficiente de amortiguamiento viscoso equivalente:

$$C_d = \frac{AG''(\omega)}{(2\pi / T_1)h}$$

$$C_d = \frac{(0,11).(175,75)}{(2\pi / 0,906).(0,0157)} = 177,65 \text{ T.s / m}$$

Donde:

C_d - coeficiente de amortiguamiento viscoso equivalente.

$G''(\omega)$ - módulo de pérdida de corte del material.

T_1 - período del primer modo de vibración.

3.4.3 DISIPADORES POR FRICCION

Determinamos la fuerza de deslizamiento, utilizando la siguiente relación:

$$P_y = \frac{C_j \cdot 2\pi^2 \cdot d_0}{4\alpha_d \cdot T_1}$$

$$P_y = \frac{(10) \cdot (2\pi^2) \cdot (0,0302)}{4 \cdot (0,566) \cdot (0,906)} = 2,90T$$

Donde:

P_y - fuerza de deslizamiento.

C_j - radio de amortiguamiento lineal viscoso bajo condiciones elásticas.

d_0 - máximo desplazamiento de diseño del disipador.

α_d - coeficiente de sujeción de ensamblaje del disipador.

T_1 - período del primer modo de vibración.

Luego, calculamos la rigidez del disipador:

$$K_d = 17,5K_e$$

$$K_d = 17,5 \cdot 1429 = 25007,5T/m$$

Donde:

K_d - rigidez del disipador.

K_e - rigidez de la estructura sin disipadores.

Posteriormente, determinamos el coeficiente de amortiguamiento:

$$C_d = \frac{4P_y d_0 T_1}{2\pi^2 d_0^2}$$

$$C_d = \frac{4 \cdot (2,90) \cdot (0,0302) \cdot (0,906)}{2\pi^2 \cdot (0,0302)^2} = 17,65T.s/m$$

3.4.4 DISIPADORES POR PLASTIFICACION DE METALES

Calculamos la rigidez del disipador por plastificación, a través de la siguiente relación:

$$K_{di} = \frac{NEbt^3}{6h^3 \cos \theta}$$

$$K_{di} = \frac{2(30400000).(0,305).(0,03873)^3}{6.(0,457)^3.\cos 41,18^0} = 2500T / m$$

Donde:

K_{di} - rigidez del disipador por plastificación.

N - número asumido de disipadores.

E - módulo de elasticidad.

b - base del disipador por fluencia.

t - espesor asumido del disipador por fluencia.

h - altura del disipador por fluencia.

θ - ángulo de inclinación de los disipadores.

Luego, determinamos la fuerza de fluencia de los disipadores:

$$V_{di} = \frac{N.f_y.10b.t^2}{4h \cos \theta}$$

$$V_{di} = \frac{2.(488).(10).(0,305).(0,03873)^2}{4.(0,457).\cos 41,18^0} = 3,25T$$

Siendo:

V_{di} - fuerza de fluencia de los disipadores.

f_y - esfuerzo de fluencia asumido del disipador.

Posteriormente, calculamos el desplazamiento de fluencia de los disipadores:

$$\Delta_{yi} = \frac{1,5f_y.10h^2}{Et \cos \theta}$$

$$\Delta_{yi} = \frac{1,5.(488).(10).(0,457)^2}{30400000.(0,03873).\cos 41,18^0} = 0,00173m$$

Donde:

Δ_{yi} - desplazamiento de fluencia de los disipadores.

En consecuencia, la rigidez elástica inicial será:

$$K_e = \frac{V_{di}}{\Delta_{yi}}$$

$$K_e = \frac{3,25}{0,00173} = 1878,61T / m$$

Donde:

K_e - rigidez elástica inicial.

Determinamos el coeficiente de amortiguamiento utilizando la siguiente relación:

$$C_d = \frac{4(K_e - K_h) \cdot \Delta_{yi} \cdot (d_0 - \Delta_{yi}) \cdot T_1}{2\pi^2 d_0^2}$$

$$C_d = \frac{4(1878,61 - 188,12) \cdot (0,00173) \cdot (0,005 - 0,00173) \cdot (0,906)}{2\pi^2 \cdot (0,005)^2} = 70,30 \text{ T.s/m}$$

Donde:

C_d - coeficiente de amortiguamiento.

K_h - rigidez de deformación – endurecimiento.

d_0 - máximo desplazamiento de diseño del dissipador.

T_1 - período del primer modo de vibración.

En la tabla 3.4 se muestran los valores de los diseños realizados a cada uno de los dissipadores de energía, los cuales son los solicitados por el programa SAP2000 para los análisis respectivos, teniéndose en cuenta la siguiente nomenclatura:

VD (dissipadores viscosos no-lineales)

VE (dissipadores viscoelásticos sólidos)

FD (dissipadores por fricción)

YD (dissipadores por plastificación de metales o fluencia)

Tabla 3.4

Propiedades de los dissipadores de energía utilizados para el análisis no-lineal

Nº	Coeficiente de amortiguamiento (T.s/m)	Exponente de amortiguamiento	Rigidez (T/m)	Fluencia (T)	Radio de rigidez post-fluencia	Exponente de fluencia
VD	10,85	0,5	54,25	-	-	-
VE	177,65	1,0	882,43	-	-	-
FD	-	-	25007,5	2,9	0,000	0,5
YD	-	-	2500	3,25	0,025	2,0

3.5 RESULTADOS DE LA INVESTIGACION NUMERICA

A continuación se muestran los resultados de los análisis tiempo-historia del edificio con los dissipadores de energía. En la tabla 3.5 se muestran los períodos de las 12 primeras formas de vibración de la estructura inicial sin la inclusión de dissipadores (SD) y la estructura considerando los cuatro tipos de dissipadores utilizados. Asimismo, en la tabla 3.6 se muestran las 12 primeras frecuencias angulares de los mismos modelos.

Tabla 3.5

REGISTRO SISMICO DE LIMA 17/10/1966												
N°	Período de vibración por la forma (s)											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
SD	0,906	0,568	0,502	0,281	0,175	0,158	0,153	0,096	0,083	0,027	0,027	0,027
VD	0,906	0,568	0,502	0,281	0,175	0,158	0,153	0,096	0,083	0,027	0,027	0,027
VE	0,815	0,510	0,473	0,259	0,160	0,150	0,147	0,091	0,081	0,027	0,027	0,027
FD	0,382	0,286	0,218	0,128	0,095	0,079	0,074	0,058	0,046	0,027	0,027	0,027
YD	0,705	0,457	0,418	0,230	0,145	0,138	0,135	0,084	0,078	0,027	0,027	0,027

Tabla 3.6

REGISTRO SISMICO DE LIMA 17/10/1966												
N°	Frecuencia angular por la forma (rad/s)											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
SD	6,94	11,06	12,51	22,36	36,00	39,71	41,18	65,13	75,97	229,29	233,12	233,87
VD	6,94	11,06	12,51	22,36	36,00	39,71	41,18	65,13	75,97	229,29	233,12	233,87
VE	7,71	12,32	13,27	24,26	39,15	41,90	42,86	68,79	77,67	229,29	233,13	233,89
FD	16,45	21,98	28,86	49,25	65,96	79,34	85,24	108,16	135,70	229,35	233,32	234,03
YD	8,91	13,74	15,05	27,32	43,34	45,65	46,62	74,71	81,07	229,30	233,15	233,92

Los desplazamientos laterales máximos y las distorsiones respectivas en ambas direcciones y por niveles de los modelos analizados sin disipadores y con la inclusión de los cuatro tipos de disipadores analizados se muestran en la tabla 3.7.

La Norma Peruana de Diseño Sismorresistente E030-2006, menciona que los desplazamientos elásticos, en nuestro caso calculados con el programa SAP2000 con las solicitaciones sísmicas reducidas se deben multiplicar por el coeficiente de reducción de fuerza sísmica 0,75R para obtener los desplazamientos laterales. En la tabla 3.7 se dan los desplazamientos inelásticos totales.

En la tabla 3.8, se muestran los resultados de las fuerzas axiales máximas, fuerzas cortantes máximas, momentos flectores máximos y momentos torsores máximos para todas las columnas del primer piso del edificio considerando los cuatro tipos de disipadores analizados.

En la tabla 3.9 se muestran los resultados obtenidos de la fuerza axial máxima, fuerza cortante máxima, momento flector máximo y momento torsor máximo, mostrando entre paréntesis la nomenclatura de la columna del primer piso de mayor solicitación sísmica de cada modelo considerado.

Tabla 3.7
Desplazamientos y distorsiones máximas

Nº	Estructura	Piso	Desplazamiento		Distorsión	
			$X_{\text{máx}}$ (cm)	$Y_{\text{máx}}$ (cm)	$\Delta x_{\text{máx}}$	$\Delta y_{\text{máx}}$
SD	Sin disipadores	3	7,15	5,12	0,0043	0,0034
		2	5,86	4,09	0,0081	0,0062
		1	3,43	2,22	0,0098	0,0063
VD	Disipadores viscosos no-lineales	3	4,19	4,56	0,0024	0,0031
		2	3,47	3,64	0,0046	0,0055
		1	2,09	1,99	0,0060	0,0057
VE	Disipadores viscoelásticos sólidos	3	4,67	4,05	0,0031	0,0027
		2	3,76	3,23	0,0055	0,0049
		1	2,10	1,77	0,0060	0,0050
FD	Disipadores por fricción	3	4,43	4,49	0,0028	0,0030
		2	3,59	3,60	0,0049	0,0055
		1	2,11	1,96	0,0060	0,0056
YD	Disipadores por plastificación de metales (fluencia)	3	4,61	3,93	0,0030	0,0028
		2	3,72	3,10	0,0054	0,0049
		1	2,10	1,63	0,0060	0,0047

Tabla 3.8
Fuerzas internas máximas de las columnas del primer piso

Nº	Estructura	Fuerzas internas			
		$N_{\text{máx}}$ (T)	$V_{\text{máx}}$ (T)	$M_{\text{máx}}$ (T.m)	$M_{t,\text{máx}}$ (T.m)
SD	Sin disipadores	247,53	289,97	618,12	8,64
VD	Dis. Viscosos NL	192,89	260,26	555,24	5,92
VE	Dis. Viscoelásticos	211,75	262,85	555,53	5,93
FD	Dis. Fricción	205,96	261,97	558,05	4,92
YD	Dis. Fluencia	196,26	255,36	546,39	4,56

Tabla 3.9

Fuerzas internas máximas de la columna del primer piso

Nº	Estructura	Columna			
		$N_{\text{máx}}$ (T)	$V_{\text{máx}}$ (T)	$M_{\text{máx}}$ (T.m)	$M_{t,\text{máx}}$ (T.m)
SD	Sin disipadores	29,24 (2,62)	23,00 (6,10)	46,57 (6,10)	0,54 (varios)
VD	Dis. Viscosos NL	23,55 (2,62)	20,69 (6,10)	41,81 (6,10)	0,37 (varios)
VE	Dis. Viscoelásticos	22,52 (18,46)	18,55 (6,10)	37,32 (6,10)	0,37 (varios)
FD	Dis. Fricción	23,70 (2,62)	20,26 (6,10)	41,04 (6,10)	0,31 (varios)
YD	Dis. Fluencia	23,44 (2,62)	15,39 (6,10)	34,45 (6,10)	0,28 (varios)

Tabla 3.10

Fuerzas internas máximas de la viga del primer piso

Nº	Estructura	Viga			
		$N_{\text{máx}}$ (T)	$V_{\text{máx}}$ (T)	$M_{\text{máx}}$ (T.m)	$M_{t,\text{máx}}$ (T.m)
SD	Sin disipadores	0,00 (85,91)	11,15 (85,91)	34,95 (85,91)	0,43 (varios)
VD	Dis. Viscosos NL	0,00 (85,91)	9,90 (85,91)	31,40 (85,91)	0,28 (varios)
VE	Dis. Viscoelásticos	0,00 (85,91)	8,67 (85,91)	27,14 (85,91)	0,31 (varios)
FD	Dis. Fricción	0,00 (85,91)	9,85 (85,91)	30,83 (85,91)	0,25 (varios)
YD	Dis. Fluencia	0,00 (85,91)	9,25 (85,91)	28,95 (85,91)	0,24 (varios)

En la tabla 3.10 se muestran los resultados obtenidos de la fuerza axial máxima, fuerza cortante máxima, momento flector máximo y momento torsor máximo, mostrando entre paréntesis la nomenclatura de la viga del primer piso de mayor sollicitación sísmica de cada modelo considerado.

En la tabla 3.11 se muestran los valores de las fuerzas axiales y las deformaciones obtenidas del comportamiento sísmico de cada uno de los cuatro tipos de disipadores de energía considerados en los modelos en ambos sentidos, surgiendo en el primer piso del edificio.

Tabla 3.11

Fuerzas axiales máximas y deformaciones máximas de los disipadores

Nº	Estructura	Eje	Nomenclatura del disipador	Fuerza axial (T)	Deformación (cm)
VD	Dis. Viscosos NL	X-X	1	0,58	1,57
		Y-Y	7	0,74	1,72
VE	Dis. Viscoelásticos	X-X	1	11,78	1,57
		Y-Y	7	10,78	1,31
FD	Dis. Fricción	X-X	1	2,90	1,59
		Y-Y	7	2,90	1,54
YD	Dis. Fluencia	X-X	1	4,15	1,58
		Y-Y	7	4,17	1,42

Como era de esperarse, los períodos de los modelos varían acorde a la rigidez adicionada por cada uno de los tipos de disipadores de energía utilizados.

Los desplazamientos máximos de los centros de masa en los ejes OX y OY, tanto sin considerar los disipadores, como considerando los mismos, suceden en el piso 3 de la estructura y las deformaciones máximas surgen en el eje OX en el primer piso, donde no están peraltadas las columnas.

Las fuerzas axiales máximas sin considerar los disipadores de energía y considerando los mismos, se dan en el primer piso en las columnas 2, 18, 46 y 62.

Las fuerzas cortantes máximas sin considerar los disipadores y considerando los mismos, se dan en el primer piso en las columnas 6 y 10.

Los momentos flectores máximos sin considerar los disipadores de energía y considerando los mismos, se dan en el primer piso en las columnas 6 y 10.

Los momentos torsores máximos sin considerar los disipadores y considerando los mismos, se dan en el primer piso y en diferentes columnas con valores muy similares.

Para el caso de vigas, las fuerzas axiales máximas, fuerzas cortantes máximas y momentos flectores máximos, tanto sin considerar los disipadores de energía, como considerando los mismos, surgen en el primer piso en las vigas 85 y 91. Los momentos torsores máximos se dan en diferentes vigas del primer piso con valores muy similares

Las fuerzas axiales máximas y las deformaciones máximas de los disipadores de energía analizados, se dan en el primer piso en los disipadores 1 y 7.

CAPITULO 4

ANALISIS COMPARATIVO Y DISCUSION DE RESULTADOS

4.1 ANALISIS COMPARATIVO

Se efectuaron los siguientes análisis comparativos:

- Disipadores Viscosos No-lineales / Sin Disipadores
- Disipadores Viscoelásticos / Sin Disipadores
- Disipadores por Fricción / Sin Disipadores
- Disipadores por Fluencia / Sin Disipadores

4.1.1 COMPARACION MODELO DISIPADORES VISCOSOS NO-LINEALES / MODELO SIN DISIPADORES

- Los períodos y frecuencias no sufrieron variación alguna.
- Se disminuyeron los desplazamientos máximos y las distorsiones máximas del primer piso en el eje OX en un 39,20% y en un 10,35% en el eje OY.
- Se disminuyeron las fuerzas axiales máximas del primer piso en un 22,07% y en un 19,46 % para la columna más esforzada del primer piso.
- Se disminuyeron las fuerzas cortantes máximas del primer piso en un 10,25% y en un 10,04% para la columna más esforzada del primer piso.
- Se disminuyeron los momentos flectores máximos del primer piso en un 10,17%, y en un 10,22% para la columna más esforzada del primer piso.
- Se disminuyeron los momentos torsores máximos del primer piso en un 31,48% y en un 31,48% para la columna más esforzada del primer piso.
- No se disminuyeron las fuerzas axiales máximas de la viga más esforzada del primer piso.
- Se disminuyeron las fuerzas cortantes máximas de la viga más esforzada del primer piso en un 11,21%.
- Se disminuyeron los momentos flectores máximos de la viga más esforzada del primer piso en un 10,16%.
- Se disminuyeron los momentos torsores máximos de la viga más esforzada del primer piso en un 34,88%.

4.1.2 COMPARACION MODELO DISIPADORES VISCOELASTICOS / MODELO SIN DISIPADORES

- Se disminuyó el primer período de vibración en un 10,01%. Los períodos del segundo al noveno modo de vibración se disminuyeron en un porcentaje similar.

- Se incrementó la frecuencia del primer período en un 11,12%. Las frecuencias del segundo al noveno modo de vibración se incrementaron en un porcentaje similar.
- Se disminuyeron los desplazamientos máximos y las distorsiones máximas del primer piso en el eje OX en un 38,92% y en un 20,43% en el eje OY.
- Se disminuyeron las fuerzas axiales máximas del primer piso en un 14,45% y en un 22,98% para la columna más esforzada del primer piso.
- Se disminuyeron las fuerzas cortantes máximas del primer piso en un 9,35% y en un 19,35% para la columna más esforzada del primer piso.
- Se disminuyeron los momentos flectores máximos del primer piso en un 10,13% y en un 19,86% para la columna más esforzada del primer piso.
- Se disminuyeron los momentos torsores máximos del primer piso en un 31,37% y en un 31,48% para la columna más esforzada del primer piso.
- No se disminuyeron las fuerzas axiales máximas de la viga más esforzada del primer piso.
- Se disminuyeron las fuerzas cortantes máximas de la viga más esforzada del primer piso en un 22,24%.
- Se disminuyeron los momentos flectores máximos de la viga más esforzada del primer piso en un 22,35%.
- Se disminuyeron los momentos torsores máximos de la viga más esforzada del primer piso en un 29,07%.

4.1.3 COMPARACION MODELO DISIPADORES POR FRICCION / MODELO SIN DISIPADORES

- Se disminuyó el primer período de vibración en un 57,84%. Los períodos del segundo al noveno modo de vibración se disminuyeron en un porcentaje similar.
- Se incrementó la frecuencia del primer período en un 137,21%. Las frecuencias del segundo al noveno modo de vibración se incrementaron en un porcentaje similar.
- Se disminuyeron los desplazamientos máximos y las distorsiones máximas del primer piso en el eje OX en un 38,43% y en un 11,76% en el eje OY.
- Se disminuyeron las fuerzas axiales máximas del primer piso en un 16,79% y en un 18,95% para la columna más esforzada del primer piso.
- Se disminuyeron las fuerzas cortantes máximas del primer piso en un 9,66% y en un 11,91% para la columna más esforzada del primer piso.
- Se disminuyeron los momentos flectores máximos del primer piso en un 9,72% y en un 11,87% para la columna más esforzada del primer piso.

- Se disminuyeron los momentos torsores máximos del primer piso en un 43,08% y en un 43,15% para la columna más esforzada del primer piso.
- No se disminuyeron las fuerzas axiales máximas de la viga más esforzada del primer piso.
- Se disminuyeron las fuerzas cortantes máximas de la viga más esforzada del primer piso en un 11,66%.
- Se disminuyeron los momentos flectores máximos de la viga más esforzada del primer piso en un 11,79%.
- Se disminuyeron los momentos torsores máximos de la viga más esforzada del primer piso en un 41,16%.

4.1.4 COMPARACION MODELO DISIPADORES POR FLUENCIA / MODELO SIN DISIPADORES

- Se disminuyó el primer período de vibración en un 22,15%. Los períodos del segundo al noveno modo de vibración se disminuyeron en un porcentaje poco menor.
- Se incrementó la frecuencia del primer período en un 28,44%. Las frecuencias del segundo al noveno modo de vibración se incrementaron en un porcentaje poco menor.
- Se disminuyeron los desplazamientos máximos y las distorsiones máximas del primer piso en el eje OX en un 38,78% y en un 26,58% en el eje OY.
- Se disminuyeron las fuerzas axiales máximas del primer piso en un 20,71% y en un 19,84% para la columna más esforzada del primer piso.
- Se disminuyeron las fuerzas cortantes máximas del primer piso en un 11,94% y en un 33,09% para la columna más esforzada del primer piso.
- Se disminuyeron los momentos flectores máximos del primer piso en un 11,60% y en un 26,03% para la columna más esforzada del primer piso.
- Se disminuyeron los momentos torsores máximos del primer piso en un 47,22% y en un 48,15% para la columna más esforzada del primer piso.
- No se disminuyeron las fuerzas axiales máximas de la viga más esforzada del primer piso.
- Se disminuyeron las fuerzas cortantes máximas de la viga más esforzada del primer piso en un 17,04%.
- Se disminuyeron los momentos flectores máximos de la viga más esforzada del primer piso en un 17,17%.
- Se disminuyeron los momentos torsores máximos de la viga más esforzada del primer piso en un 45,35%.

4.2 DISTRIBUCION DE ENERGIA

En las figuras 4.1 – 4.5 se muestran la distribución de energía: energía de entrada del sismo de Lima (Input Energy), energía cinética (Kinetic Energy), energía potencial (Potencial Energy), energía modal de amortiguamiento de la edificación (MDamp Energy) y energía de disipación del disipador colocado en cada modelo en la crujía central en ambos sentidos y en todos los pisos (NDamp Energy).

En la figura 4.1 se observa la distribución de energía de la estructura sin disipadores, en donde se puede apreciar que la mayor energía es asumida por la amortiguación de la estructura durante todo el sismo. Las energías potencial y cinética, absorben energía de manera importante del 18vo al 24vo segundo del sismo. La energía modal de amortiguamiento de la edificación tiene un valor del 99.97% de la energía de entrada sísmica.

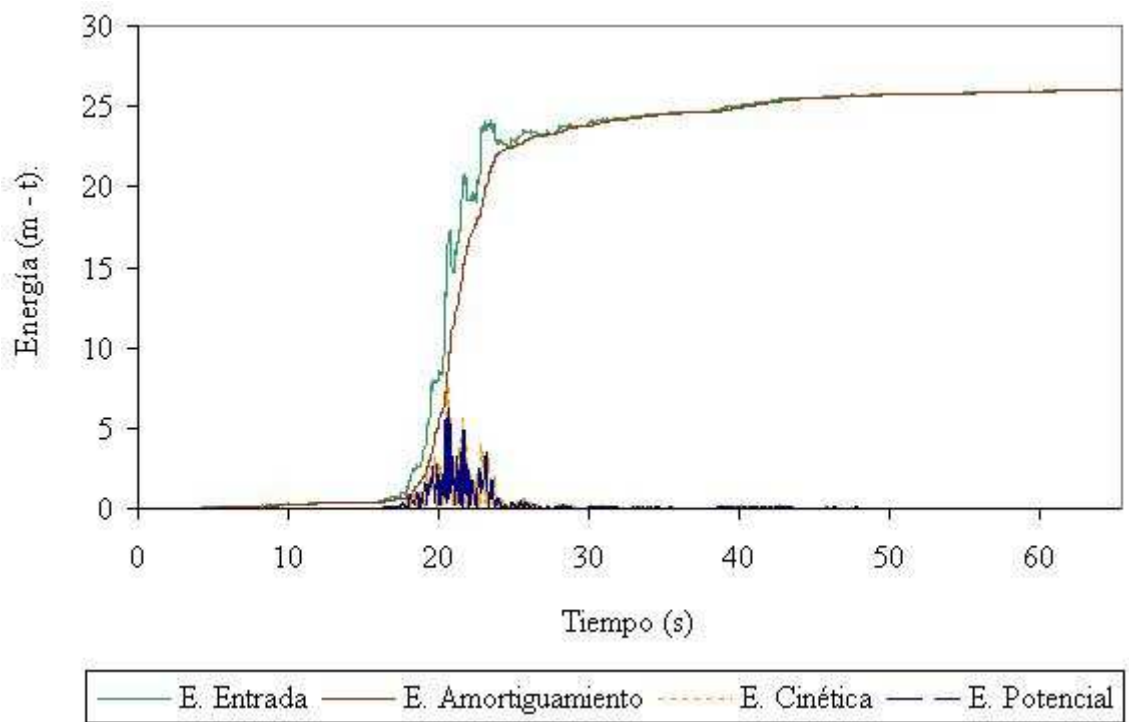
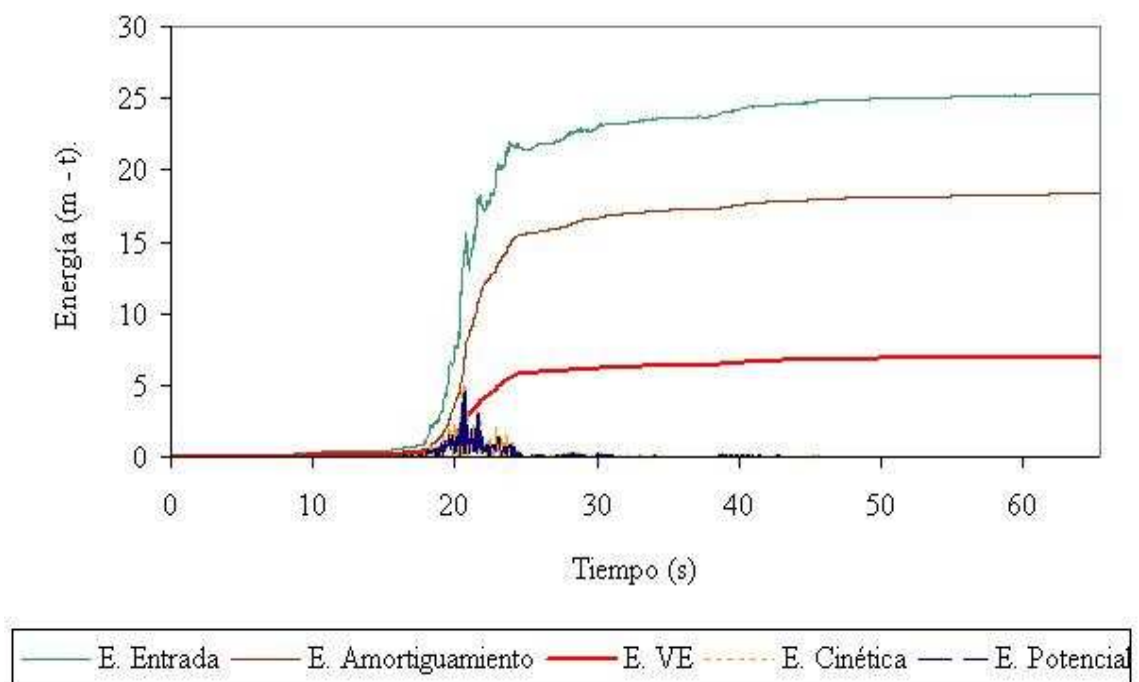
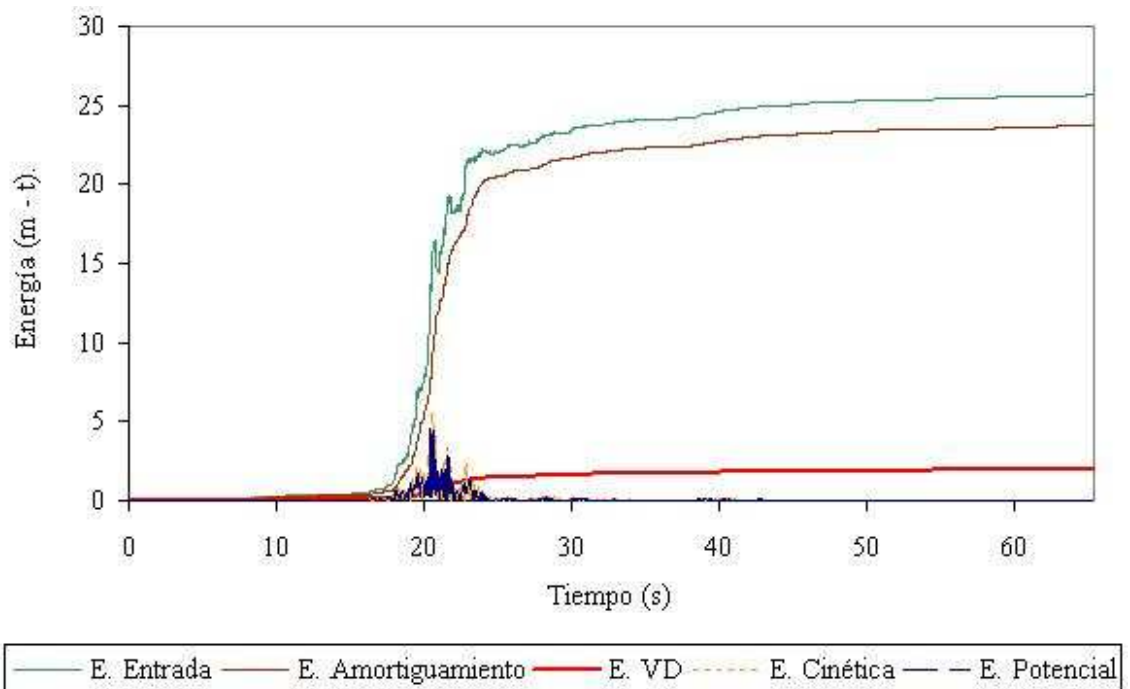


Fig. 4.1 Distribución de energía en el edificio sin disipadores

En la figura 4.2 se observa la distribución de energía de la estructura con disipadores de energía viscosos, en donde se puede apreciar que la mayor energía es asumida por la amortiguación de la estructura durante todo el sismo. Las energías potencial y cinética, absorben energía de manera importante del 18vo al 23vo segundo del sismo. La energía de disipación de los disipadores viscosos colocados en la estructura tiene un valor del 7,61% de la energía de entrada sísmica y la energía modal de amortiguamiento de la edificación tiene un valor del 92,36%.



En la figura 4.3 se observa la distribución de energía de la estructura con disipadores de energía viscoelásticos, en donde se puede apreciar que la mayor energía es asumida por la amortiguación de la estructura durante todo el sismo. Las energías potencial y cinética, absorben energía de manera importante del 19vo al 24vo segundo del sismo. La energía de disipación de los disipadores viscoelásticos colocados en la

estructura tiene un valor del 27,49% de la energía de entrada sísmica y la energía modal de amortiguamiento de la edificación tiene un valor del 72,48%.

En la figura 4.4 se observa la distribución de energía de la estructura con disipadores de energía por fricción, en donde se puede apreciar que la mayor energía es asumida por la amortiguación de la estructura durante todo el sismo. Las energías potencial y cinética, absorben energía de manera importante del 20vo al 24vo segundo del sismo. La energía de disipación de los disipadores por fricción colocados en la estructura tiene un valor del 11,66% de la energía de entrada sísmica y la energía modal de amortiguamiento de la edificación tiene un valor del 88,32%.

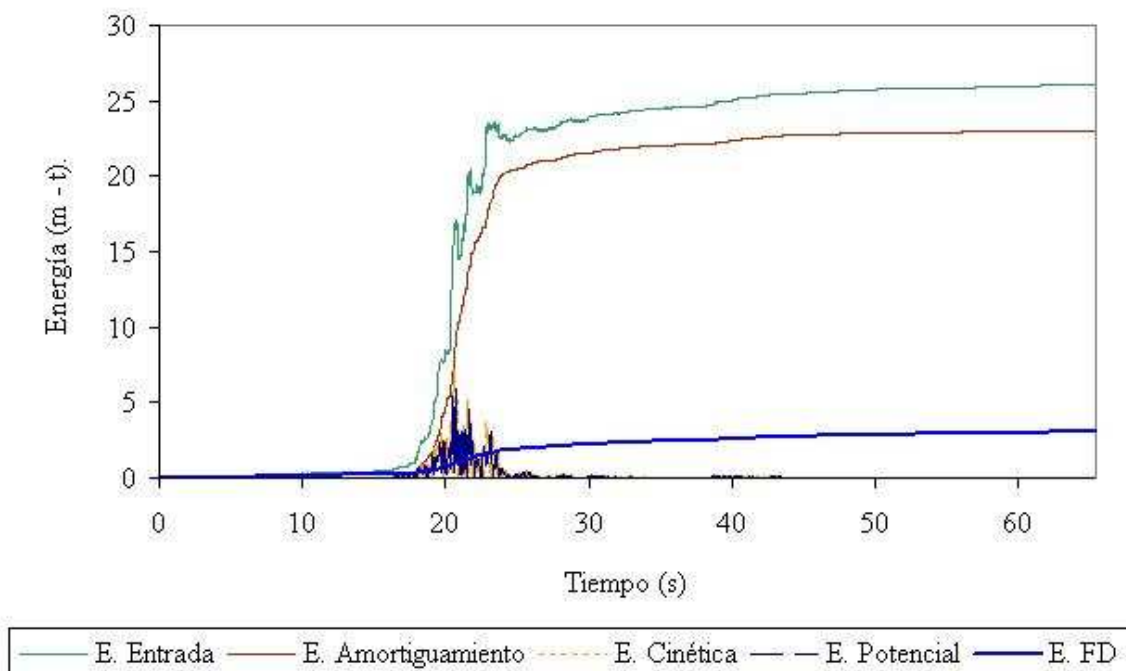


Fig. 4.4 Distribución de energía en el edificio con disipador por fricción

En la figura 4.5 se observa la distribución de energía de la estructura con disipadores de energía por fluencia, en donde se puede apreciar que la mayor energía es asumida por la amortiguación de la estructura durante todo el sismo. Las energías potencial y cinética, absorben energía de manera importante del 19vo al 24vo segundo del sismo. La energía de disipación de los disipadores por fluencia colocados en la estructura tiene un valor del 31,41% de la energía de entrada sísmica y la energía modal de amortiguamiento de la edificación tiene un valor del 68,56%.

De los casos mostrados en las figuras 4.1 – 4.5, se puede indicar que por absorción de energía de disipación del sismo, los mejores modelos son los disipadores de energía viscoelásticos y los disipadores de energía por fluencia.

De las figuras 4.6 – 4.9, se puede indicar que el disipador de energía viscoelástico absorbe mayor fuerza axial y la deformación es similar para todos los casos.

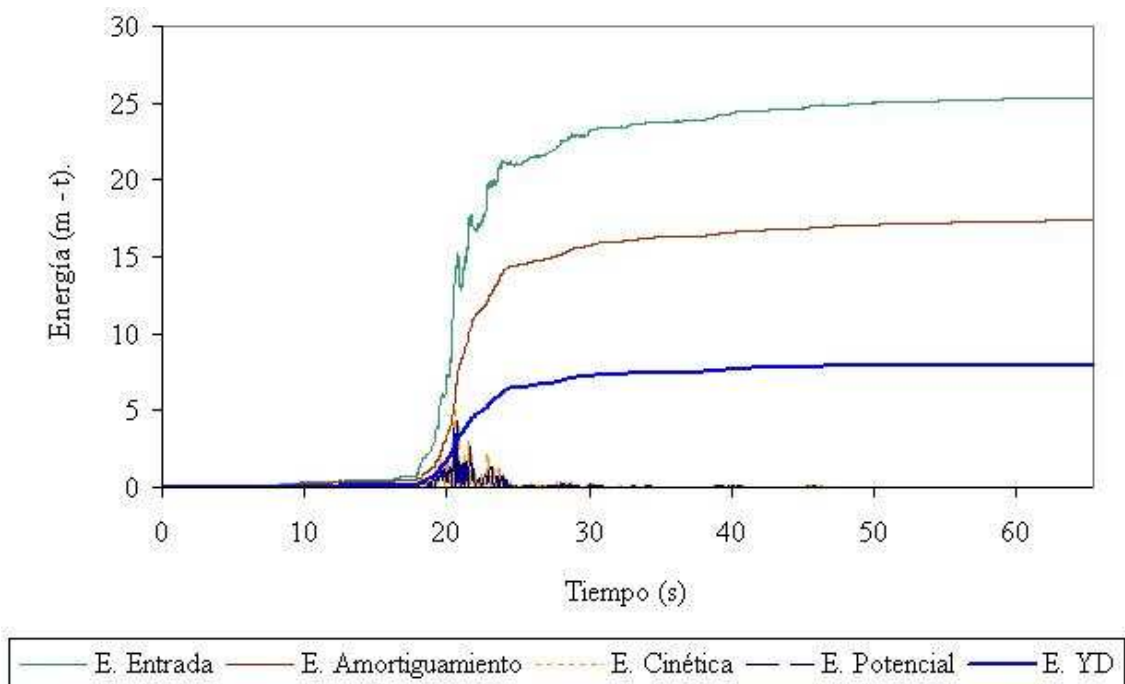


Fig. 4.5 Distribución de energía en el edificio con disipador por fluencia

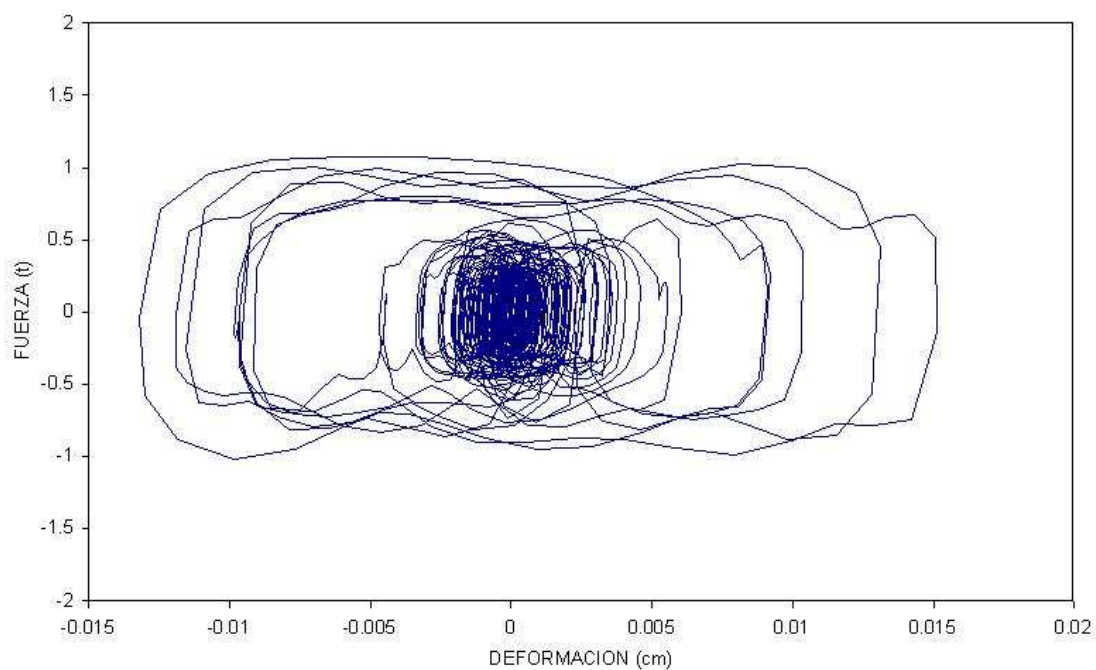


Fig. 4.6 Comportamiento del disipador viscoso

En la figura 4.6 se muestra el gráfico Fuerza axial en X – Deformación en X del disipador viscoso ubicado en el primer piso del centro de la estructura en el eje OX, por el sismo de Lima del 17.10.1966, donde la fuerza máxima es 0,58T y la deformación máxima 1,57cm.

En la figura 4.7 se muestra el gráfico Fuerza axial en X – Deformación en X del disipador viscoelástico ubicado en el primer piso del centro de la estructura en el eje OX,

por el sismo de Lima del 17.10.1966, donde la fuerza máxima es 11,78T y la deformación máxima 1,57cm.

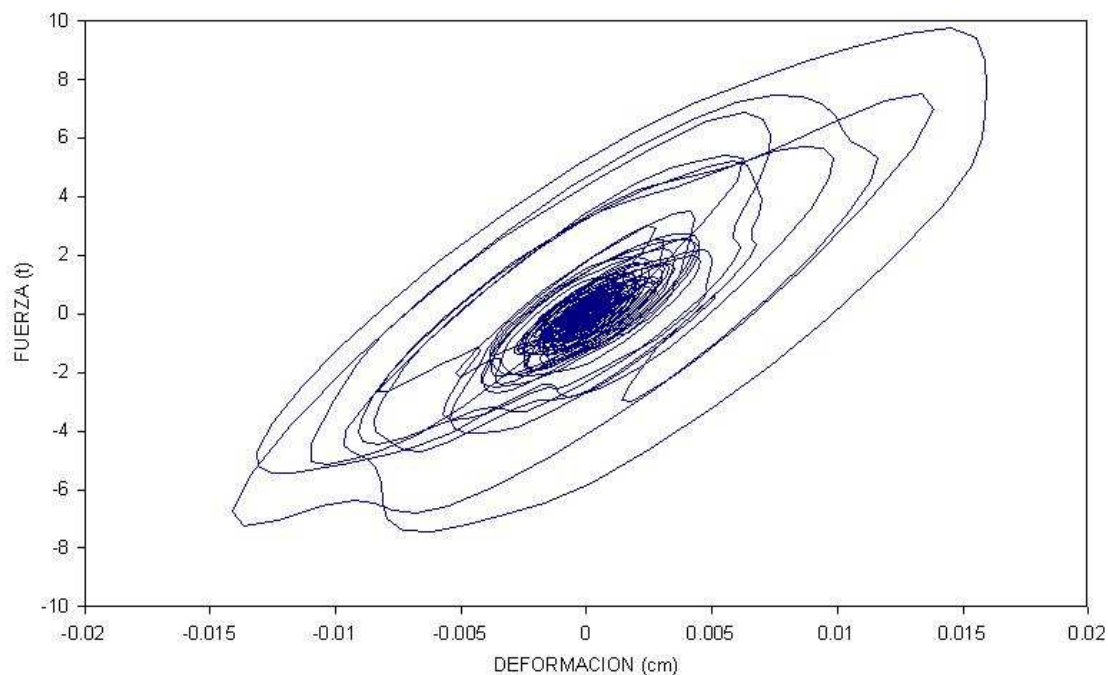


Fig. 4.7 Comportamiento del dissipador viscoelástico

En la figura 4.8 se muestra el gráfico Fuerza axial en X – Deformación en X del dissipador por fricción ubicado en el primer piso del centro de la estructura en el eje OX, por el sismo de Lima del 17.10.1966, donde la fuerza máxima es 2,90T y la deformación máxima 1,59cm.

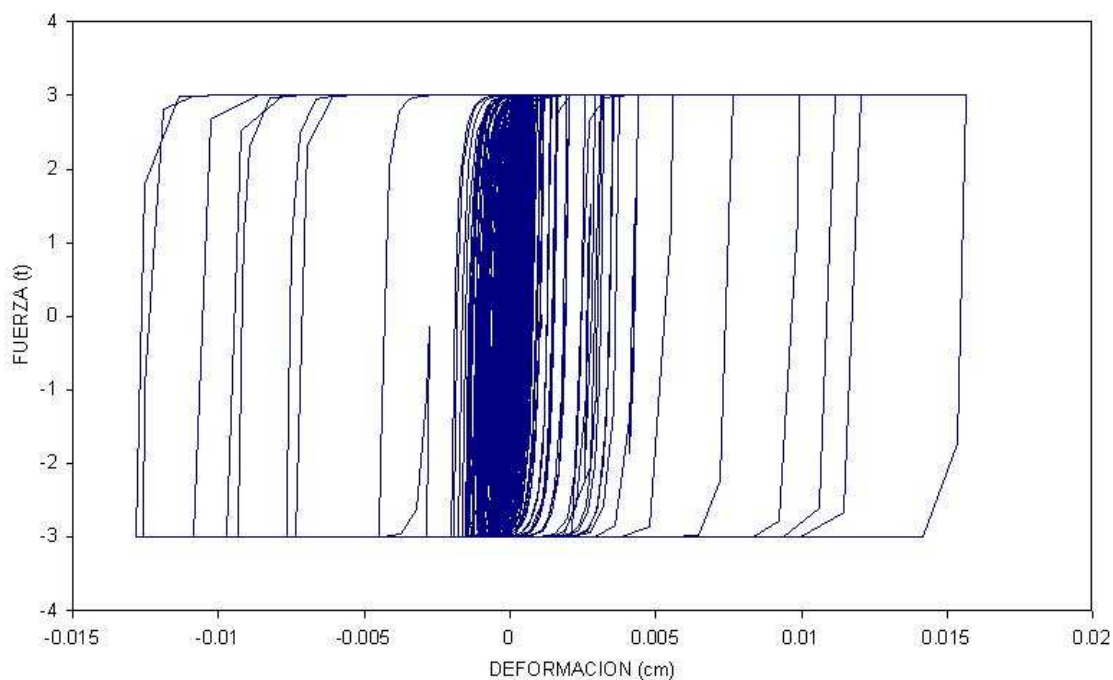


Fig. 4.8 Comportamiento del dissipador por fricción

En la figura 4.9 se muestra el gráfico Fuerza axial en X – Deformación en X del disipador por fluencia ubicado en el primer piso del centro de la estructura en el eje OX, por el sismo de Lima del 17.10.1966, donde la fuerza máxima es 4,15T y la deformación máxima 1,58cm.

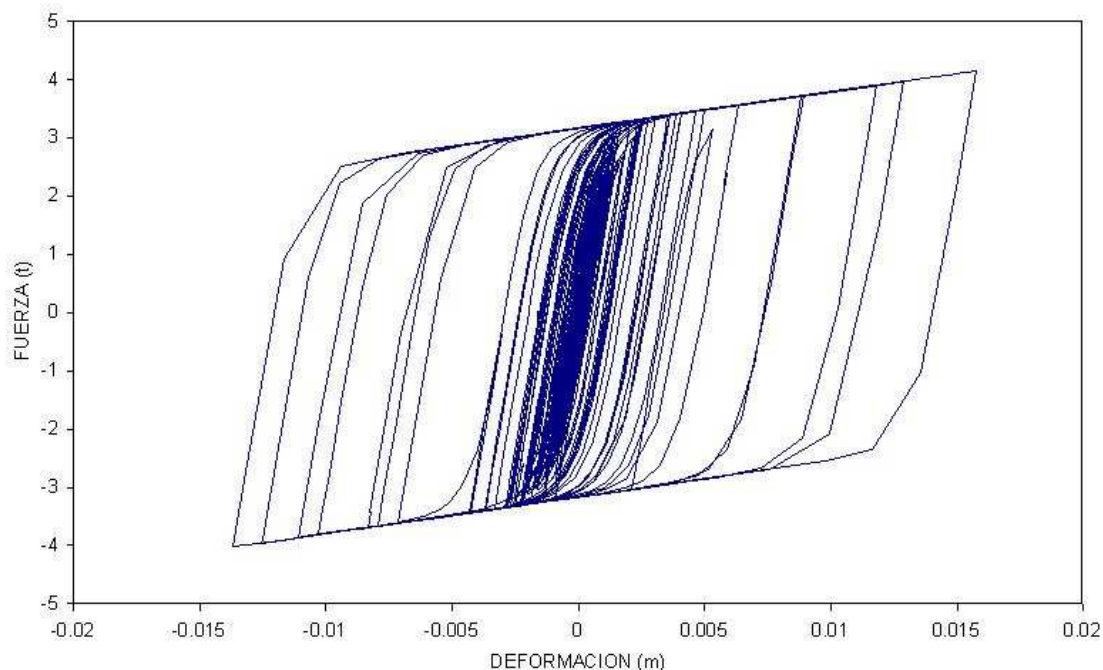


Fig. 4.9 Comportamiento del disipador por fluencia

4.3 FORMAS DE VIBRACION

En las figuras 4.10 – 4.21 se muestran la 1ra, 2da, 3ra, 4ta, 5ta, 6ta, 7ma, 8va, 9na, 10ma, 11va y 12va formas de vibración libre con sus respectivos períodos para el modelo dinámico del modelo analizado.

Se analizan cada una de las formas de vibración, indicando las principales vibraciones libres observadas. En los gráficos se muestra la estructura deformada.

La primera forma de vibración corresponde a la vibración horizontal en el eje OX y vibración rotacional alrededor del eje OZ. En la figura 4.10 se muestra el esquema espacial de la estructura.

La segunda forma de vibración corresponde a la vibración rotacional alrededor del eje OZ. En la figura 4.11 se muestra la vista 3D.

La tercera forma de vibración corresponde a la vibración horizontal en el eje OY y vibración rotacional alrededor del eje OZ. En la figura 4.12 se muestra la vista 3D.

La cuarta forma de vibración corresponde a la vibración horizontal en el eje OX, vibración rotacional alrededor del eje OZ y flexión en el plano YZ. En la figura 4.13 se muestra la vista 3D.

La quinta forma de vibración corresponde a la vibración rotacional alrededor del eje OZ y flexión en los planos YZ y XZ. En la figura 4.14 se muestra la vista 3D.

La sexta forma de vibración corresponde a la vibración horizontal en el eje OX, vibración rotacional alrededor del eje OZ y flexión en el plano YZ. En la figura 4.15 se muestra la vista 3D.

La séptima forma de vibración corresponde a la vibración horizontal en el eje OY, vibración rotacional alrededor del eje OZ y flexión en el plano XZ. En la figura 4.16 se muestra la vista 3D.

La octava forma de vibración corresponde a la vibración rotacional alrededor del eje OZ y flexión en los planos YZ y XZ. En la figura 4.17 se muestra la vista 3D.

La novena forma de vibración corresponde a la vibración horizontal en el eje OY, vibración rotacional alrededor del eje OZ y flexión en los planos YZ y XZ. En la figura 4.18 se muestra la vista 3D.

La décima forma de vibración corresponde a la vibración vertical en el eje OZ en el centro del plano XY. En la figura 4.19 se muestra la vista 3D.

La onceava forma de vibración corresponde a la vibración vertical en el eje OZ, en los ejes B y C. Se muestra también el efecto de flexión en las vigas de los ejes mencionados. En la figura 4.20 se muestra la vista 3D.

La doceava forma de vibración corresponde a la vibración vertical en el eje OZ, en los ejes 2 y 3. Se muestra también el efecto de flexión en las vigas de los ejes mencionados. En la figura 4.21 se muestra la vista 3D.

Se comprobaron los desplazamientos verticales por el efecto de alabeo en losas, llegando a la conclusión que no surge dicho efecto en ninguna de las 12 formas de vibración libre, lo cual se puede apreciar en las figuras 4.10 – 4.21.

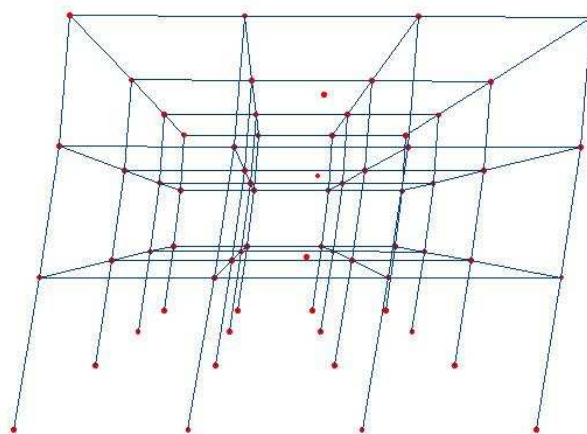


Fig. 4.10 Primera forma de vibración

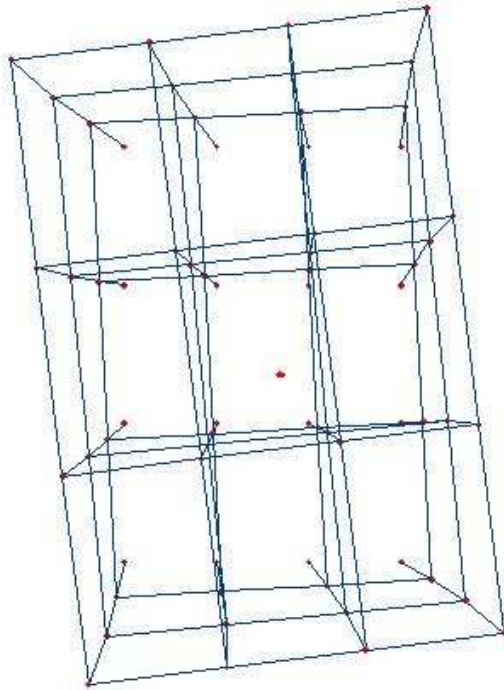


Fig. 4.11 Segunda forma de vibración

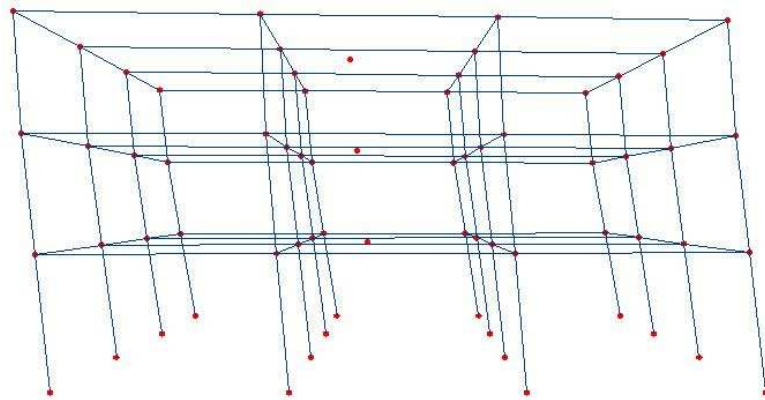


Fig. 4.12 Tercera forma de vibración

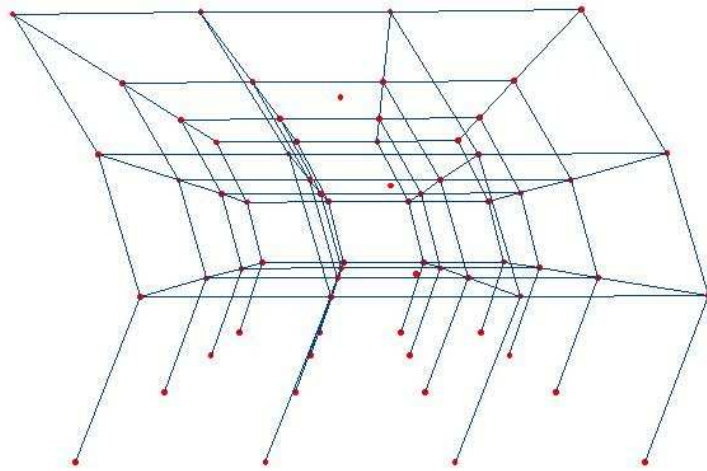


Fig. 4.13 Cuarta forma de vibración

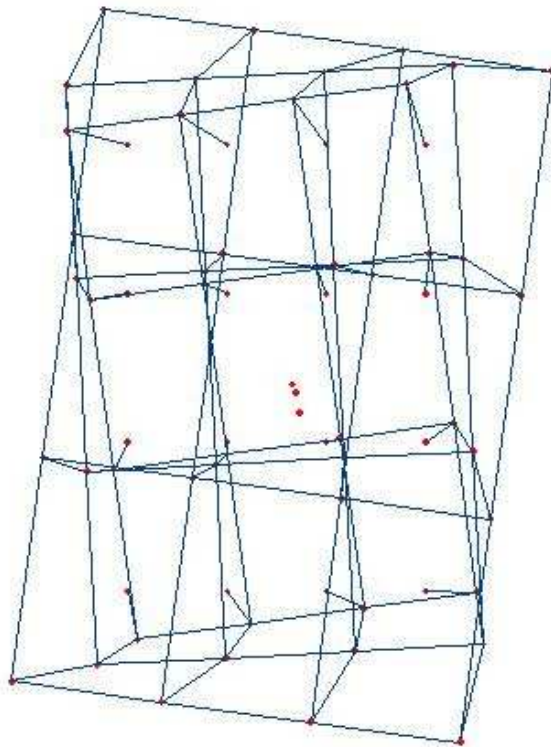


Fig. 4.14 Quinta forma de vibración

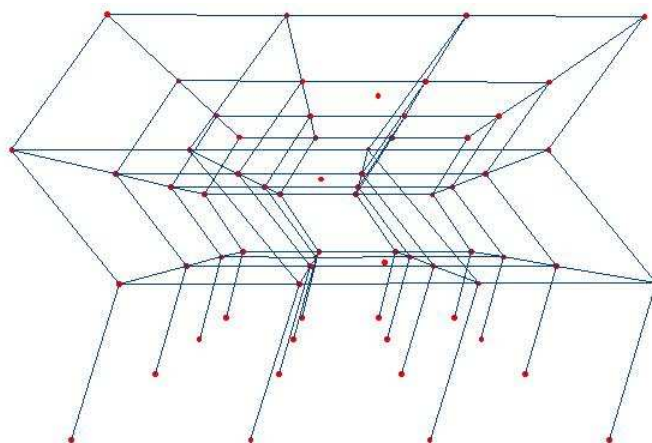


Fig. 4.15 Sexta forma de vibración

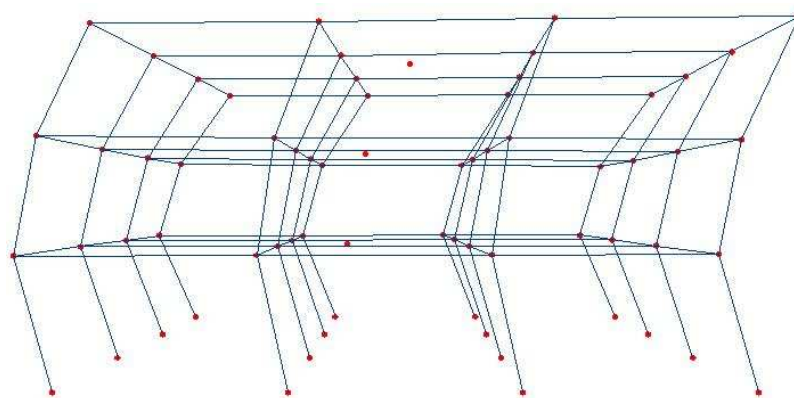


Fig. 4.16 Sétima forma de vibración

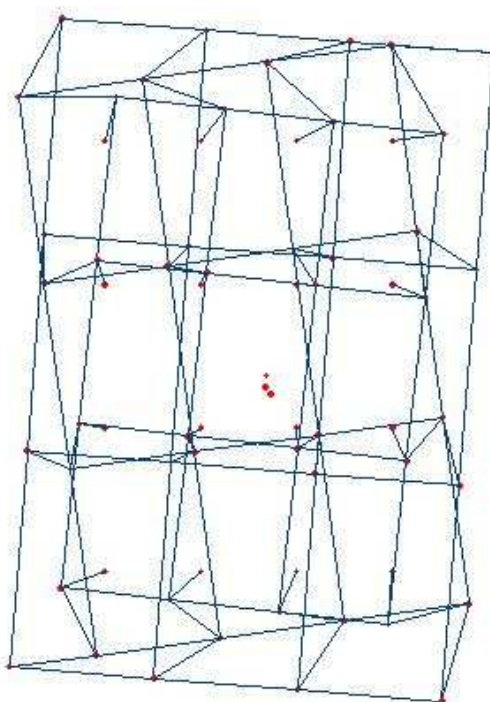


Fig. 4.17 Octava forma de vibración

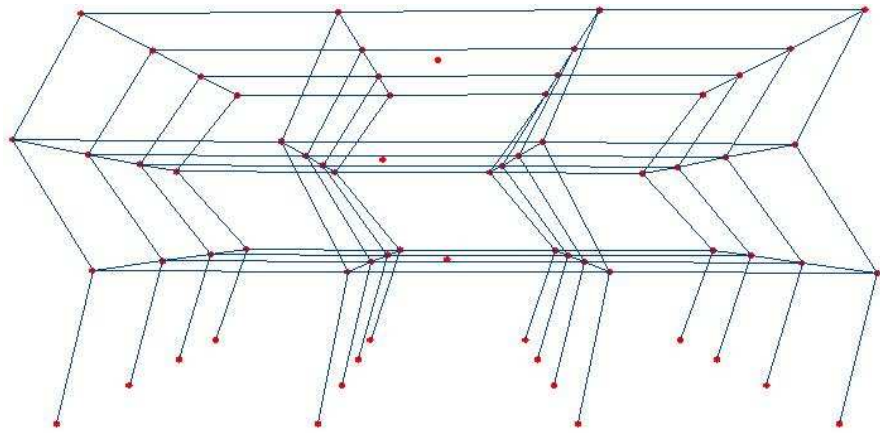


Fig. 4.18 Novena forma de vibración

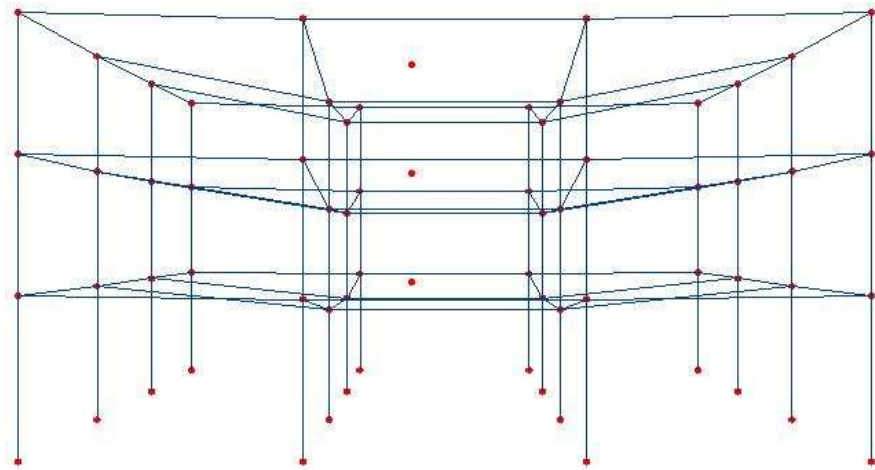


Fig. 4.19 Décima forma de vibración

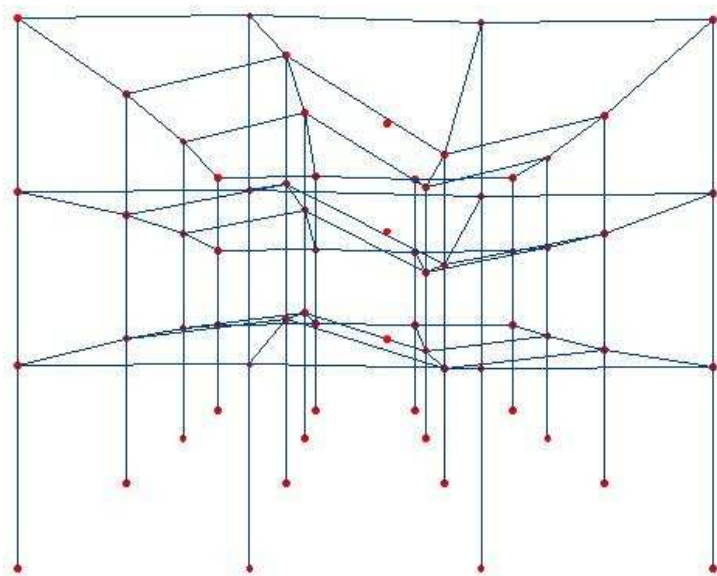


Fig. 4.20 Onceava forma de vibración

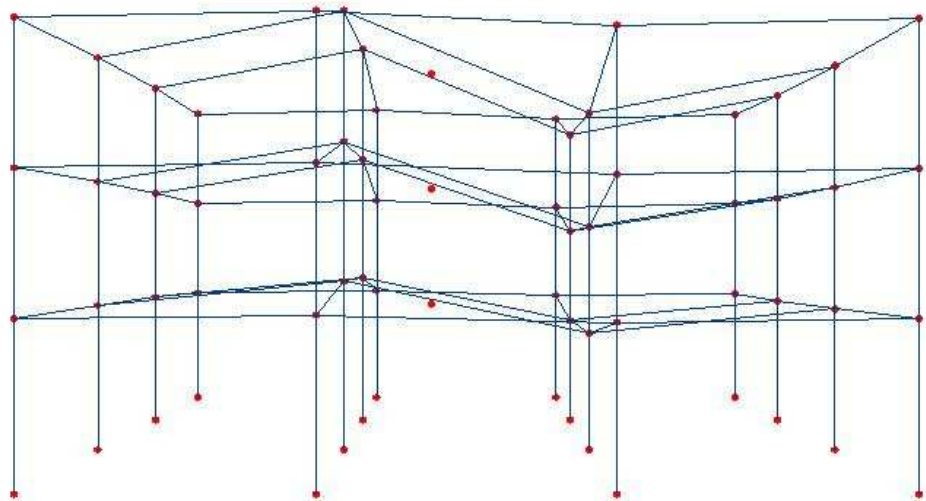


Fig. 4.21 Doceava forma de vibración

4.4 DISCUSION DE RESULTADOS

En la figura 4.22 se muestra el gráfico de los períodos de vibración libre sin disipadores de energía y considerando los disipadores de energía viscosos, viscoelásticos, por fricción y por fluencia.

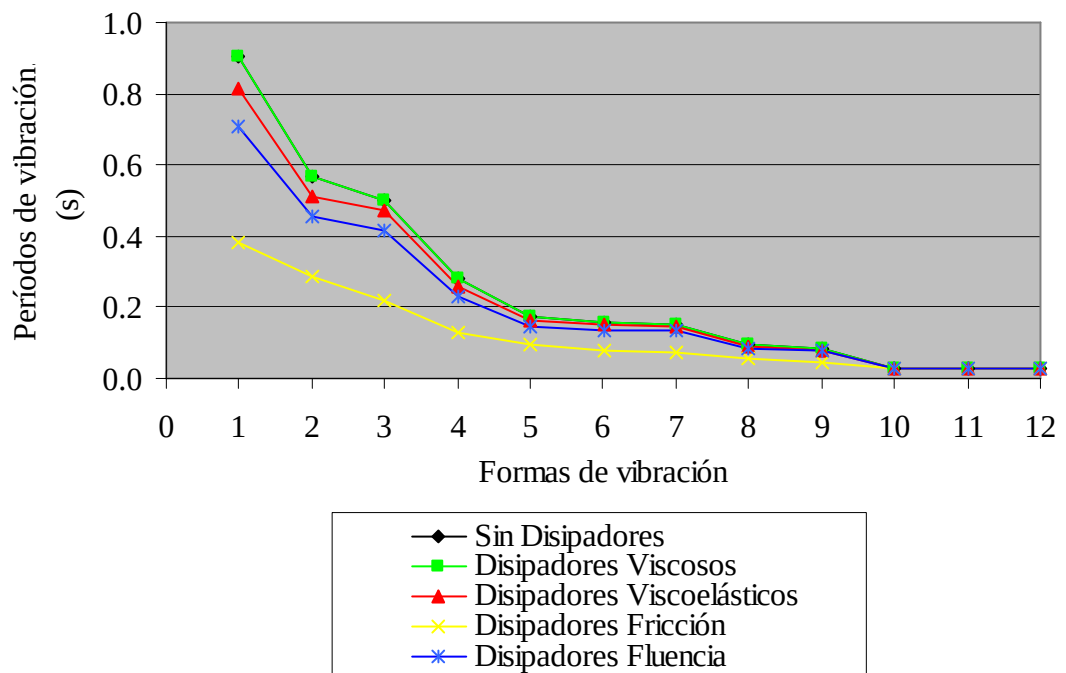


Fig. 4.22 Períodos de las 12 primeras formas de vibración

Los disipadores de energía viscosos tienen los mismos períodos que sin disipación. Los disipadores viscoelásticos, los disipadores por fricción y los disipadores por fluencia disminuyen los períodos en relación con la rigidez del disipador. La disminución más

notoria se da en la primera forma de vibración con los disipadores por fricción, tal como se muestra en la figura 4.22.

Los disipadores de energía viscosos tienen las mismas frecuencias que sin disipación. Los disipadores viscoelásticos, los disipadores por fricción y los disipadores por fluencia incrementan las frecuencias en relación inversa a los períodos, tal como se muestra en la figura 4.23. El incremento más notorio se da en la sexta forma de vibración con los disipadores por fricción.

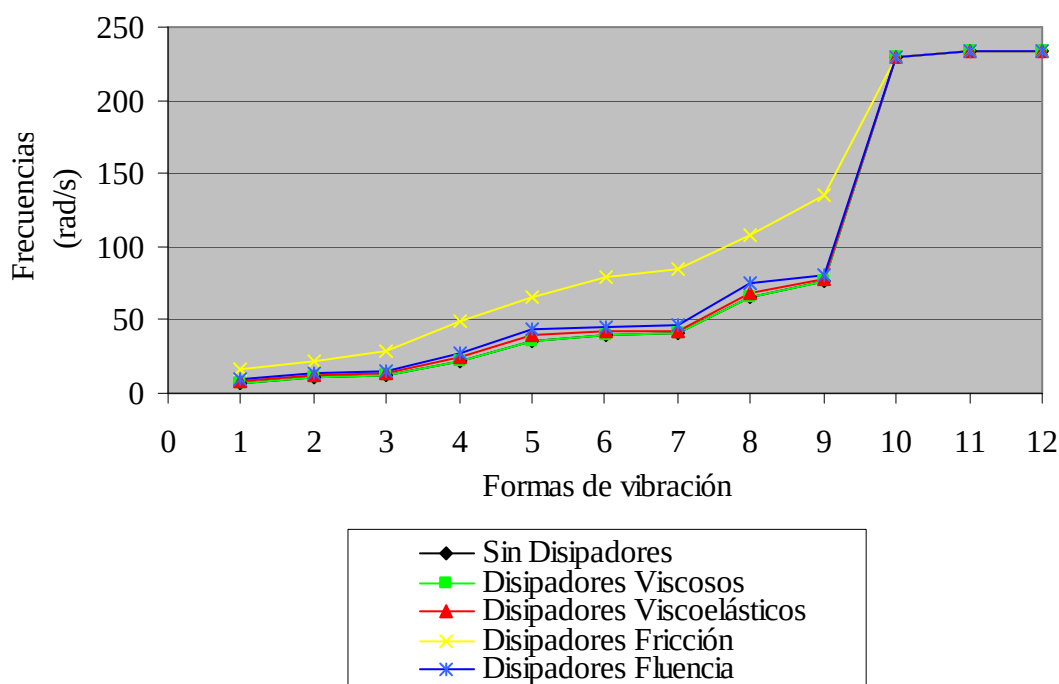


Fig. 4.23 Frecuencias de las 12 primeras formas de vibración

En las figuras 4.24 y 4.25 se muestran los desplazamientos relativos máximos en los ejes OX y OY, y en los gráficos 4.26 y 4.27 las distorsiones calculadas con el registro sísmico de Lima del 17 de octubre de 1966 para los modelos con diferentes tipos de disipadores de energía. Se diseñaron los cuatro tipos de disipadores para que la estructura en el primer nivel alcance una distorsión máxima de 0.0060. El menor desplazamiento del tercer nivel se obtuvo con los disipadores viscosos en el eje OX y con los disipadores por fluencia en el eje OY. Estos resultados indican que los disipadores viscosos se comportan mejor en estructuras flexibles y los disipadores por fluencia en estructuras más rígidas.

En la figura 4.28 se muestran los resultados de las fuerzas axiales máximas en las columnas del primer piso, analizadas con el registro sísmico de Lima del 17 de octubre de 1966 para los modelos dinámicos considerando los cuatro tipos de disipadores de energía. La rigidez de los disipadores de energía disminuye en menor proporción las fuerzas axiales máximas, siendo más notorios en los disipadores viscoelásticos y por

fricción. La mayor disminución de las fuerzas axiales máximas se consigue con los disipadores viscosos. Las fuerzas axiales máximas surgen en las columnas 2, 62, 18 y 46 en el primer piso.

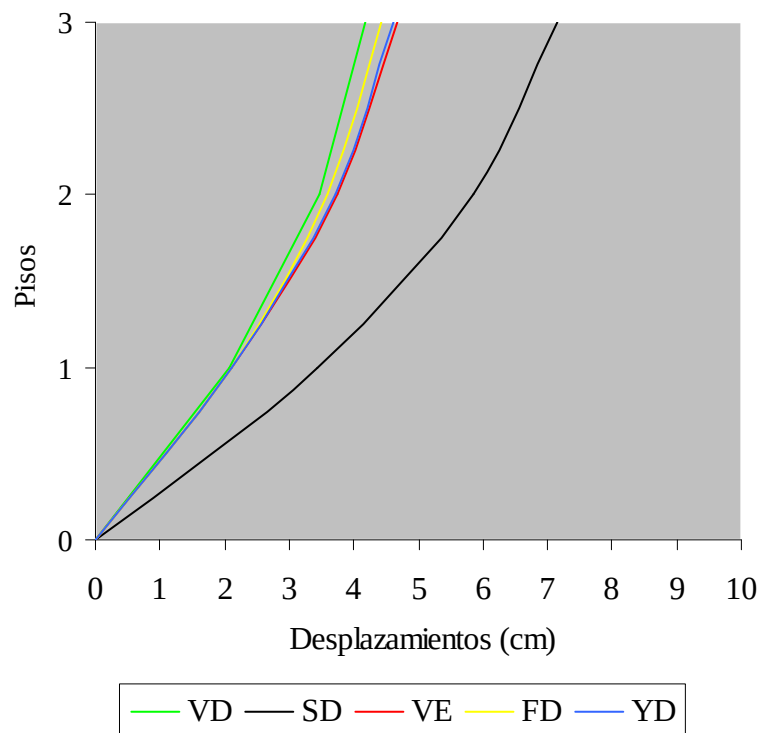


Fig. 4.24 Desplazamientos relativos máximos en el eje OX

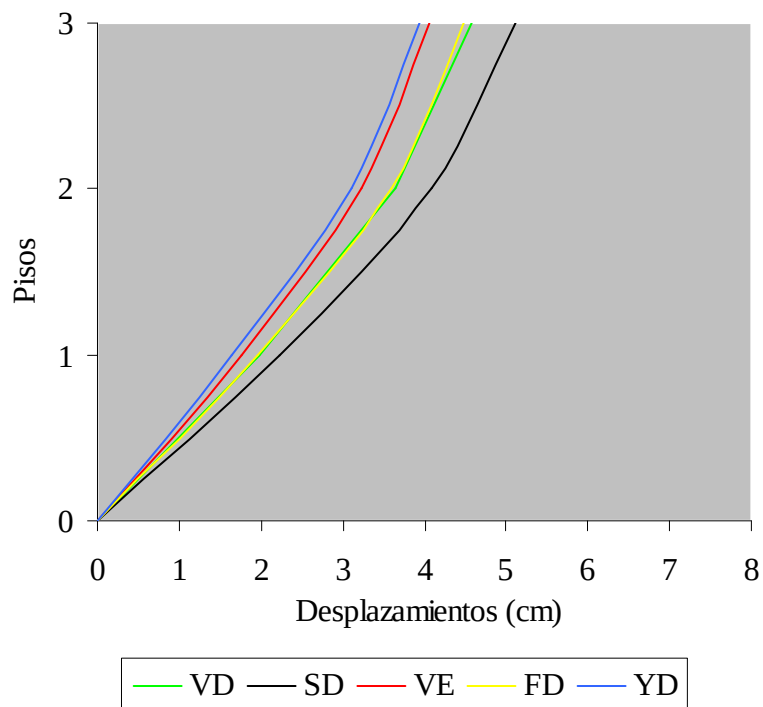


Fig. 4.25 Desplazamientos relativos máximos en el eje OY

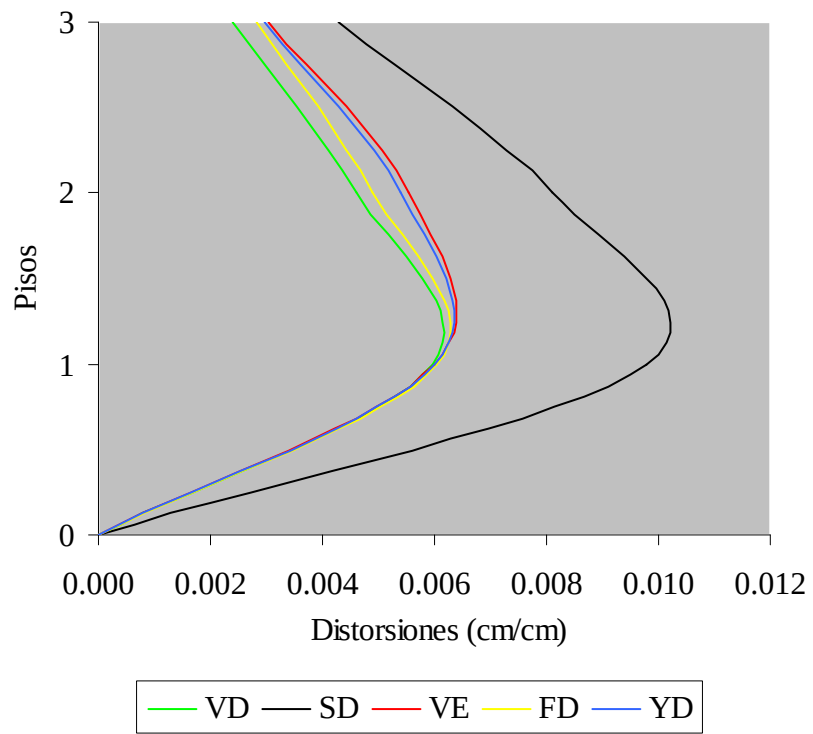


Fig. 4.26 Distorsiones relativas máximas en el eje OX

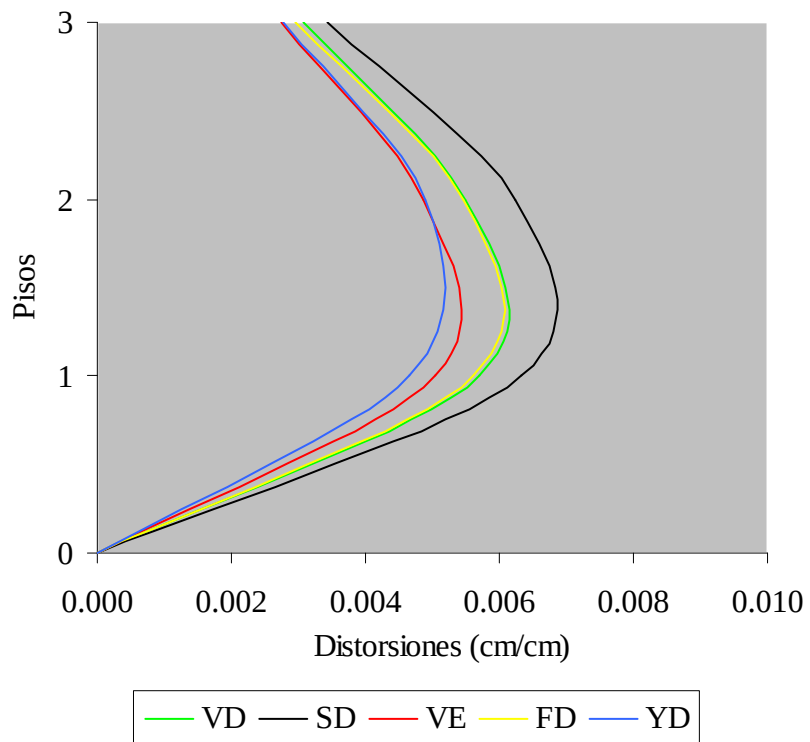


Fig. 4.27 Distorsiones relativas máximas en el eje OY

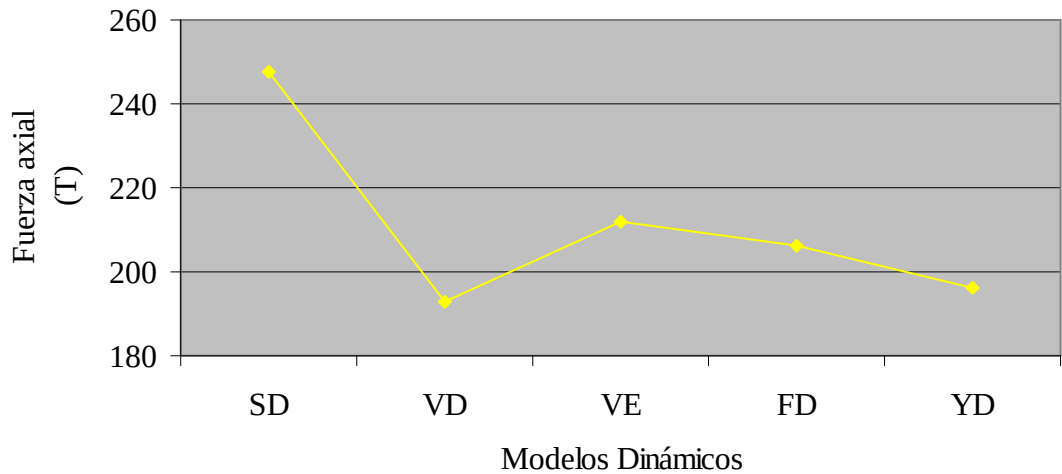


Fig. 4.28 Fuerza axial máxima del primer piso

En la figura 4.29 se muestran los resultados de las fuerzas cortantes máximas en el primer piso, analizadas con el registro sísmico de Lima del 17 de octubre de 1966 para los modelos dinámicos considerando los cuatro tipos de disipadores de energía. La disminución de las fuerzas cortantes máximas es similar para los cuatro tipos de disipadores de energía, no influenciando de manera importante las características propias de cada uno de los disipadores. La mayor disminución de las fuerzas cortantes máximas se consigue con los disipadores por fluencia. Las fuerzas cortantes máximas surgen en las columnas 6 y 10 en el primer piso.

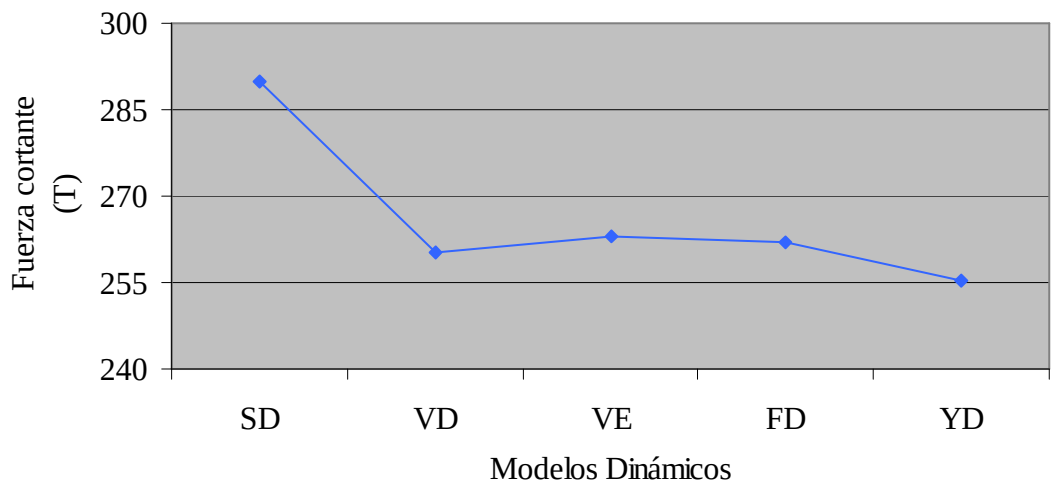


Fig. 4.29 Fuerza cortante máxima del primer piso

En la figura 4.30 se muestran los resultados de los momentos flectores máximos en el primer piso, analizadas con el registro sísmico de Lima del 17 de octubre de 1966 para los modelos dinámicos considerando los cuatro tipos de disipadores de energía. La disminución de los momentos flectores máximos es muy similar para los cuatro tipos de

disipadores de energía, no influenciando de manera importante las características propias de cada uno de los disipadores. La mayor disminución de los momentos flectores máximos se consigue con los disipadores por fluencia, debido a la ductilidad propia del material que está fabricado el disipador. Los momentos flectores máximos surgen en las columnas 6 y 10 en el primer nivel.

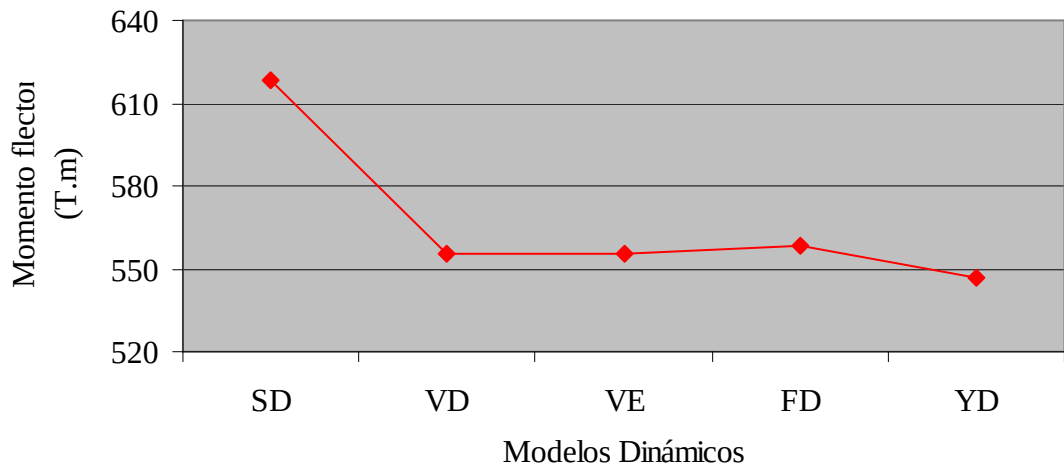


Fig. 4.30 Momento flector máximo del primer piso

En la figura 4.31 se muestran los resultados de los momentos torsores máximos en el primer piso, analizadas con el registro sísmico de Lima del 17 de octubre de 1966 para los modelos dinámicos considerando los cuatro tipos de disipadores de energía. La disminución de los momentos torsores máximos es igual para los disipadores viscosos y viscoelásticos y muy similar para los disipadores por fricción y por fluencia. La mayor disminución de los momentos torsores máximos se consigue con los disipadores por fluencia, debido a su adecuada y bien definida curva histerética. Los momentos torsores máximos surgen en diversas columnas del primer piso.

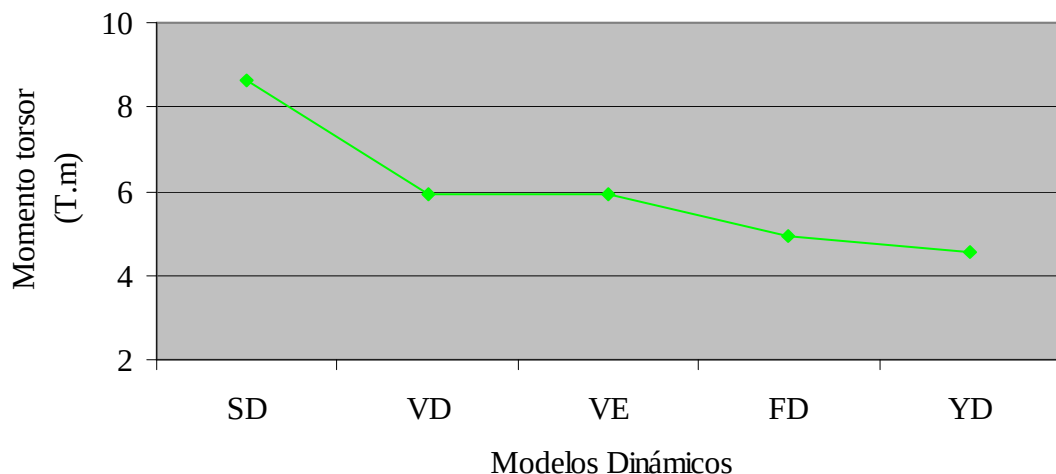


Fig. 4.31 Momento torsor máximo del primer piso

En la figura 4.32 se muestran los resultados de la fuerza axial máxima en la columna más esforzada del primer piso. No se aprecia una reducción considerable debido a la cercanía de la columna al disipador y por su ubicación perimetral de la misma en la estructura. La mayor disminución de las fuerzas axiales máximas se consigue con los disipadores viscoelásticos.

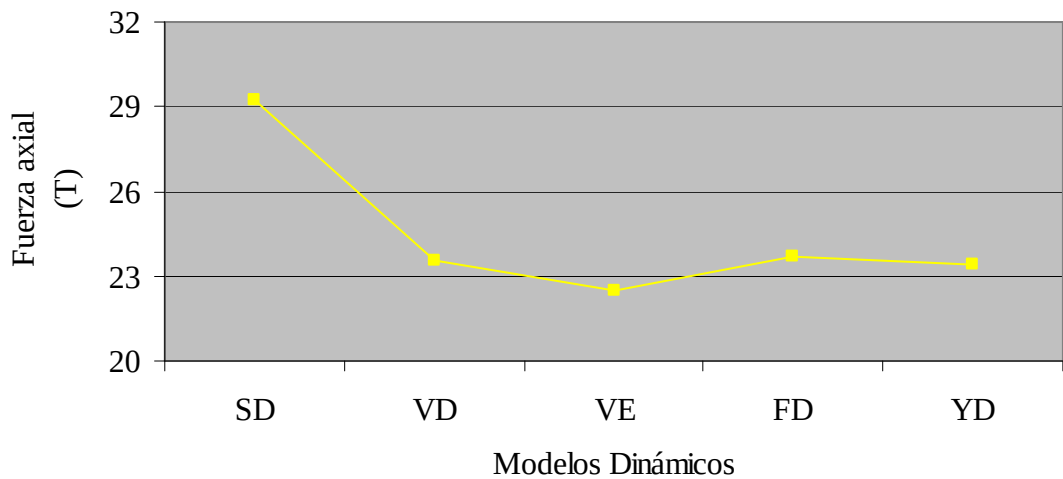


Fig. 4.32 Fuerza axial máxima en columnas

En la figura 4.33 se muestran los resultados de la fuerza cortante máxima en la columna más esforzada del primer piso. La disminución de los momentos flectores máximos es muy similar para los disipadores de energía viscosos y por fricción, siendo mayor con los disipadores por fluencia.

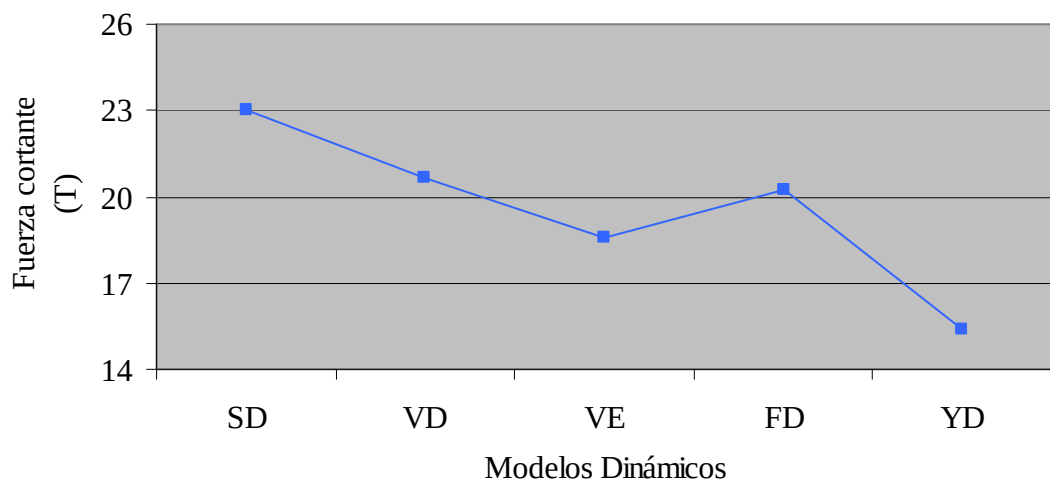


Fig. 4.33 Fuerza cortante máxima en columnas

En la figura 4.34 se muestran los resultados del momento flector máximo en la columna más esforzada del primer piso. La disminución de los momentos flectores máximos es muy similar para los disipadores de energía viscosos y por fricción. La mayor

disminución de los momentos flectores máximos se consigue con los disipadores por fluencia.

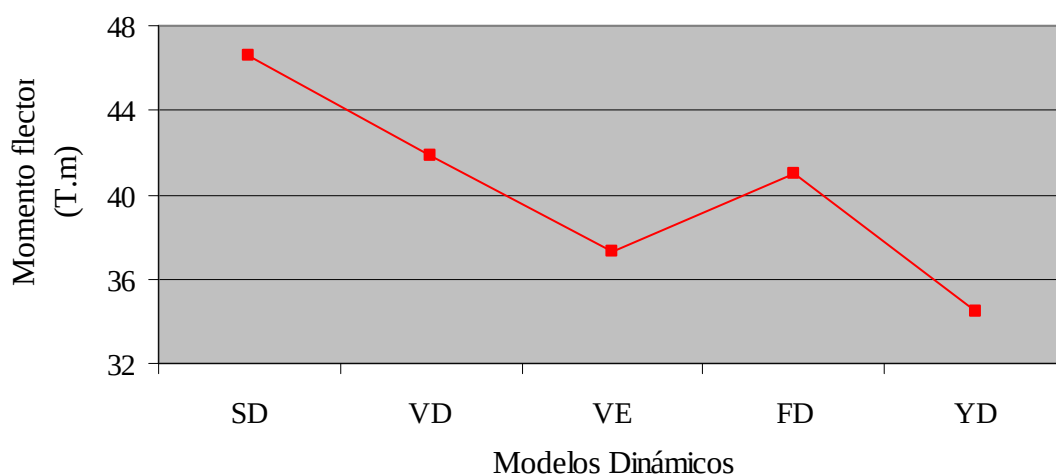


Fig. 4.34 Momento flector máximo en columnas

En la figura 4.35 se muestran los resultados del momento torsor máximo en la columna más esforzada del primer piso. La disminución de los momentos torsores máximos de la columna más esforzada es muy similar para todas las columnas del primer piso con todos los tipos de disipadores de energía.

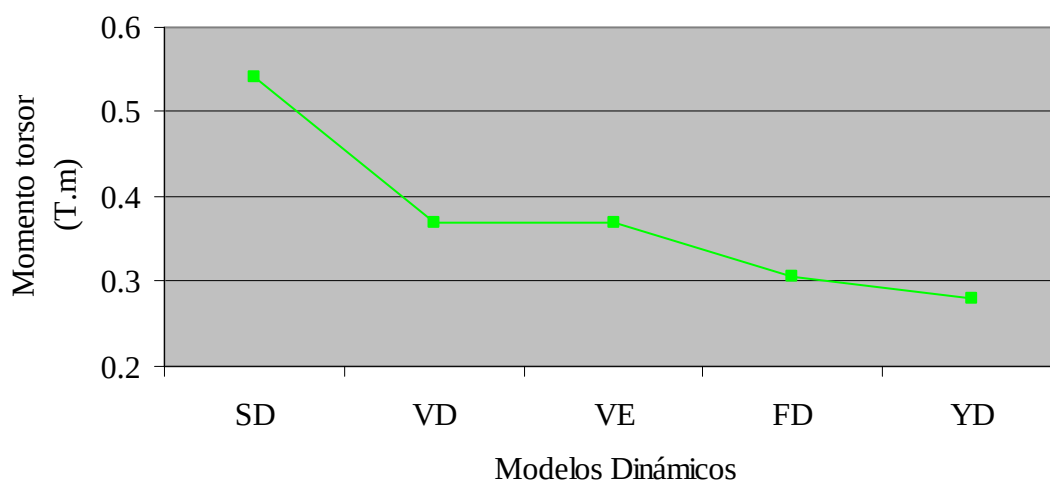


Fig. 4.35 Momento torsor máximo en columnas

En la figura 4.36 se muestran los resultados de la fuerza cortante máxima en la viga más esforzada del primer piso. La disminución de las fuerzas cortantes máximas es muy similar para los disipadores de energía viscosos y por fricción, siendo mayor con los disipadores viscoelásticos.

En la figura 4.37 se muestran los resultados del momento flector máximo en la viga más esforzada del primer piso. La disminución de los momentos flectores máximos es

muy similar para los disipadores de energía viscosos y por fricción, siendo mayor con los disipadores viscoelásticos.

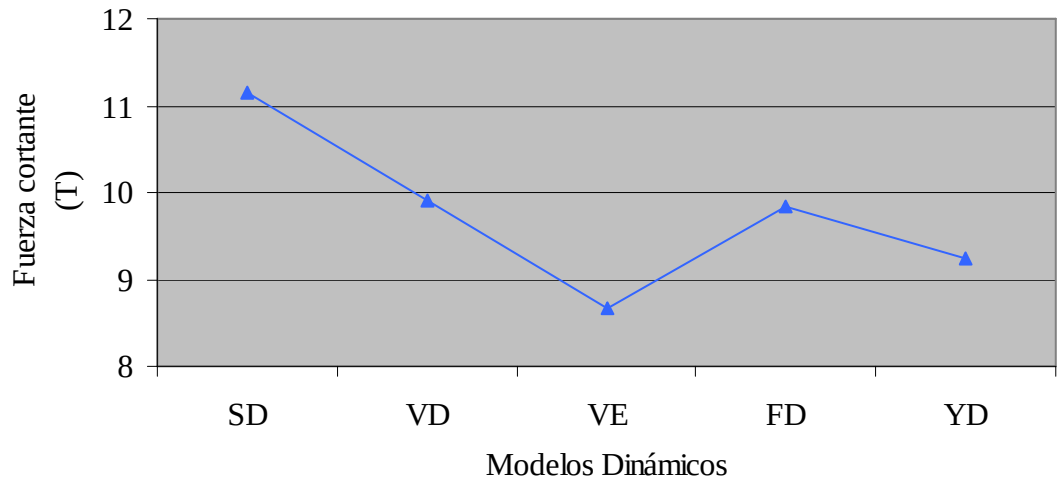


Fig. 4.36 Fuerza cortante máxima en vigas

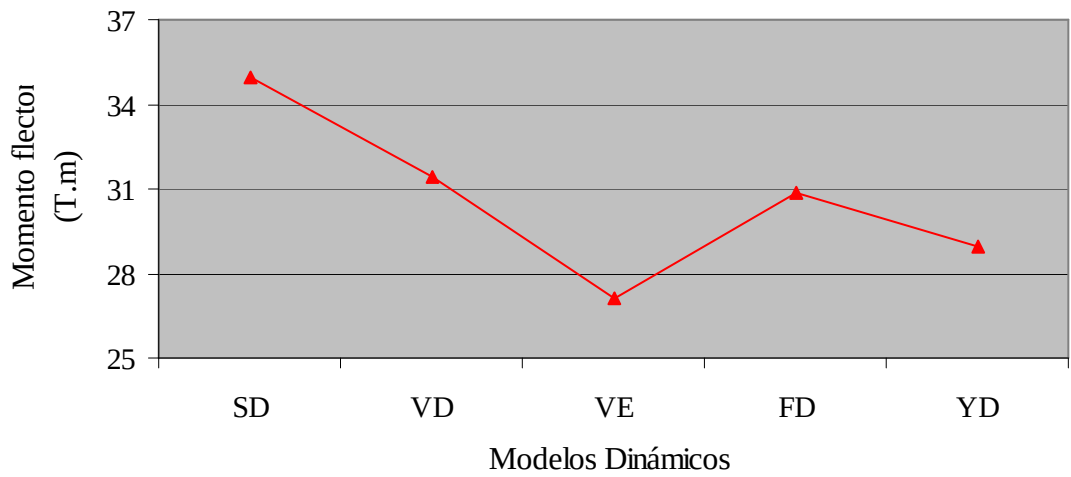


Fig. 4.37 Momento flector máximo en vigas

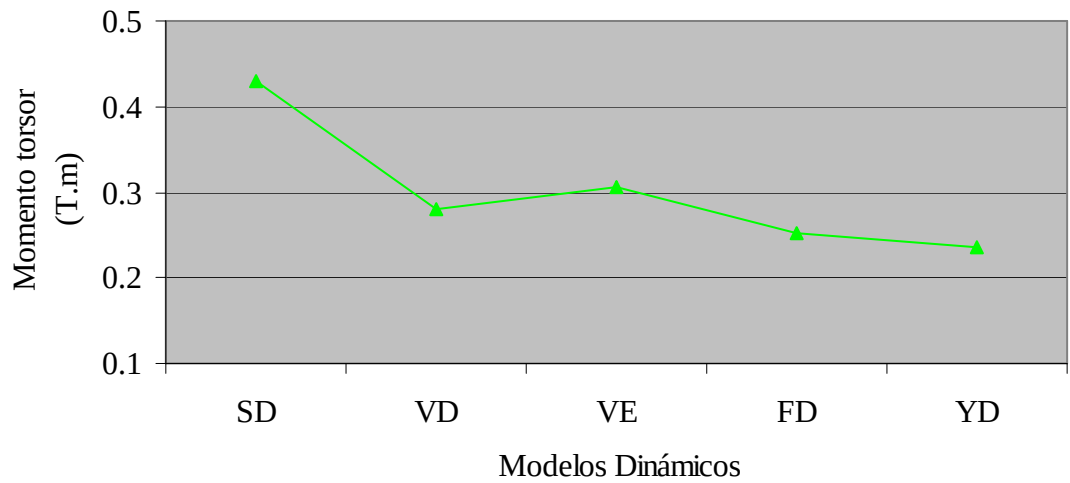


Fig. 4.38 Momento torsor máximo en vigas

En la figura 4.39 se muestran los resultados del momento torsor máximo en la viga más esforzada del primer piso. La disminución de los momentos torsores máximos de la viga más esforzada es similar que para todas las vigas del primer piso con todos los tipos de disipadores de energía.

En la figura 4.6 se mostró la curva histerética fuerza-deformación del comportamiento del disipador viscoso sometido a la acción dinámica del registro sísmico de Lima del 17 de octubre de 1966. Se puede apreciar que su comportamiento gráfico curvas ovaladas horizontales, con poco desarrollo de fuerza axial. Las curvas siguen un patrón definido y son sinuosas. Su traza es dependiente de la frecuencia del sismo y de la geometría de la edificación.

En la figura 4.7 se mostró la curva histerética fuerza-deformación del comportamiento del disipador viscoelástico sometido a la acción dinámica del registro sísmico de Lima del 17 de octubre de 1966. Se puede apreciar que su comportamiento gráfico curvas ovaladas diagonales, con bastante desarrollo de fuerza axial. Las curvas siguen un patrón definido y son uniformes. Su comportamiento debido al material con el cual está fabricado el disipador está bastante influenciado con la temperatura de trabajo del mismo.

En la figura 4.8 se mostró la curva histerética fuerza-deformación del comportamiento del disipador por fricción sometido a la acción dinámica del registro sísmico de Lima del 17 de octubre de 1966. Se puede apreciar que su comportamiento gráfico líneas rectas horizontales y verticales, con regular desarrollo de fuerza axial. Las líneas rectas siguen un patrón definido y son uniformes. La uniformidad de las líneas horizontales es debida al inicio de la fuerza de deslizamiento y la verticalidad de las líneas verticales es debida a fuerza continua uniforme ejercida por la fricción.

En la figura 4.9 se muestra la curva histerética fuerza-deformación del comportamiento del disipador por fluencia sometido a la acción dinámica del registro sísmico de Lima del 17 de octubre de 1966. Se puede apreciar que su comportamiento gráfico líneas rectas con un pequeño ángulo de inclinación respecto a la horizontal y líneas rectas verticales también con un pequeño ángulo de inclinación respecto a la vertical, con mediano desarrollo de fuerza axial. Las líneas rectas siguen un patrón definido y son uniformes. Las líneas rectas con un pequeño ángulo de inclinación respecto a la horizontal se deben al aumento de rigidez por endurecimiento del material en el rango plástico y las líneas rectas con un pequeño ángulo de inclinación respecto a la vertical se deben a la rigidez del material en el rango elástico.

Se comprueba, que la inclusión de disipadores de energía influye directamente en las fuerzas internas de los elementos estructurales.

Analizando los resultados obtenidos, llegamos a las siguientes conclusiones:

- La adición de sistemas pasivos de disipación de energía en edificaciones, permite la disminución de los períodos de la primera forma de vibración con los diversos tipos de disipadores de energía hasta en un 57,84%; así mismo, las frecuencias correspondientes a dicha forma de vibración se incrementan hasta en un 137,21%; disminuyen los desplazamientos máximos del tercer piso en el eje OX desde un 34,63% hasta un 41,40% y en el eje OY desde un 10,85% hasta en un 23,24%. También disminuyen las fuerzas axiales máximas desde un 14,45% hasta un 22,07%; disminuyen las fuerzas cortantes máximas desde 9,35% hasta 11,94%; disminuyen los momentos flectores máximos entre 9,72% y 11,60% y disminuyen los momentos torsores desde un 31,37% hasta un 47,22%.
- La comparación de los resultados obtenidos por los diferentes disipadores de energía incorporados al modelo estructural analizado, nos permite indicar que la mayor disminución de desplazamientos y distorsiones en el eje OY, fuerzas cortantes, momentos flectores y momentos torsores del primer piso se da con el disipador de energía por fluencia. Los mayores desplazamientos y distorsiones en el eje OX, mayores fuerzas axiales, fuerzas cortantes y momentos torsores del primer piso se da con el disipador de energía viscoelástico. Los resultados obtenidos por los disipadores de energía viscosos y los disipadores de energía por fricción se encuentran entre los dos disipadores de energía anteriormente indicados.
- Se concluye que el mejor disipador de energía es el viscoelástico, por las siguientes razones:
 - a) De la tabla 3.7, se puede apreciar que cumple con la secuencia lógica de desplazamientos ($X_{m\acute{a}x} > Y_{m\acute{a}x}$), y las distorsiones máximas de entrepisos no superan los valores permisibles de la Norma Peruana de Diseño Sismorresistente E030-2006.
 - b) En la tabla 3.8, los valores de $N_{m\acute{a}x}$, $V_{m\acute{a}x}$, $M_{m\acute{a}x}$ y $M_{t,m\acute{a}x}$ son los más cercanos a los valores de la estructura sin disipadores, lo cual es confiable y seguro.
 - c) En la tabla 3.11 se puede apreciar que el disipador viscoelástico absorbe mayor fuerza axial y se deforma menos (figura 4.7), lo cual concuerda con la disipación de energía mostrada en la figura 4.3, garantizando de esta manera su trabajo durante toda la acción del sismo, lo cual es importante para eventos sísmicos de larga duración.

4.5 COSTO DE ESTRUCTURA CON DISIPADORES vs. COSTO DE ESTRUCTURA TRADICIONAL

La incorporación de disipadores de energía en la estructura involucra un costo, siendo este muy importante en la toma de decisiones del uso de los disipadores y que tipo de disipadores podrían ser utilizados en un determinado proyecto.

El análisis, diseño, selección, fabricación e instalación de los disipadores en una estructura depende de varios e importantes aspectos que incluyen:

- Aceleración sísmica
- Condiciones del terreno de fundación
- Tipo de estructura
- Período de vida útil de la estructura
- Objetivos de desempeño
- Cantidad de disipadores
- Ciclo de vida de los disipadores
- Capacidad requerida de los disipadores
- Reforzamiento requerido de los elementos estructurales
- Instalación y detalles constructivos
- Interrupción de la ocupación y puesta en servicio durante la construcción
- Mantenimiento requerido, inspección y costos de reemplazo

Varios de estos puntos citados no han sido adecuadamente tratados en las investigaciones y algunos son bastante variables.

La estructura con disipadores de energía tendría un ahorro debido a que no es necesario un aumento de la sección de las columnas como alternativa de solución para rigidizar la estructura nueva. En cambio, si se rigidiza la estructura, se tendría un incremento en el costo, incluyendo concreto, acero y encofrado. La estructura con la inclusión de disipadores de energía, un disipador por nivel, tendría un costo solo de los disipadores. Esta comparación se dio en el supuesto caso de una estructura nueva, en cambio, si fuera una estructura existente y se reforzaría con la alternativa tradicional, los costos se incrementarían, pudiendo variar según las características propias de la estructura y considerando el tiempo de construcción.

Esto quiere decir, que la estructura con disipadores de energía tendría un ahorro debido a que no sería necesario un reforzamiento de la estructura, en cambio para el caso del esquema tradicional, se tendría que rigidizar la estructura, cuyo costo aproximado sería de \$80/m² (del 11% al 20% del costo total).

El costo de un departamento en promedio en el distrito de Jesús María es de \$36000 (\$400/m²) y en el distrito de Miraflores de \$63000 (\$700/m²). En resumen, nos brinda un costo de \$400 a \$700/m². Los disipadores de energía costarían \$8000 por piso,

\$4000 por departamento, lo que nos brinda un costo de \$47/m² (del 6% al 11% del costo total). El costo solamente de la estructura es aproximadamente de \$150/m², lo que nos brinda un costo del 21% al 38% del costo total. El costo de reparación de las estructuras es de \$65/m² (del 9% al 16% del costo total), el de reparación y reforzamiento puede ser aproximadamente de \$80/m² (del 11% al 20% del costo total), sin considerar acabados e instalaciones.

Al evaluar los costos de las estructuras con disipadores de energía, se deben de tener en consideración los siguientes aspectos:

- Ahorro en elementos y placas
- Ahorro en cimentación
- Tiempo de reparación y puesta en servicio de la estructura
- Costo de reparación en elementos estructurales y acabados
- Daño en instalaciones eléctricas, sanitarias, gas natural, etc.
- Mayor seguridad por incendios post-sismo
- Estructura nueva o existente

CONCLUSIONES

1. Como resultado de los diferentes tipos de disipadores de energía, se eligieron cuatro modelos, que consideran la disipación pasiva de energía y que poseen una amplia aplicación para estructuras sismorresistentes y adaptación a los programas informáticos para el cálculo sísmico de edificios. Los cálculos numéricos se efectuaron a través del programa SAP2000.
2. La adición de sistemas pasivos de disipación de energía, ha permitido la disminución de los períodos de la primera forma de vibración con los diversos tipos de disipadores de energía hasta un 57,84%. Asimismo, las frecuencias correspondientes a dicha forma de vibración se incrementaron en un 137,21%; disminuyeron los desplazamientos máximos del tercer piso en el eje OX desde 34,63% hasta 41,40% y en el eje OY desde 10,85% hasta 23,24%. También disminuyeron las fuerzas axiales máximas desde 14,45% hasta 22,07%; disminuyeron las fuerzas cortantes máximas desde 9,35% hasta 11,94%; disminuyeron los momentos flectores máximos en el intervalo de 9,72% a 11,60% y disminuyeron los momentos torsores desde 31,37% hasta 47,22%.
3. La disipación de energía con el disipador viscoso absorbe el 7,61% de la energía inicial del sismo, con el disipador viscoelástico el 27,49%; con el disipador por fricción el 11,66% y con el disipador por fluencia el 31,41%.
4. La comparación de los resultados obtenidos nos permite indicar que la mayor disminución de desplazamientos y distorsiones en el eje OY, fuerzas axiales, fuerzas cortantes, momentos flectores y momentos torsores del primer piso se da con el disipador de energía por fluencia. Los mayores desplazamientos y distorsiones en el eje OX, mayores fuerzas axiales, fuerzas cortantes, momentos flectores y momentos torsores del primer piso se da con el disipador de energía viscoelástico. Los resultados obtenidos por los disipadores de energía viscosos y los disipadores de energía por fricción se encuentran entre los dos disipadores de energía anteriormente indicados.
5. Analizando las formas de vibración espacial del edificio, llegamos a la conclusión, que el efecto de alabeo en la losa del tercer piso no surge en ninguna de las 12 primeras formas de vibración libre analizadas.
6. Los resultados indican que los disipadores viscosos se comportan mejor en estructuras flexibles y los disipadores por fluencia en estructuras más rígidas; la rigidez de los disipadores de energía disminuye en menor proporción las fuerzas axiales máximas; la disminución de las fuerzas cortantes máximas es similar para los cuatro tipos de disipadores de energía, no influenciando de manera importante las características propias de cada uno de los disipadores; la mayor disminución de los momentos

flectores máximos se consigue con los disipadores por fluencia, debido a la ductilidad propia de material del que está fabricado el disipador y la mayor disminución de los momentos flectores máximos se consigue con los disipadores por fluencia, debido a su adecuada y bien definida curva histerética.

7. Se puede apreciar del comportamiento de los disipadores, que el disipador viscoso desarrolla poca fuerza axial y es dependiente de la frecuencia del sismo; el disipador viscoelástico desarrolló importante fuerza axial y es bastante influenciado con la temperatura de trabajo; el disipador por fricción desarrolla regular fuerza axial y la uniformidad de las líneas horizontales es debida al inicio de la fuerza de deslizamiento y la verticalidad de las líneas verticales es debida a la fuerza continua uniforme ejercida por la fricción; el disipador por fluencia desarrolla mediana fuerza axial y las líneas rectas con un pequeño ángulo de inclinación respecto a la horizontal son debidas al aumento de rigidez por endurecimiento del material en el rango plástico y las líneas rectas con un pequeño ángulo de inclinación respecto a la vertical son debidas a la rigidez del material en el rango elástico.
8. En una estructura convencional la fuerza cortante basal es tomada principalmente por los muros estructurales, pero en una estructura con disipadores de energía la disipación de energía sísmica de entrada la realizan los disipadores y reducen la energía sísmica absorbida por la estructura.
9. Con la información obtenida se concluye que el mejor disipador es el disipador de energía viscoelástico, por su secuencia lógica de desplazamientos ($X_{m\acute{a}x} > Y_{m\acute{a}x}$); por que los valores de $N_{m\acute{a}x}$, $V_{m\acute{a}x}$, $M_{m\acute{a}x}$ y $M_{t,m\acute{a}x}$ son los más cercanos a los valores de la estructura sin disipadores lo cual es confiable y seguro; y porque el disipador viscoelástico absorbe mayor fuerza axial y se deforma menos, lo cual concuerda con el gráfico de energías de toda la estructura.
10. Se recomienda la utilización de disipadores de energía por fluencia para estructuras rígidas y flexibles por controlar adecuadamente las deformaciones y disminuir en mayor magnitud los esfuerzos en columnas, lo cual es notorio en los disipadores por fricción, donde la reducción de esfuerzos en vigas y columnas es menor.
11. El amortiguamiento suplementario en las estructuras, es un método efectivo que es recomendable su utilización para resistir las fuerzas sísmicas en estructuras, por lo cual las dimensiones en los elementos estructurales se pueden reducir debido a la disminución de la energía absorbida por la estructura, que es un factor importante a considerar para estructuras nuevas, que necesiten reparación o reforzamiento, siendo los disipadores de energía una de las principales soluciones para la protección sísmica de estructuras en el presente siglo.

12. Se recomienda realizar investigaciones en el campo inelástico, considerando el comportamiento no-lineal de los elementos estructurales y los disipadores de energía; así como el efecto de interacción suelo-estructura en edificios con disipadores de energía, considerando la flexibilidad de la base de cimentación, las propiedades inerciales de los suelos, las características de los disipadores de energía distribuidos en altura y la variación de la disipación de energía considerando cimentaciones flexibles.
13. Es notorio el efecto de la disipación de energía en el análisis sísmico, debiendo de mejorarse la Norma Peruana E030-2006, incluyendo la exigencia de dicho tipo de análisis, considerando las características de los registros sísmicos peruanos y las características propias de cada uno de los suelos de fundación.

BIBLIOGRAFIA

1. **Aiken I.** Testing of seismic isolators and dampers considerations and limitations. Proceedings, Structural Engineering World Congress, San Francisco, California. USA, 1998.
2. **APPLIED TECHNOLOGY COUNCIL.** Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings. ATC40, Report N° SSC 96-01. Redwood City, California. USA, 1996.
3. **Bozzo L.** Análisis y diseño de estructuras equipadas con disipadores de energía SL. Instituto de la Construcción y Gerencia. Lima – Perú, 2002.
4. **Bozzo L., Ordoñez D.** Disipadores mecánicos de energía. Revista BIT. Barcelona – España, 2001.
5. **Bozzo L., Barbat H.** Diseño sismorresistente de estructuras. Instituto de la Construcción y Gerencia. Lima – Perú, 2002.
6. **Buckle I.** Passive control of structures for seismic loads. 12th World Conference of Earthquake Engineering. Auckland. New Zealand, 2000.
7. **Chang S., Makris N.** Effect of various energy dissipation mechanisms in suppressing structural response. 12th World Conference of Earthquake Engineering. Auckland. New Zealand, 2000.
8. **Cominetti S., Cruz E.** Elastic and inelastic response of three-dimensional buildings models, a comparison of different models for analysis. 12th World Conference of Earthquake Engineering. Auckland. New Zealand, 2000.
9. **Constantinou M., Symans M.** Seismic response of structures with supplemental damping. Journal of Structural Design of Tall Buildings, Vol. 2, p. 93-132. USA, 1993.
10. **De La Cruz S., López F., Bozzo L., Pujades L.** Estudio paramétrico de la eficacia de disipadores friccionales para protección antisísmica de edificios. 2^{do} Congreso Iberoamericano de Ingeniería Sísmica. España, 2001.
11. **Edelstein R.** Diseño estructural, no-linealidad y balance energético. XVII Jornada Argentina de Ingeniería Estructural. Rosario – Santa Fe. Argentina, 2002.
12. **FEMA.** NEHRP Guidelines and commentary for the seismic rehabilitation of buildings. Reports N° 273-274. Washington, D.C. USA, 1997.
13. **Goel R.** Passive control of earthquake-induced vibrations in asymmetric buildings. 12th World Conference of Earthquake Engineering. Auckland. New Zealand, 2000.
14. **Hussain S., Lee D., Retamal E.** Viscous damping for base isolated structures. Saif Hussain & Associates, Woodland Hills, CA. USA 1994.
15. **Jara J., Gayala A., Miranda E.** Seismic behavior of structures with energy dissipating systems in Mexico. 12th World Conference of Earthquake Engineering. Auckland. New Zealand, 2000.
16. **Kelly T.** In structure damping and energy dissipation. Design Guidelines Published by Holmes Consulting Group, Wellington. New Zealand, 2001.
17. **Kim D., Kwin H., Jeong M.** An experimental study of the dynamic characteristics of viscous fluid dampers for base isolated buildings. 12th World Conference on Earthquake Engineering. Auckland. New Zealand, 2000.
18. **Klembezyc A., Mosher M.** Applications of hermetically sealed fluid dampers for low level, wide bandwidth vibration isolation. Tayco Developments, Inc, North Tonawanda, NY. USA, 2001.

19. **Lubliner J.** Plasticity theory. Macmillan Publishing Company, New York. USA, 1990.
20. **Marazzi F., Magonette G., Renda V.** From active to semi-active control: theoretical and implementation aspects. Article Publisher by European Commission, Joint Research Centre. Italy, 2001.
21. **Marsh C.** The control of building motion by friction dampers. 12th World Conference of Earthquake Engineering. Auckland. New Zealand, 2000.
22. **McNamara R.** Seismic damage control with passive energy devices: a case study. McNamara/Salvia, Inc. Consulting Structural Engineers. Boston. USA, 2003.
23. **Miyamoto H., Taylor D.** Structural control of dynamic blast loading using fluid viscous dampers. Marr Shaffer & Miyamoto, Inc. Sacramento, California. USA, 2001.
24. **Nakano Y.** Recent seismic retrofit techniques of existing RC buildings in Japan. INCEDE Report 19, Kobe Earthquake, University of Tokyo. Japan, 1998.
25. **Nawrotzki P.** Reduction of seismic structural responses using spring elements and viscodampers. SEI - ASCE, Structures Congress & Exposition, Denver, CO. USA, 2002.
26. **Olariu I., Olariu F., Sarbu D.** Base isolation versus energy dissipation for seismic retrofitting of existing structures. 12th World Conference on Earthquake Engineering. Auckland. New Zealand, 2000.
27. **Pong W.** Design parameters for multi-story structures with damping devices. CTBUH Review / Vol. 01. N° 3. School of Engineering, San Francisco State University. USA, 2001.
28. **Popov E., Grigorian C.** Energy dissipation with slotted bolted connections. Report UCB/EERC-94/02. Earthquake Engineering Research Center, College of Engineering, University of California. Berkeley, California. USA, 1994.
29. **Przemieniecki J.** Theory of matrix structural analysis. Dover Publications, Inc, New York. USA, 1985.
30. **Reglamento Nacional de Edificaciones.** Instituto de la Construcción y Gerencia. Lima – Perú, 2006.
31. **Ruiz S., Badillo H., Silva F., Esteva L.** Seismic design criteria for retrofitting of buildings with hysteretic energy dissipators. 12th World Conference on Earthquake Engineering. Auckland. New Zealand, 2000.
32. **Sánchez P., Sonzogni V.** Análisis sísmico no-lineal de estructuras de edificios. XVII Jornada Argentina de Ingeniería Estructural. Rosario – Santa Fe. Argentina, 2002.
33. **SAP 2000. Integrated Finite Element Analysis and Design of Structures.** Structural and Earthquake Engineering Software. Computers and Structures, Inc. University of California. Berkeley, California, 2007.
34. **Soong T., Spencer B.** Active, semi-active and hybrid control of structures. 12th World Conference on Earthquake Engineering. Auckland. New Zealand, 2000.
35. **Symans M., Constantinou M., Garnjost K.** Semi-active fluid viscous dampers for seismic response control. State University of New York, Department of Civil Engineering, Buffalo, NY. USA, 1993.
36. **Taylor D.** Buildings: design for damping. Proceedings of the Boston Society of Civil Engineers, BSCES, Lecture Series, "Dynamics of Structures". USA, 1999.

37. **Taylor D.** Energy management utilizing the hydraulic shock absorber. Taylor Devices, Inc. North Tonawanda, NY. USA, 2001.
38. **Taylor D.** Structural applications of fluid viscous dampers. Taylor Devices, Inc. North Tonawanda, NY. USA, 2003.
39. **Taylor D., Constantinou M.** Development and testing of an improved fluid damper configuration for structures having high rigidity. State University of New York, Department of Civil Engineering, Buffalo, NY. USA, 1997.
40. **Tsai M., Chang K.** A study on modal strain energy method for viscoelastically damped structures. 12th World Conference on Earthquake Engineering. Auckland. New Zealand, 2000.
41. **UBC.** Seismically isolated structures design requirements – commentary. NEHRP Recommended Provisions for New buildings. Uniform Building Code. USA, 2000.
42. **UBC.** Structures with damping systems – commentary. NEHRP Recommended Provisions for New buildings. Uniform Building Code. USA, 2000.
43. **Vera R., Ramírez H., Martínez J., Miranda S.** Prueba experimental de un dispositivo disipador de energía de tipo marco interior ante cargas laterales. 2^{do} Congreso Iberoamericano de Ingeniería Sísmica. España, 2001.
44. **Villarreal Castro Genner.** Interacción sísmica suelo-estructura en edificaciones con zapatas aisladas. Asamblea Nacional de Rectores. Lima – Perú, 2006.
45. **Villarreal Castro Genner.** Interacción suelo-estructura en edificios altos. Asamblea Nacional de Rectores. Lima – Perú, 2007.
46. **Whittaker A.** Seismic protective systems. CIE 619 Earthquake Engineering and Structural Dynamics. USA, 2000.
47. **Wilson E.** Three dimensional static and dynamic analysis of structures. A Physical Approach with Emphasis on Earthquake Engineering, Computer and Structures, Inc. Berkeley, California. USA, 2002.