



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE INGENIERÍA
DIVISIÓN DE INGENIERÍA CIVIL Y GEOMÁTICA**

**COMPORTAMIENTO DE ESTRUCTURAS ANTE ACCIONES
SÍSMICAS UTILIZANDO AMORTIGUADORES VISCOSOS
COMO SISTEMAS DE DISIPACIÓN PASIVA DE ENERGÍA**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

I N G E N I E R O C I V I L

PRESENTA:

JONATHAN JAVIER CORTÉS PÉREZ

DIRECTOR DE TESIS:

M. en I. FERNANDO MONROY MIRANDA



**MEXICO D.F., CIUDAD UNIVERSITARIA
ABRIL 2012**



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

AGRADECIMIENTOS

*“El arte del ingeniero es el arte de lo posible”
Santiago Calatrava*

A la UNAM por haberme enseñado el sentido del espíritu universitario.

A todos los profesores e ingenieros que dejaron su huella y compartieron su conocimiento y experiencia, y que ha hecho de mi el profesionalista que soy hoy.

A mi director de tesis por guiarme en este trabajo

A mis padres, que por su apoyo he llegado hasta aquí.

COMPORTAMIENTO DE ESTRUCTURAS ANTE ACCIONES SÍSMICAS UTILIZANDO AMORTIGUADORES VISCOSOS COMO SISTEMAS DE DISIPACIÓN PASIVA DE ENERGÍA

ÍNDICE

OBJETIVO :

Estudiar el comportamiento de estructuras con amortiguadores de fluido viscoso como elementos de protección sísmica, evaluando y comparando su respuesta ante acciones sísmicas para distintas configuraciones o distribuciones, utilizando para ello valores de referencia como lo son: periodos de vibración, desplazamientos, velocidades y aceleraciones.

I.	INTRODUCCIÓN	5
i.	Introducción	
1.	CAPÍTULO 1: CONCEPTOS BÁSICOS	8
1.1.	Vibraciones	
1.1.1.	Definición	
1.1.2.	Tipos de vibraciones	
1.1.2.1.	Vibraciones libres de sistemas no amortiguados	
1.1.2.2.	Vibraciones libres de sistemas amortiguados	
1.1.2.3.	Vibraciones libres de sistemas amortiguados y con fuerza externa	
1.1.2.4.	Resonancia	
2.	CAPÍTULO 2 : MARCO TEÓRICO	21
2.1.	Respuesta de los Sistemas Lineales	
2.1.1.	Características fundamentales de la energía de entrada	
2.1.1.1.	Energía de entrada en un sistema elástico sin amortiguamiento	
2.1.1.2.	Energía de entrada en un sistema elástico con amortiguamiento	
2.1.1.3.	Energía de entrada en sistemas elástoplásticos	

- 2.2. Energía disipada mediante amortiguamiento**
 - 2.2.1. Significado del término de amortiguamiento
 - 2.2.2. Energía disipada por el término de amortiguamiento
 - 2.2.3. Evaluación de V_D/V_E por analogía entre amortiguamiento viscoso y amortiguamiento histerético
 - 2.2.4. Acoplamiento entre amortiguamiento histerético y amortiguamiento viscoso

3. CAPÍTULO 3: SISTEMAS DE DISIPACIÓN DE ENERGÍA SÍSMICA 40

3.1. Introducción

3.2. Sistemas de disipación de energía

- 3.2.1. Sistemas de control de vibraciones
 - 3.2.1.1. Sistemas por plastificación de metales
 - 3.2.1.2. Sistemas por fricción
 - 3.2.1.3. Sistemas por extrusión de metales
 - 3.2.1.4. Sistemas viscoelásticos
 - 3.2.1.5. Sistemas de masa
 - 3.2.1.6. Sistemas de impacto
 - 3.2.1.7. Sistemas activos
 - 3.2.1.8. Sistemas semi-activos
 - 3.2.1.9. Sistemas híbridos
- 3.2.2. Sistemas de aislación
 - 3.2.2.1. Apoyos de goma laminada con capas de acero
 - 3.2.2.2. Aislación de base híbrida
 - 3.1.1.1. Apoyos de goma con alto amortiguamiento
 - 3.1.1.2. Sistemas de fricción puros
 - 3.2.2.2.1. Péndulo de fricción
 - 3.2.2.3. Sistemas elásticos-friccionales
 - 3.2.2.4. Pisos aislantes

4. CAPÍTULO 4: CARACTERÍSTICAS Y COMPORTAMIENTO DE LOS AMORTIGUADORES VISCOSOS 62

4.1. Introducción

4.2. Descripción de los amortiguadores viscosos

- 4.2.1. Vástago del pistón
- 4.2.2. Cilindro
- 4.2.3. Fluido
- 4.2.4. Sellos
- 4.2.5. Cabeza del pistón

4.2.6. Empaque	
4.2.7. Acumulador	
4.2.8. Orificios	
4.3. Funcionamiento	
4.4. Amortiguamiento viscoso	
4.4.1. Propiedades del amortiguador	
4.4.2. Interacción de la estructura con el amortiguador	
4.5. Resumen	
5. CAPÍTULO 5: MODELACIÓN Y ANÁLISIS DE EDIFICIOS CON AMORTIGUADORES VISCOSOS	76
5.1. Introducción	
5.2. Características de la estructura	
5.2.1. Sistema estructural básico – SB	
5.2.2. Sistema disipador – SD	
5.2.3. Análisis lineal	
5.2.3.1. Análisis dinámico modal espectral	
5.2.4. Análisis no-lineal	
5.2.4.1. Elección del amortiguador	
5.3. Resultados	
5.3.1. Respuesta en el tiempo	
5.3.2. Elementos mecánicos	
6. CAPÍTULO 6: EJEMPLOS DE APLICACIONES DE LOS SISTEMAS DE DISIPACIÓN DE ENERGÍA	98
6.1. Implementaciones estructurales	
6.1.1. Torre Mayor – Ciudad de México	
6.1.2. The Pacific Northwest Baseball Stadium – Seattle, Washington	
6.1.3. Los Ángeles City Hall – L.A., California	
6.1.4. The San Francisco Civic Center Office Building – S.F., California	
7. CAPÍTULO 7: COMENTARIOS Y CONCLUSIONES	105
7.1. Comentarios y Conclusiones	

8. REFERENCIAS	108
8.1. Bibliográficas	
9. APÉNDICE	110
9.1. Apéndice A: Aplicaciones estructurales de los amortiguadores de fluido viscoso en el mundo	

I: INTRODUCCIÓN

i. INTRODUCCIÓN

En el diseño de estructuras, en principio se consideran los efectos gravitatorios y las cargas adicionales debidas a las sobrecargas según el uso del edificio. Cuando la estructura demanda una protección adicional para fuerzas ambientales como el viento, mareas y sismos, la solución para la tipología estructural empleada se puede encontrar en los sistemas de aislación y control de vibraciones.

Las aceleraciones, causadas por las vibraciones, que se producen en los pisos superiores son perceptibles por las personas provocando incomodidad y algunas veces conduciendo al abandono del lugar por algunas horas. La percepción humana del movimiento de una estructura se debe casi enteramente a la componente fluctuante del movimiento. La percepción está ligada a la vibración de la estructura, ya sea por flexión o por torsión, y no a la deflexión.

Tradicionalmente, el diseño sismorresistente se basa en satisfacer la ecuación de demanda externa y capacidad de la estructura. La demanda considera las fuerzas externas y deformaciones generadas en la estructura por el sismo; la capacidad considera la resistencia y deformabilidad que puede ser desarrollada por la estructura sin comprometer su estabilidad. Así, un diseño seguro es el que cumple con:

$$\textit{Capacidad} > \textit{Demanda}$$

El diseño sismorresistente convencional ha tratado siempre de satisfacer esta desigualdad a través de aumentar la capacidad de los elementos estructurales. Lo que aportan los sistemas de control de vibraciones al diseño sismorresistente convencional, es satisfacer la ecuación *Capacidad > Demanda* reduciendo la demanda.

Esto no significa que alteremos la excitación, pero si lo que percibe el sistema estructural a través de modificar sus propiedades dinámicas de masa, rigidez y amortiguamiento, de modo que las vibraciones inducidas sean considerablemente menores.

Como forma de disminuir los efectos de los sismos en las estructuras, se está introduciendo la disipación de energía, metodología que ha demostrado a nivel mundial la capacidad de disminuir notoriamente los daños que producen los terremotos.

Los terremotos imponen movimientos en la base de las estructuras que se traducen en fuerzas restauradoras en sus elementos resistentes. En el diseño de edificios se admite que estos alcancen estados de tensión-deformación elastoplásticos, bajo la condición de que los daños no provoquen víctimas, ni colapso de la estructura.

Es posible actualmente establecer objetivos de desempeño de estas estructuras, bajo la acción de diferentes niveles de amenaza sísmica, mediante la comparación de desplazamientos, distorsiones de piso o rotaciones de rótulas plásticas, con valores de referencia que indican el grado de daño. Este enfoque, que implica admitir mayor o menor daño estructural ante terremotos destructivos sin pérdidas de vidas ni colapso, puede cambiarse o combinarse con un esfuerzo dirigido a proteger a la estructura, de manera de reducir el daño o anularlo.

Todas las estructuras vibrantes disipan energía producto de esfuerzos internos, rozamiento, rotura, deformaciones plásticas, etc., mientras mayor es la capacidad de disipación de energía, menor será la amplitud de las vibraciones. Algunas estructuras tienen muy poco amortiguamiento, por lo que experimentan grandes amplitudes de vibración incluso para sismos moderados. Los métodos que incrementan la capacidad de disipación de energía son muy efectivos para reducir la amplitud de la vibración.

En este sentido se han desarrollado diferentes sistemas de protección sísmica de estructuras que pueden clasificarse en tres grandes grupos: sistemas de aislamiento sísmico, sistemas de disipación pasiva de energía y sistemas de control activo o semi-activo. De los tres tipos de amortiguamiento, el pasivo --dado que no requiere de energía externa para su función—es, en general, el de menor costo.

Los sistemas de disipación pasiva de energía tienen como función principal disipar parte de la energía introducida a la estructura principal por el terremoto y por consiguiente disminuir el daño. Abarcan distintos tipos de materiales y dispositivos que mejoran el amortiguamiento, rigidez y resistencia de una estructura.

Toda estructura disipa o elimina la energía de un sismo mediante deformaciones, esto puede ser alcanzado ya sea por la conversión de energía cinética en calor, o por la transferencia de energía entre modos de vibración.

El primer método incluye dispositivos que operan en base a principios tales como la fricción, fluencia de metales, transformaciones de fase en metales, deformaciones de sólidos visco-elásticos o fluidos. El segundo método incluye la incorporación de osciladores adicionales, los cuales actúan como absorbedores de vibraciones dinámicas.

En los sistemas de disipación pasiva de energía se encuentran los dispositivos (amortiguadores) que utilizan fluidos de tipo visco-elásticos, los cuales proporcionan la acción amortiguadora. Este amortiguamiento es una manera de agregar la disipación de la energía al sistema lateral de una estructura.

Un amortiguador disipa energía empujando el líquido a través de un orificio, produciendo una presión que amortigua la fuerza. Estas fuerzas que amortigua son 90° fuera de fase con las fuerzas conducidas de la dislocación en la estructura. Esto significa que la fuerza amortiguadora no aumenta perceptiblemente las cargas sísmicas para un grado comparable de deformación estructural.

La adición de los amortiguadores a una estructura puede proporcionar amortiguamiento tan arriba como el 30% del amortiguamiento crítico, y a veces aún más. Esto proporciona una disminución significativa de la excitación del terremoto. La adición de amortiguadores a una estructura puede reducir aceleraciones horizontales del piso y las deformaciones laterales al 50% y a veces más.

CAPÍTULO 1: CONCEPTOS BÁSICOS

1.1. VIBRACIONES

1.1.1. Definición

Una vibración es, en su sentido más general, un movimiento periódico, es decir, un movimiento que se repite con todas sus características después de un cierto intervalo de tiempo, t , llamado *periodo* de la vibración, designado generalmente por el símbolo T .

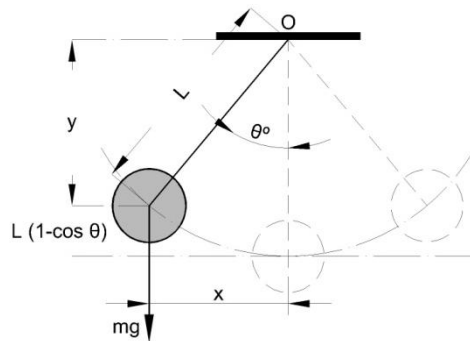


Figura 1.1: Movimiento de un péndulo simple.

El tipo más sencillo de movimiento periódico es el *movimiento armónico*; en él, la relación entre x y t puede expresarse por:

$$x = x_0 \sin \omega t \quad (1.1)$$

que representa las pequeñas oscilaciones de un péndulo simple. El valor máximo del desplazamiento es x_0 llamado *amplitud* de la vibración. El periodo T generalmente se mide en segundos, y su recíproco $f = 1/T$ es la *frecuencia* de la vibración, medida en *ciclos por segundo*. En la ecuación 1.1 aparece el símbolo ω , conocido como *frecuencia circular* y medido en radianes por segundo. La relación entre ω y T es la siguiente:

$$T = \frac{2\pi}{\omega} [s] \quad (1.2)$$

En un movimiento armónico en el cual el desplazamiento esté dado por $x = x_0 \sin \omega t$, la velocidad se encuentra, obteniendo la derivada del desplazamiento con respecto al tiempo

$$\frac{dx}{dt} = \dot{x} = x_0 \omega \cos \omega t \quad (1.3)$$

de tal suerte que la velocidad resulta también armónica con un valor máximo. La aceleración será

$$\frac{d^2x}{dt^2} = \ddot{x} = -x_0 \omega^2 \sin \omega t \quad (1.4)$$

también armónica y con un valor máximo $\omega^2 x_0$.

1.1.2. Tipos de Vibraciones

1.1.2.1. Vibraciones libres de sistemas no amortiguados

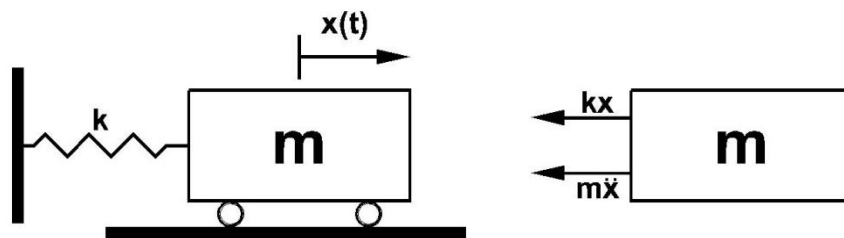


Figura 1.2: Sistema de un grado de libertad. Equilibrio de fuerzas.

Es el sistema más sencillo, queda definido por las siguientes características mecánicas, figura 1.2.

- Masa m , la cual suponemos concentrada en un punto.
- Rigidez k . La rigidez produce una fuerza recuperadora del movimiento, que en un principio se puede considerar elástica y lineal.

En este sistema no se explica la causa inicial del movimiento, suponemos que la partícula sufrió, por ejemplo, un desplazamiento de su posición de equilibrio por lo que la fuerza recuperadora le hizo comenzar a vibrar. A falta de amortiguamiento el oscilador permanecerá continuamente en movimiento.

Los parámetros que definen este movimiento son:

- La amplitud A donde alcanza el máximo desplazamiento.
- La frecuencia circular ω , se define como: $\omega = \sqrt{k/m}$.
- El periodo T .
- La frecuencia natural f , la cual se define a partir del periodo como: $f = \frac{1}{T} = \frac{\omega}{2\pi}$.
- La frecuencia natural por el tiempo que dura el movimiento nos sirve para determinar el número de ondas

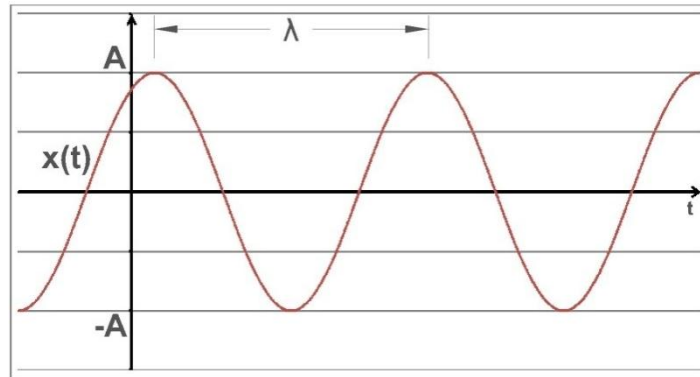


Figura 1.3: Características del movimiento de un sistema simple sin amortiguamiento.

Se dice que una estructura oscila libremente cuando su base permanece inmóvil y no hay fuerzas externas. Los segundos miembros de las Ecs. 2.1 y 2.4 son iguales a cero, y tenemos $x = y$. Puede comprobarse que, bajo estas condiciones, la solución general de la Ec. 2.4 es

$$y(t) = B_1 e^{(-\zeta\omega_1 + i\omega'_1)t} + B_2 e^{(-\zeta\omega_1 - i\omega'_1)t} \quad (1.5)$$

en que t representa el tiempo, B_1 y B_2 son constantes complejas arbitrarias y

$$(\omega')^2 = K/M - (C/2M)^2 \quad (1.6)$$

Frecuentemente se escribe la Ec. 1.5 en formas más convenientes:

$$y(t) = e^{-\zeta\omega_1 t} (a_1 \sin \omega''_1 t + a_2 \cos \omega''_1 t)$$

[con $(\omega_1'')^2 = -(\omega_1')^2$], lo que depende de que $(\omega_1')^2$ sea positiva, cero o negativa respectivamente. En estas ecuaciones a , a_1 y a_2 son constantes reales arbitrarias que tienen unidades de longitud.

En el caso usual ω_1' es real y podemos modificar la Ec. 1.5 dándole la forma

$$y(t) = a e^{[-\zeta\omega_1(t-t_1)]} \sin[\omega_1'(t-t_1)] \quad (1.7)$$

en que a es una constante arbitraria real en unidades de longitud y t_1 es un valor arbitrario de t . En un sistema conservador ($C = 0$), las Ecs. 1.5 y 1.7 describen un movimiento armónico simple; describen un movimiento armónico amortiguado en los sistemas disipadores ($C > 0$).

1.1.2.2. Vibraciones libres de sistemas amortiguados

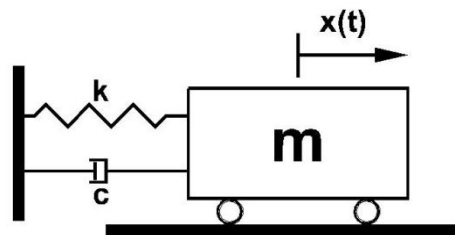


Figura 1.4: Sistema de un grado de libertad con amortiguamiento viscoso.

Un sistema con amortiguamiento queda definido por las características anteriormente tratadas y además por el amortiguamiento que se define habitualmente según la ley de Kevin–Voigt, el cual se hace proporcional a la velocidad del movimiento (amortiguamiento viscoso), actuando siempre en sentido contrario al movimiento.

El amortiguamiento viene definido por su constante de amortiguamiento C y la fuerza debida al amortiguamiento por $F_A = C\dot{x}$ siendo \dot{x} la derivada de la posición respecto al tiempo, es decir, la velocidad.

Este amortiguamiento viene a simular las características reales de la estructura en que la vibración prácticamente termina desapareciendo debido al rozamiento, las fuerzas de fricción internas y la misma viscosidad del material. Figura 1.4.

El funcionamiento de este sistema, consiste en que en un instante t_0 se desplace a la partícula de su posición de equilibrio o bien se le imprima cierta velocidad inicial, de modo que el sistema intente comenzar a vibrar.

La rigidez de la estructura hace que se produzca una fuerza restauradora y lleve a la masa primero a su lugar original y después posiblemente a un punto a una distancia algo menor que la mayor correspondiente al ciclo anterior en sentido contrario al primero como consecuencia de la cantidad de amortiguamiento presente en el sistema que, dependiendo de esta cantidad, el mismo proceso puede repetirse hasta que el sistema vuelva al reposo.

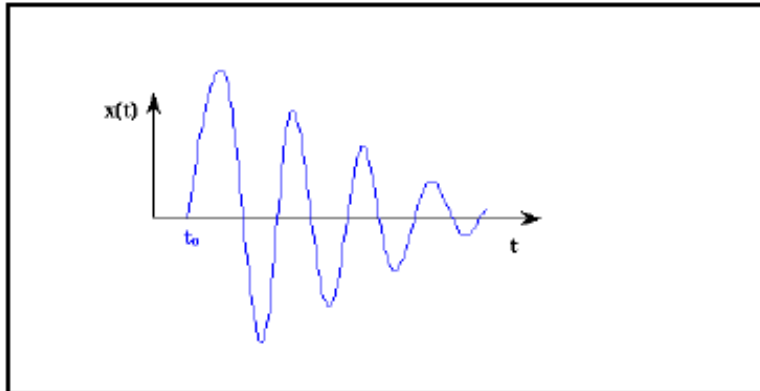


Figura 1.5: Análisis del movimiento de un sistema libre con amortiguamiento.

El diagrama de cuerpo libre de la masa en movimiento se da en la figura 1.6.



Figura 1.6: Equilibrio de fuerzas.

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = 0 \tag{1.8}$$

Su solución es:

$$x = Ae^{R_1 t} + Be^{R_2 t} \tag{1.9}$$

donde

$$R_{1,2} = \frac{C}{2M} \pm \sqrt{\left(\frac{C}{2M}\right)^2 - \frac{K}{M}} \tag{1.10}$$

Se dice que existe un amortiguamiento crítico cuando el radicando es cero

$$\left(\frac{C}{2M}\right)^2 - \frac{K}{M} = 0 \quad (1.11)$$

La cantidad $C_{cr} = 2\sqrt{KM}$ se conoce como *amortiguamiento crítico*. Existen tres tipos de amortiguamiento:

- Sobreamortiguamiento $C > C_{cr}$
- Amortiguamiento crítico $C = C_{cr}$
- Subamortiguado $C < C_{cr}$

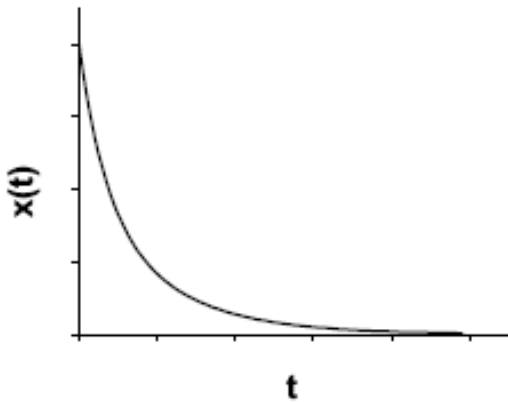


Figura 1.7: Respuesta de un sistema sobreamortiguado.

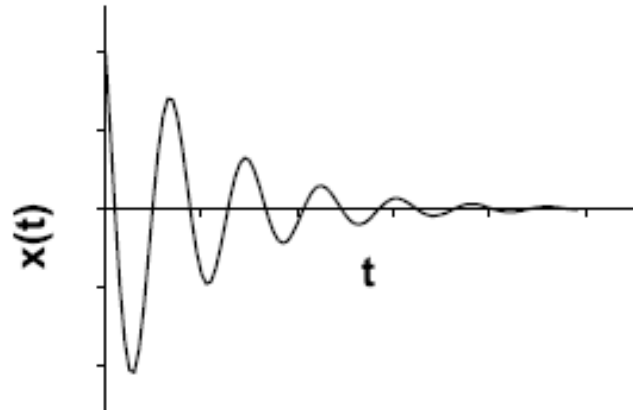


Figura 1.8: Respuesta de un sistema amortiguado.

Cuando las constantes del amortiguador C son iguales o mayores que C_{cr} , el sistema no oscila al desplazarlo o hacerle adquirir velocidad y dejarlo mover libremente, sino que regresa gradualmente a su estado original no deformado, el cual recupera después de un tiempo infinitamente largo.

Cuando las constantes del amortiguador son menores que C_{cr} , el sistema tiende, oscilando, a dicho estado, como lo describe la Ec. 1.7.

Es conveniente definir ζ como la relación C/C_{cr} y usarla como medida del amortiguamiento. Esta cantidad se conoce como *coeficiente de amortiguamiento o relación de amortiguamiento*. En función de ella podemos escribir la Ec. 1.6 como

$$\omega'_1 = \omega_1 \sqrt{1 - \zeta^2} \quad (1.12)$$

y decir que ω_1 es la *frecuencia circular sin amortiguamiento* (es decir, la frecuencia natural de un sistema que tiene la misma masa y rigidez que el sistema considerado, pero carente de amortiguador) y ω'_1 la frecuencia natural circular *amortiguada*. La diferencia entre ω_1 y ω'_1 es comúnmente pequeña; por ejemplo, si ζ es menor del 20% ω'_1 difiere de ω_1 en menos de 2%.

Si la constante del amortiguador C es mayor que el valor crítico $2\sqrt{KM}$, la relación de amortiguamiento excede de uno. En ese caso ω'_1 se convierte en imaginaria; es decir, el sistema no tiene frecuencia amortiguada real y no oscila libremente. Entonces la función seno en la solución para vibraciones que son libres debe remplazarse con una función hiperbólica y ω'_1 con $\omega''_1 = \sqrt{-(\omega'_1)^2}$.

A partir de la frecuencia circular natural podemos calcular la *frecuencia natural* como $\omega_1/2\pi$ o $\omega'_1/2\pi$, según sea el caso, y los *periodos de vibración naturales* sin amortiguar y amortiguados como $T_1 = 2\pi/\omega_1$ y $T'_1 = 2\pi/\omega'_1$, respectivamente.

La relación $y(t)/y(t + T'_1)$ es igual a la relación de amplitudes de ciclos sucesivos. De la Ec. 1.7 podemos deducir la expresión

$$\frac{y(t)}{y(t + T'_1)} = e^{(\zeta \omega_1 T'_1)} \tag{1.13}$$

que tiene significado cuando $\zeta \leq 1$. Al logaritmo natural de esta relación se le llama *decremento logarítmico*. Es igual a $\zeta \omega_1 T'_1 = 2\pi\zeta (1 - \zeta^2)^{-1/2}$.

A veces se usa el cociente de la Ec. 1.13 como medida del amortiguamiento; de esta manera se dice que un sistema tiene amortiguamiento 3:1 cuando su decremento logarítmico es $\ln 3$.

1.1.2.3. Vibraciones estacionarias

Consideremos el caso en el que el subsuelo permanece en reposo y la fuerza exterior varía armónicamente: $\ddot{x}_0 = 0$, $y_0 = a \sin \omega t$. Podemos escribir la solución general de la ecuación homogénea correspondiente, que está dada por la Ec. 1.8, más la solución particular:

$$\frac{y}{a} = B_d \sin(\omega t - \varphi) \tag{1.14}$$

donde

$$B_d = \left[\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_1^2} \right)^2 + \left(2\zeta \frac{\omega}{\omega_1} \right)^2 \right]^{-1/2} \quad (1.15)$$

$$\varphi = \tan^{-1} \frac{2\zeta \omega / \omega_1}{1 - \omega^2 / \omega_1^2} \quad (1.16)$$

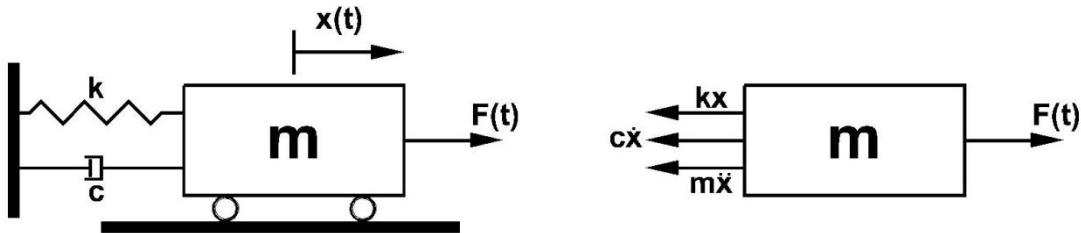


Figura 1.9: Sistema de un grado de libertad sometido a carga armónica. Equilibrio de fuerzas.

B_d es un factor de respuesta adimensional, igual a la relación de amplitudes de respuesta del desplazamiento dinámico al estático, y φ es el desfase angular.

Cuando no existe la fuerza externa es aplicada una solución semejante a la vibración estacionaria debida al movimiento armónico descrito por $x_0 = a \sin \omega t$. En tal caso, $\ddot{x}_0 = -a\omega^2 \sin \omega t$, de manera que

$$-\frac{M}{K} \ddot{x}_0 = a \left(\frac{\omega}{\omega_1} \right)^2 \sin \omega t$$

y se ve que el segundo miembro de la Ec. 2.4 es exactamente el mismo que para el caso en que $y_0 = a \sin \omega t$, salvo por el factor $(\omega/\omega_1)^2$. Por tanto, en este caso,

$$B_d = \frac{(\omega/\omega_1)^2}{\left[\left(1 - \omega^2/\omega_1^2 \right)^2 + \left(2\zeta \omega/\omega_1 \right)^2 \right]^{-1/2}}$$

$$B_d = \left[\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_1^2} \right)^2 + \left(2\zeta \frac{\omega}{\omega_1} \right)^2 \right]^{-1/2} \quad (1.17)$$

que es la expresión para el factor de respuesta del desplazamiento que corresponde a una fuerza armónica externa, con ω y ω_1 intercambiadas.

La primera parte de la solución, la dada por la Ec. 1.7 depende de las condiciones iniciales y tiende a cero después de un tiempo suficientemente largo, sin importar lo pequeña que sea la relación de amortiguamiento. Por tanto, sólo se conserva la parte dada por la Ec. 1.15 para el estado estacionario.

Los cocientes entre las amplitudes dinámicas y estáticas de velocidad y aceleración pueden obtenerse derivando la Ec. 1.14 y son respectivamente iguales a $B_v = (\omega/\omega_1)B_d$ y $B_a = (\omega/\omega_1)^2B_d$. Se dan los tres factores de respuesta en la figura 1.10 para varios cocientes de amortiguamiento.

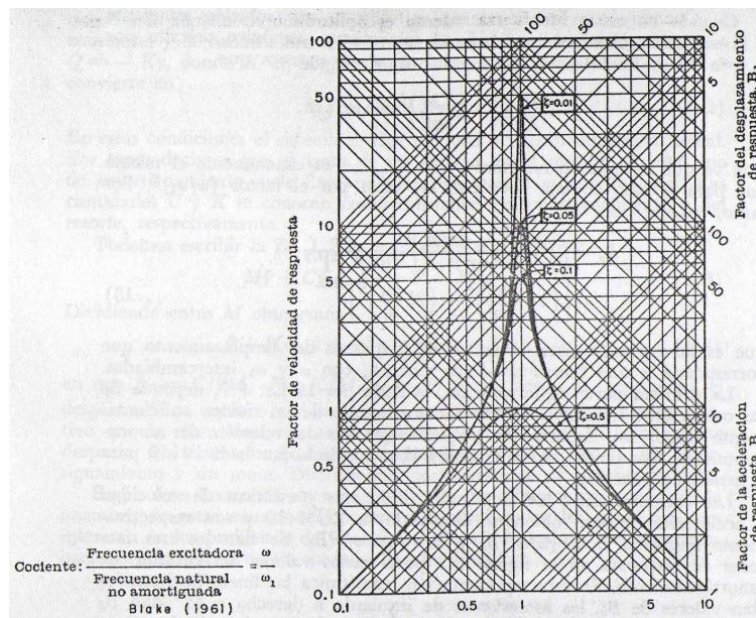


Figura 1.10: Factores de respuesta.

(Fundamentos de Ingeniería Sísmica, Rosenblueth, E. y Newmark, N. M. – Página 24)

Si ω/ω_1 tiende a cero, y se aproxima a y_0 ; es decir, los efectos dinámicos se hacen insignificantes. Si $\omega = \omega_1$, la amplitud de y es $a/2\zeta$ y cuando ω/ω_1 tiende a infinito, la amplitud de y se aproxima asintóticamente a $a(\omega/\omega_1)^2$. Vemos que el amortiguamiento es importante en la vecindad de $\omega = \omega_1$.

De acuerdo con la Ec. 1.16 el ángulo de fase φ va de cero a $\pi/2$ al cambiar ω/ω_1 de cero a uno, y de $\pi/2$ a π al cambiar esta relación de uno a infinito. En los sistemas ligeramente amortiguados la respuesta está prácticamente en fase con la excitación, dentro del rango de frecuencias excitadoras apreciablemente menores que la

frecuencia natural del sistema, y las vibraciones del sistema son prácticamente opuestas a las de la excitación cuando ω excede apreciablemente a ω_1 .

El desfase es $\pi/2$ cuando $\omega = \omega_1$. En la figura 1.10 se muestra la evolución con la frecuencia excitadora de este cociente. Se distinguen tres zonas:

- $\omega'_1 < \omega_1$: cuando $\omega'_1 \cong 0$ la fuerza aplicada es cuasi-estática y por tanto la respuesta coincide con la estática. A medida que ω aumenta, el sistema comienza a vibrar en respuesta a la fuerza aplicada, aumentando la amplificación según la frecuencia excitadora se aproxima al valor de la frecuencia natural del sistema.

El papel que juega el amortiguamiento es doble: por un lado disminuye la amplificación de la respuesta y por otro produce un incremento en el desfase de φ .

- $\omega'_1 \cong \omega_1$: En esta zona se produce la máxima amplificación de la respuesta. Esto ocurre para una frecuencia de excitación

$$\omega'_1 = \omega_1 \sqrt{1 - 2\zeta^2} \quad (1.18)$$

que prácticamente coincide con ω'_1 para los valores habituales del amortiguamiento ($\zeta < 0.1$). la amplificación obtenida para esta frecuencia es

$$\left| \frac{X}{X_{Est}} \right|_{Máx_1} = \frac{1}{2\zeta \sqrt{1 - 2\zeta^2}} \cong \frac{1}{2\zeta} \quad (1.19)$$

- $\omega'_1 > \omega_1$: Según aumenta el valor de la frecuencia de excitación ($\omega'_1 \rightarrow \infty$) al sistema le resulta imposible seguir las oscilaciones inducidas por la acción exterior, por lo que tiende a permanecer en reposo.

$$\left| \frac{X}{X_{Est}} \right|_{\omega'_1 \rightarrow \infty} \rightarrow 0 \quad (1.20)$$

1.1.2.4. Resonancia

Se dice que la función excitadora está en *resonancia* –en vibración armónica– con el sistema cuando el factor de respuesta es máximo. Se obtiene éste cuando $\omega = \omega_1 (1 - 2\zeta^2)^{1/2}$ si el criterio se basa en amplitudes de desplazamiento, cuando $\omega = \omega_1$ si se basa en las amplitudes de velocidad, y cuando $\omega = \omega_1 (1 - 2\zeta^2)^{-1/2}$ si se basa en las amplitudes de aceleración. El valor resonante B_v es $(2\zeta)^{-1}$ y los de B_a y B_d son ambos $(2\zeta)^{-1} (1 - \zeta^2)^{-1/2}$.

En la mayor parte de las estructuras de interés práctico estos valores son casi iguales entre sí, como son las frecuencias de resonancia, ya que para estas estructuras ζ es muy pequeño comparado con uno. Las diferencias son menores de 2% cuando ζ no excede de 20%.

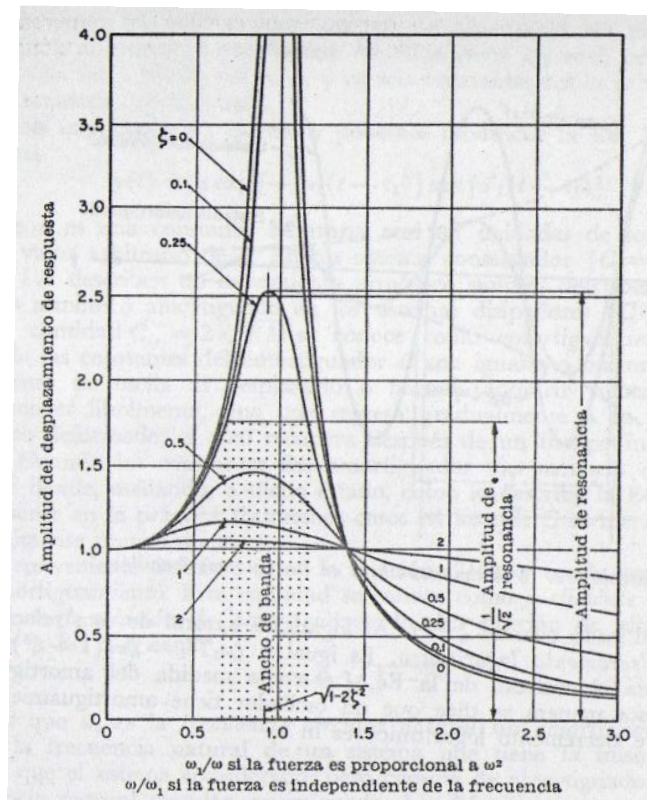


Figura 1.11: Curvas de resonancia. Según Church (1957).
 (Fundamentos de Ingeniería Sísmica, Rosenblueth, E. y Newmark, N. M. – Página 25)

En pruebas con vibraciones forzadas se induce generalmente la perturbación haciendo girar una masa. Si despreciamos la amplitud de la respuesta a los desplazamientos en comparación con el brazo de la masa giratoria, podemos suponer que la fuerza externa varía armónicamente y proporcionalmente a ω^2 . Por tanto, si ejecutamos varias pruebas en un sistema sencillo, manteniendo la masa y su brazo constantes, encontraremos que el desplazamiento de respuesta es proporcional a $\omega^2 B_d$ y, por tanto, a $(\omega/\omega_1)^2 B_d = B_a$.

Examinando la Ec. 1.15, deducimos que la curva que representa las amplitudes del desplazamiento de respuesta con ω como abscisas, cuando el sistema es excitado por una fuerza independiente de ω , es la misma que la curva con abscisas $1/\omega$, cuando el

sistema es excitado por una fuerza proporcional a ω^2 , porque la multiplicación de B_d por $(\omega/\omega_1)^2$ equivale a sustituir ω/ω_1 por su recíproco.

La amplitud máxima de la respuesta ocurre cuando ω/ω_1 o ω_1/ω es igual a $(1 - \zeta^2)^{1/2}$, lo que depende de que la fuerza de excitación sea independiente de la frecuencia proporcional a ω^2 respectivamente. *El ancho de banda de la semipotencia* es la amplitud de variación de las frecuencias en las cuales la respuesta de desplazamiento es igual a $1/\sqrt{2}$ veces la amplitud de resonancia.

De las ecuaciones 1.15 y 1.17 para B_d se deduce que su máximo es igual a $(2\zeta)^{-1} (1 - \zeta^2)^{-1/2}$. Por ende el ancho de banda en cuestión es igual a la diferencia entre ambas raíces de ω que hacen a B_d igual a $1/\sqrt{2}$ veces este máximo.

Para porcentajes de amortiguamiento relativamente pequeños, como los que se encuentran en la mayor parte de las estructuras, la diferencia mencionada es muy aproximadamente igual a $2\zeta\omega_1$. Por tanto, podemos determinar la relación de amortiguamiento con la máxima ordenada de una curva de resonancia si conocemos la magnitud de la amplitud de la respuesta del desplazamiento estático a , o en cada caso del ancho de banda correspondiente a $1/\sqrt{2}$ veces la amplitud de resonancia.

1.1.2.5. Perturbaciones transitorias

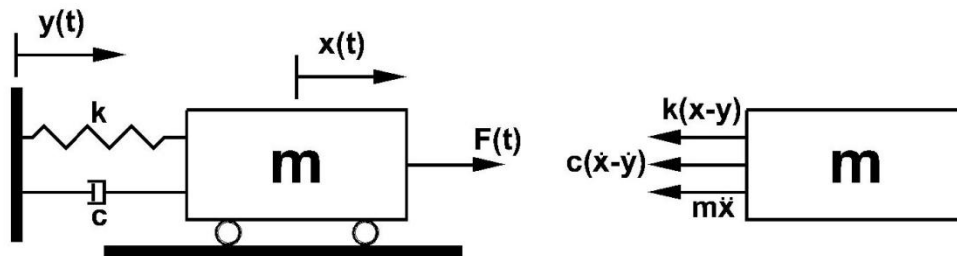


Figura 1.12: Sistema de un g.d.l. sometido a excitación en su base. Equilibrio de fuerzas.

Consideremos el caso en que no existen fuerzas externas y el movimiento del subsuelo consiste en un solo pulso de velocidad, es decir, la aceleración del subsuelo está definida por una función Delta de Dirac: $\ddot{x}_0 = u\delta(t - \tau)$. Aquí u es una constante que tiene las dimensiones de la velocidad. Podemos interpretar la perturbación como un cambio brusco en la velocidad del suelo, de magnitud u en el instante τ .

Como $\dot{x}_0 = 0$ para $t \geq \tau$, es aplicable la solución general de la Ec. 1.7 siempre que $\zeta < 1$. En ella debemos despejar las constantes a y t_1 para satisfacer las condiciones iniciales $y(\tau) = 0$, $y(\tau +) = -u$, lo que se deduce de que en $t = \tau +$ la masa no ha

adquirido movimiento en respuesta al cambio de velocidad del terreno (aquí $\tau +$ es el valor de $t = \tau$ más un incremento infinitesimal de tiempo; en otras palabras es el instante que sigue inmediatamente a τ).

La primera de estas condiciones implica que $t_1 = \tau$. Luego, de la Ec. 1.7,

$$\dot{y}(t) = ae^{[-\zeta\omega_1(t-\tau)]} \{-\zeta\omega_1 \sin[\omega'_1(t-\tau)] + \omega_1 \cos[\omega'_1(t-\tau)]\}$$

de manera que $\dot{y}(\tau +) = a\omega'_1$, y, por la segunda condición inicial, $a = -u/\omega'_1$.

Sustituyendo en la Ec. 1.7 obtenemos

$$y(t) = -\frac{u}{\omega'_1} e^{[-\zeta\omega_1(t-\tau)]} \sin[\omega'_1(t-\tau)] \quad (1.21)$$

Ahora bien, cualquier diagrama de velocidad del subsuelo puede aproximarse mediante una serie de pasos o pulsos, cada uno de magnitud $\ddot{x}_0(\tau)\Delta\tau$, donde \ddot{x}_0 es la aceleración media del subsuelo en el intervalo $\Delta\tau$. La respuesta tendrá la forma de una suma de expresiones semejante a la Ec. 1.21 en que se reemplaza u en cada término por $\ddot{x}_0(\tau)\Delta\tau$. En el límite, si \ddot{x}_0 es continua por tramos, los pulsos se convierten en $\ddot{x}_0(\tau)d\tau$ y la suma se convierte en una integral. Si el sistema parte de reposo y sin deformación en el instante $t = 0$, entonces

$$y(t) = -\frac{1}{\omega'_1} \int_0^t \ddot{x}_0(\tau) e^{-\zeta\omega_1(t-\tau)} \sin[\omega'_1(t-\tau)] d\tau$$

$$\dot{y}(t) = -\int_0^t \ddot{x}_0(\tau) e^{-\zeta\omega_1(t-\tau)} \cos[\omega'_1(t-\tau)] d\tau - \zeta\omega_1 y(t) \quad (1.22)$$

$$\ddot{x}(t) = -\omega_1^2 y(t) - 2\zeta\omega_1 \dot{y}(t)$$

Con amortiguamiento nulo tenemos $\zeta = 0$ y la exponencial se torna igual a 1.

En ocasiones se encontrará conveniente tratar con “respuesta”, la función $r(t)$, definida por $r^2 = (\omega_1 y)^2 + (\dot{y} + \zeta\omega_1 y)^2$. En sistemas no amortiguados, la energía total que se trasmite a la base es $Mr^2/2$, de manera que r es una medida de la energía por unidad de masa del sistema.

Hemos deducido así expresiones que suministran las respuestas a un acelerograma arbitrario. Para diseño estamos interesados en el valor numérico máximo de ciertas respuestas, algunas de las cuales dependen solamente del periodo natural y del grado de amortiguamiento del sistema.

CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO

2.1. RESPUESTA DE LOS SISTEMAS LINEALES

La respuesta del sistema se puede obtener integrando la Ec. 2.1. Si el sistema se mantiene elástico, será posible encontrar una solución analítica a dicha integral. En el caso de que se plastifique habrá que recurrir a la integración numérica.

$$M\ddot{x} + C\dot{y} + Ky = P \quad (2.1)$$

en donde

- M : Masa del sistema;
- C : Constante de amortiguamiento;
- K : Constante del resorte
- x : Desplazamiento total de la masa;
- $y = x - x_0$: El desplazamiento de la masa con respecto al suelo;
- \dot{y} : Rapidez de deformación;
- P : Fuerza externa que obra sobre la masa.

La magnitud más importante de la respuesta es el desplazamiento relativo y , con el cual está muy relacionada la energía. Obtenido y , la ecuación de equilibrio de fuerzas 2.2 se puede transformar en una ecuación de balance de energía.

Si multiplicamos la Ec. 2.1 por el incremento diferencial de desplazamiento relativo dy (o lo que es lo mismo $\dot{y} dt$), e integramos en el intervalo de tiempo $(0, t)$, se obtiene la Ec. 2.2 que representa el balance de energía del sistema en el instante t .

$$M \int_0^t \ddot{y} \dot{y} dt + C \int_0^t \dot{y}^2 dt + \int_0^t Ky \dot{y} dt = \int_0^t P \dot{y} dt \quad (2.2)$$

Los componentes de la Ec. 2.2 son los siguientes:

$$E(t) = \int_0^t P \dot{y} dt \quad (2.3)$$

$$W_e(t) + W_p(t) = M \int_0^t \dot{y} \dot{y} dt + \int_0^t Ky \dot{y} dt \quad (2.4)$$

$$W_h(t) = C \int_0^t \dot{y}^2 dt \quad (2.5)$$

en donde:

- $E(t)$: Energía introducida en el sistema hacia el instante t , a la cual denominaremos en adelante simplemente *energía de entrada en el instante t* ;
- $W_e(t)$: Energía de vibración elástica en el instante t ;
- $W_p(t)$: Energía de deformación plástica acumulada hasta el instante t ;
- $W_h(t)$: Energía disipada por el mecanismo de amortiguamiento hasta el instante t .

La energía de vibración elástica, W_e , se puede descomponer a su vez como sigue:

$$W_e(t) = W_{es}(t) + W_{ek}(t) \quad (2.6)$$

siendo:

- $W_{es}(t)$: Energía de deformación elástica,
- $W_{ek}(t)$: Energía cinética.

El primer término del segundo miembro de la Ec. 2.4 es precisamente la energía cinética $W_{ek}(t)$. Dado que en el instante inicial, $t = 0$, la velocidad relativa vale 0 (es decir, $\dot{y}(0) = 0$), $W_{ek}(t)$ se puede expresar de la siguiente manera:

$$W_{ek}(t) = \frac{M\dot{y}^2(t)}{2} \quad (2.7)$$

Consecuentemente el segundo término del segundo miembro de la Ec. 2.4 vale:

$$W_{es}(t) + W_p(t) = \int_0^t Ky \dot{y} dt \quad (2.8)$$

Si llamamos t_0 al tiempo de duración del terremoto, las magnitudes anteriores en el instante $t = t_0$ se pueden escribir como sigue:

$$\begin{aligned} E &= E(t_0) \\ W_e &= W_e(t_0) \\ W_p &= W_p(t_0) \\ W_h &= W_h(t_0) \end{aligned} \quad (2.9)$$

Siendo:

- E : Energía de entrada total,
- W_e : Energía de vibración elástica,
- W_p : Energía de deformación plástica acumulada,
- W_h : Energía consumida por el mecanismo de amortiguamiento.

Finalmente, la Ec. 2.18 en el instante t_0 en que finaliza el terremoto será:

$$W_e + W_p + W_h = E \quad (2.10)$$

La Ec. 2.10 es la ecuación fundamental de la metodología del proyecto sismorresistente. Está además reforzada por la estabilidad del ingreso de energía total E .

Con la Ec. 2.1 se puede obtener directamente la respuesta en cada instante t , cosa que no es posible con las Ecs. 2.2 y 2.10, pero a cambio estas últimas juegan un papel muy importante a la hora de comprender globalmente el comportamiento del sistema.

Mientras la Ec. 2.1 expresa la condición de equilibrio de fuerzas en un instante determinado, las Ecs. 2.2 y 2.10 contienen la información integrada o acumulada de la vibración.

En la figura 2.1 se muestra la historia temporal de la respuesta de varios sistemas vibracionales en términos de energía.

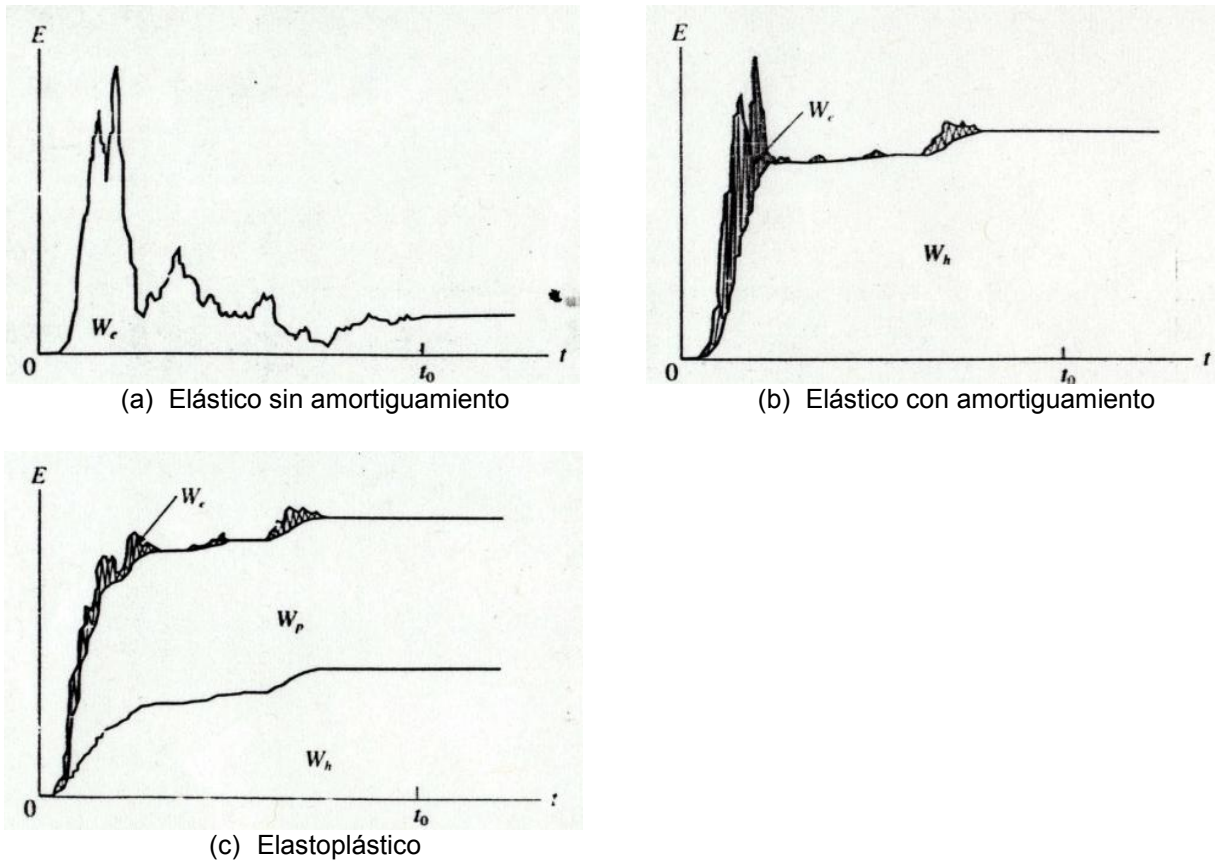


Figura 2.1: Historia de energía de entrada y de energía disipada.

(Metodología Del Proyecto Sismorresistente De Edificios Basada En El Balance Energético, Akiyama, Hiroshi – Página 14)

La figura 2.1(a) corresponde a un sistema elástico sin amortiguamiento, en el cual toda la energía de entrada se convierte en energía de vibración elástica. Aunque la entrada de energía E nunca es negativo, tampoco es necesariamente una función monótona creciente. A partir del instante $t = t_0$ en que cesa el movimiento del suelo el ingreso de la energía $E(t)$ se mantiene constante y el sistema seguirá vibrando de forma indefinida.

La figura 2.1(b) muestra el caso de un sistema elástico con amortiguamiento. La energía disipada por el mecanismo de amortiguamiento, $W_h(t)$, es una función monótona creciente y consecuentemente cuanto mayor sea el amortiguamiento más se acercará $E(t)$ a una función monótona creciente.

La figura 2.1(c) se refiere a un sistema elastoplástico en el cual la energía de deformación plástica acumulada, $W_p(t)$, al igual que $W_h(t)$, es también una función monótona creciente. Para un mismo valor del coeficiente de amortiguamiento C , la energía disipada por el mecanismo de amortiguamiento es menor en un sistema elastoplástico que en un sistema elástico.

2.1.1. Características fundamentales de la energía de entrada.

2.1.1.1. Energía de entrada en un sistema elástico sin amortiguamiento.

La ecuación del movimiento de un sistema elástico sin amortiguamiento se puede escribir como sigue:

$$M\ddot{y} + ky = -M\ddot{z}_0 \quad (2.11)$$

siendo k la constante del resorte.

Suponiendo que las condiciones iniciales son $y(0) = \dot{y}(0) = 0$, la Ec. 2.11 se puede resolver mediante la integral de Duhamel de la siguiente manera:

$$\dot{y}(t) = - \int_0^t \ddot{z}_0(\tau) \cos \omega_0 (t - \tau) d\tau \quad (2.12)$$

Siendo ω_0 la frecuencia circular fundamental de vibración.

Tal y como se indica en la figura 2.1(a), el sistema elástico sin amortiguamiento sigue vibrando con amplitud constante después de cesar el movimiento del suelo.

Consecuentemente, la energía de entrada total cuando $t > t_0$ se puede escribir utilizando la amplitud máxima de la velocidad relativa, $\dot{y}_{M\acute{a}x}$, como sigue:

$$E = \frac{M\dot{y}_{M\acute{a}x}^2}{2} \quad (2.13)$$

A partir de la Ec. 2.12 la respuesta para $t > t_0$ vale:

$$\dot{y}(t) = \left(- \int_0^{t_0} \ddot{z}_0(\tau) \cos \omega_0 \tau d\tau \right) \cos \omega_0 t + \left(- \int_0^{t_0} \ddot{z}_0(\tau) \sin \omega_0 \tau d\tau \right) \sin \omega_0 t \quad (2.14)$$

Consecuentemente $\dot{y}_{M\acute{a}x}$ se puede expresar como sigue:

$$\dot{y}_{M\acute{a}x} = \sqrt{a^2 + b^2} \quad (2.15)$$

Los coeficientes a y b de la Ec. 2.15 son precisamente las integrales de la serie de Fourier de la aceleración del suelo, cuyo significado es extraer de la onda $\ddot{z}_0(\tau)$ la componente armónica de frecuencia ω_0 .

siendo

$$a = \int_0^{t_0} \ddot{z}_0(\tau) \cos \omega_0 \tau d\tau$$

$$b = \int_0^{t_0} \ddot{z}_0(\tau) \sin \omega_0 \tau d\tau$$

Por consiguiente, la Ec. 2.15 indica que la única componente armónica de la onda sísmica que introduce energía en un sistema dinámico elástico sin amortiguamiento es aquella cuya frecuencia coincide con la frecuencia circular de vibración del sistema. Puede entenderse también como una expresión del fenómeno de resonancia que tiene lugar cuando un sistema elástico sin amortiguamiento se somete a una carga exterior armónica cuya frecuencia coincide con la frecuencia circular del sistema.

Todo lo anteriormente expuesto pone de manifiesto que en un sistema elástico sin amortiguamiento la energía se introduce de forma muy selectiva, participando solamente aquella componente armónica de la aceleración del suelo que tiene la misma frecuencia que el sistema dinámico.

La energía de entrada total E se puede expresar en términos de una pseudo velocidad equivalente que se define de la siguiente manera:

$$E = \frac{MV_E^2}{2}, \left(V_E = \sqrt{\frac{2E}{M}} \right) \quad (2.16)$$

siendo V_E la pseudo velocidad equivalente al ingreso de energía total.

Tal como indica la Ec. 2.16, V_E es la raíz cuadrada del ingreso de energía total por unidad de masa y tiene dimensiones de velocidad. A la relación entre V_E y ω_0 se le denomina espectro de energía. El espectro de energía de un sistema elástico sin amortiguamiento se conoce también como espectro de Fourier.

2.1.1.2. Energía de entrada en un sistema elástico con amortiguamiento

La suma del segundo y tercer término del primer miembro de la Ec. 2.1, se puede expresar como sigue:

$$R = C\dot{y} + Ky \quad (2.17)$$

La ecuación del movimiento en vibración libre de un sistema elástico con amortiguamiento es la siguiente:

$$\ddot{y} + 2h\omega_0\dot{y} + \omega_0^2y = 0 \quad (2.18)$$

siendo $h = C/2M\omega_0$ la fracción de amortiguamiento respecto al crítico.

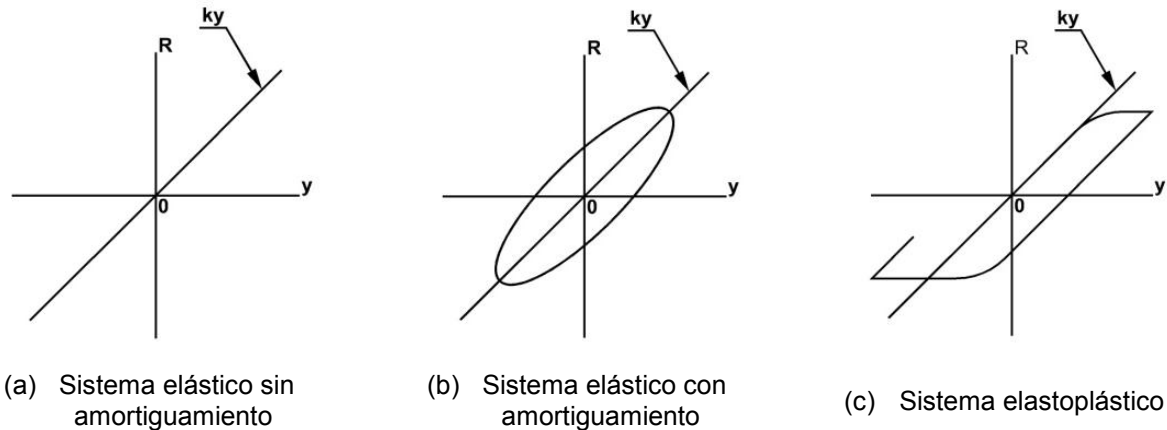


Figura 2.2

Las relaciones R e y en un sistema elástico sin amortiguamiento, en un sistema elástico con amortiguamiento y en un sistema elastoplástico se muestran en la figura 2.2. Las figuras 2.2(a) y 2.2(b) corresponden a un sistema elástico sin y con amortiguamiento respectivamente. En el segundo caso, a medida que aumenta la constante de amortiguamiento C la forma de la relación entre R e y se aleja de ser una recta.

Suponiendo que las condiciones iniciales son $y = y_0$ e $\dot{y} = 0$, la ecuación que expresa el movimiento en vibración libre del sistema quedará de la siguiente manera:

$$y = \frac{y_0}{\sqrt{1-h^2}} e^{-h\omega_0 t} \cos(\sqrt{1-h^2} \omega_0 t - \varepsilon), \tan^{-1} \varepsilon = \frac{h}{\sqrt{1-h^2}} \quad (2.19)$$

y el periodo de la vibración libre vale:

$$T = \frac{h}{\sqrt{1-h^2}} \sqrt{\frac{M}{K}} \quad (2.20)$$

En las estructuras convencionales la fracción de amortiguamiento h suele ser pequeña y consecuentemente el periodo de vibración dado por la Ec. 2.20 es muy próximo al correspondiente a una vibración libre elástica sin amortiguamiento $T_0 = 2\pi\sqrt{M/K}$.

No ocurre lo mismo con la rigidez tangencial k_t representada por la pendiente de la recta tangente a la curva $R - y$ en la figura 2.2(b), cuyo valor fluctúa de forma significativa alrededor de la rigidez K , que es la pendiente que pasa por el origen en dicha figura.

Vamos a definir un periodo instantáneo de vibración T , como sigue:

$$T_t = 2\pi \sqrt{\frac{M}{K_t}} \quad (2.21)$$

El periodo T_t está dentro del intervalo:

$$T_0 - \Delta T \leq T_t \leq T_0 + \Delta T \quad (2.22)$$

siendo ΔT el margen de fluctuación de T_t que crece al aumentar C (o h). ΔT y h se pueden relacionar de forma aproximada mediante la siguiente ecuación.

$$\Delta T = 1.5hT_0 \quad (2.23)$$

De todo lo expuesto se concluye que un sistema elástico con amortiguamiento se puede interpretar como un sistema elástico sin amortiguamiento con una gama de periodos que vendría dada por la Ec. 2.22, a diferencia del sistema elástico sin amortiguamiento que posee únicamente el periodo de vibración T_0 .

De esta manera, resulta razonable pensar que la existencia de amortiguamiento en un sistema dinámico elástico lo que hace es aumentar el número de componentes armónicas del movimiento del suelo que suministran energía al sistema.

Suponiendo que las referidas componentes armónicas introducen la energía sísmica de forma uniforme, el ingreso de energía total en un sistema elástico con amortiguamiento se puede estimar a partir del espectro de energía correspondiente a un sistema elástico sin amortiguamiento, ${}_0V_E(T_0)$, promediando como sigue:

$$E = \frac{M \int_{T_0 - \Delta T}^{T_0 + \Delta T} {}_0V_E(T)^2 dT}{2 - 2\Delta T} \quad (2.24)$$

2.2. ENERGÍA DISIPADA MEDIANTE AMORTIGUAMIENTO

2.2.1. Significado del término de amortiguamiento

El término de amortiguamiento $C\dot{y}$ de la Ec. 2.2 es la expresión matemática de un aspecto de la vibración de las estructuras reales. $C\dot{y}$ expresa el amortiguamiento viscoso de una estructura en condiciones elásticas.

Se cree que el origen de este amortiguamiento está en fenómenos de comportamiento no lineal del material a nivel microscópico, en la energía disipada por fenómenos de deslizamiento y fricción entre partes estructurales y en la disipación o radiación de energía de vibración elástica de la estructura al suelo.

El término Ky de la Ec. 2.2 que representa a la fuerza restauradora del sistema, expresa también una parte del comportamiento no lineal de la estructura. Generalmente, en el término Ky se incluye únicamente aquello que pueda entenderse claramente como plastificación de la estructura, en tanto que el resto de aspectos se introducen en el término $C\dot{y}$.

El efecto de disipación de energía al suelo es, como se ha dicho, uno de esos aspectos que deben incluirse en el término de amortiguamiento.

No hay ninguna garantía de que el efecto de disipación de energía mediante amortiguamiento esté representado adecuadamente por un término de amortiguamiento de tipo viscoso, es decir, proporcional a la velocidad.

Sin embargo, la cantidad de energía disipada por este concepto (aun incluyendo los fenómenos de no-linealidad a nivel microscópico de la estructura) no suele ser muy importante.

Normalmente el coeficiente de amortiguamiento C , expresado en relación al amortiguamiento crítico, C_{cr} , mediante la relación $\zeta = C/C_{cr}$, está por debajo del 5%, es decir $\zeta \leq 0.05$. en el caso de estructuras con comportamiento no lineal, si logramos clarificar suficientemente las características de la fuerza restauradora Ky del sistema, el amortiguamiento pasará a jugar un papel secundario y consecuentemente el tratamiento del mismo perderá relevancia.

No obstante, el efecto de disipación de energía mediante amortiguamiento es importante en estructuras de corto periodo de vibración $T > 0.05$ [s] y por ello es necesario abordar el problema de cómo evaluarlo en relación con el comportamiento no lineal de la estructura.

2.2.2. Energía disipada por el término de amortiguamiento

Vamos a modificar la Ec. 2.10 como sigue:

$$W_e + W_p = E_D = E - W_h \quad (2.25)$$

donde E_D se define como el ingreso de energía que contribuye a daños estructurales. La energía E_D resultante de restar al ingreso de energía total E la energía disipada por el término de amortiguamiento W_h , es la que provoca la deformación de la estructura. Por ello, Housner denominó a E_D ingreso de energía que contribuye a daños estructurales. Del mismo modo que se hizo con E en la Ec. 2.16, el input de energía que contribuye a daños estructurales E_D se puede expresar mediante una pseudo velocidad equivalente V_D que se define como sigue:

$$V_D = \sqrt{\frac{2E_D}{M}} \quad (2.26)$$

Housner asumió que la velocidad máxima relativa de respuesta en un sistema elástico de un grado de libertad (espectro de velocidad de respuesta), $V_{M\acute{a}x}$, era el límite superior de V_D , y sobre la base de dicha hipótesis estableció a efectos de proyecto la siguiente relación fundamental: $V_{M\acute{a}x} = V_D$. Los modelos estudiados son sistemas elastoplásticos con amortiguamiento de una masa concentrada.

Las características de la fuerza restauradora de los mismos son del tipo elástico perfectamente plástico. Mediante el cálculo directo de la respuesta dinámica se obtiene la deformación plástica acumulada δ_p por el sistema de una masa concentrada y E_D se evalúa como sigue:

$$E_D = \frac{Q_Y \delta_Y}{2} + Q_Y \delta_p \quad (2.27)$$

En sistemas que se mantienen elásticos, el error por sobrestimación que se comete al aproximar la energía de vibración elástica, W_e , mediante $W_e = Q_Y \delta_Y / 2$ es grande.

Queda claro que en el dominio de los periodos cortos V_D es mayor que $V_{M\acute{a}x}$. Esto se debe a que en el dominio de periodos cortos el ingreso de energía introducida por el terremoto aumenta con el grado de plastificación, así mismo, respecto a la relación entre V_D y el grado de plastificación, se puede decir en general que a medida que aumenta este último (lo cual corresponde a valores decrecientes de α) se incrementa el valor de V_D . Dicho de otra manera, cuanto mayor es la energía disipada mediante deformaciones plásticas menor es la energía disipada mediante amortiguamiento. Por lo tanto estrictamente hablando, la cantidad de energía disipada mediante amortiguamiento depende de α .

La dispersión de los valores de V_D/V_E en el dominio de periodos cortos es grande. Esto se debe a que en dicho dominio ($T \leq 0.1$ [s]) y para valores de α que oscilan entre $0.1 \leq \alpha \leq 0.6$ el nivel de plastificación presenta variaciones importantes de unos sistemas a otros. El valor medio de V_D/V_E se puede aproximar mediante la siguiente ecuación:

$$\frac{V_D}{V_E} = \frac{1}{1 + 3h + 1.2\sqrt{h}} \quad (2.28)$$

2.2.3. Evaluación de V_D/V_E por analogía entre amortiguamiento viscoso y amortiguamiento histerético

Si asimilamos el mecanismo que disipa la energía correspondiente al término de amortiguamiento $C\dot{y}$ en un sistema elástico con amortiguamiento, a un mecanismo histerético equivalente en el elemento rígido de una estructura mixta rígido-flexible, podremos aplicar el concepto de número equivalente de ciclos de desplazamiento de amplitud máxima. Se puede demostrar que el valor del parámetro r_q en este caso vale $r_q \geq 1.0$ y por lo tanto el número equivalente de ciclos de desplazamiento de amplitud máxima será igual o mayor que 2.

Vamos a estimar a continuación la energía que se disipa por amortiguamiento, W_h , en un sistema elástico cuya respuesta sea asimilable a n ciclos de desplazamiento de deformación máxima, δ_m (siendo n el arriba referido número equivalente de ciclos de desplazamiento de amplitud máxima).

La respuesta de un sistema de un grado de libertad elástico de frecuencia circular ω_0 , vibrando con deformación máxima δ_m se puede aproximar como sigue:

$$y = \delta_m \sin \omega_0 t \quad (2.29)$$

La cantidad de energía disipada por el amortiguamiento en un ciclo se puede calcular de la siguiente manera:

$$W_{h1} = \int_0^T C\dot{y}^2 dt = 2\pi Mh\delta_m^2 \left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 \quad (2.30)$$

Por tanto, la cantidad total de energía disipada por amortiguamiento en n ciclos de vibración (es decir el término W_h) de la Ec. 2.2 vale:

$$W_h = W_{h1} = \int_0^T C\dot{y}^2 dt = 2\pi Mhn\delta_m^2 \left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 \quad (2.31)$$

La ecuación de balance energético 2.10 particularizada a un sistema elástico con amortiguamiento ($W_p = 0$) queda como sigue:

$$W_e + W_h = \frac{Q_m \delta_m}{2} + 2\pi M h n \delta_m^2 \left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 = \frac{M V_E^2}{2} \quad (2.32)$$

siendo Q_m la fuerza cortante máxima.

Teniendo en cuenta las relaciones: $Q_m = \alpha M g$, $\delta_m = Q_m/k$, $k = 4\pi^2 M/T^2$, se llega a la siguiente ecuación:

$$\alpha = \frac{1}{\sqrt{1 + 4\pi h n}} = \frac{2\pi V_E}{T g} \quad (2.33)$$

Teniendo en cuenta que $E_D = W_e = Q_m \delta_m/2$, $E = W_e + W_h$ y $V_D/V_E = \sqrt{E_D/E}$, de las ecuaciones anteriores se llega a la siguiente expresión:

$$\frac{V_D}{V_E} = \frac{1}{\sqrt{1 + 4\pi h n}} \quad (2.34)$$

La evaluación de la energía disipada mediante la Ec. 2.34 es válida cuando coexisten un elemento elástico y otro elastoplástico, y se requiere predecir la cantidad de energía disipada por cada uno de ellos.

2.2.4. Acoplamiento entre amortiguamiento histerético y amortiguamiento viscoso

Mientras la estructura permanece en condiciones elásticas, se puede considerar que la cantidad de energía disipada mediante amortiguamiento viscoso con relación al ingreso total de energía se mantiene constante.

En cuanto la estructura plastifica, y para un mismo valor de la constante de amortiguamiento, C , la energía disipada por amortiguamiento viscoso se va reduciendo respecto al caso elástico a medida que aumenta el porcentaje de energía disipada por amortiguamiento histerético. En otras palabras, se puede decir que la cantidad de energía disipada por amortiguamiento viscoso se reduce a medida que disminuye la resistencia de la estructura.

Si para simplificar se requiere ignorar este acoplamiento entre amortiguamiento histerético y amortiguamiento viscoso, será necesario anticipar un determinado nivel de plastificación de la estructura. La Ec. 2.28 se ha obtenido con este criterio y en este sentido proporciona un valor medio de la energía disipada por amortiguamiento viscoso.

Si por el contrario se requiere tener en cuenta el acoplamiento, será necesario estudiar la cantidad de energía disipada por amortiguamiento viscoso antes y después de la plastificación

2.2.4.1. Ignorando el acoplamiento entre amortiguamiento histerético y viscoso

La energía disipada por amortiguamiento viscoso se puede expresar formalmente como sigue:

$$W_h = (1 - \bar{\omega}_h)E \quad (2.35)$$

siendo $\bar{\omega}_h$ el valor medio aproximado de $(V_D/V_E)^2$ en un sistema elastoplástico.

Si estimamos V_D/V_E con la Ec. 2.28, $\bar{\omega}_h$ adopta el siguiente valor

$$\bar{\omega}_h = \frac{1}{(1 + 3h + 1.2\sqrt{h})^2} \quad (2.36)$$

W_e y W_p vienen dados por:

$$W_e = \frac{Q_Y \delta_Y}{2} \quad (2.37)$$

$$W_p = Q_Y \delta_p = Q_Y \delta_p \eta \quad (2.38)$$

Utilizando las relaciones siguientes: $Q_Y = \alpha M g$, $\delta_Y = Q_Y/k$, $k = 4\pi^2 M/T^2$, la ecuación del balance de energía 2.10 se puede escribir de la siguiente manera:

$$\alpha = \frac{1}{\sqrt{1 + 2\eta}} \frac{2\pi V_E(T_e) \sqrt{\bar{\omega}_h}}{T g}$$

$$\alpha = \frac{1}{\sqrt{1 + 2\eta}} \frac{2\pi V_E(T) \sqrt{\bar{\omega}_h}}{T g} \left[\frac{V_E(T_e)}{V_E(T)} \right] \quad (2.39)$$

$$\alpha = D_\eta \sqrt{\bar{\omega}_h} \alpha_0 \left[\frac{V_E(T_e)}{V_E(T)} \right]$$

Siendo

- $D_\eta = \frac{1}{\sqrt{1+2\eta}}$; Término reductor de resistencia que tiene en cuenta la energía disipada por amortiguamiento histerético.
- $\frac{V_E(T_e)}{V_E(T)}$; Término magnificador de la resistencia que tiene en cuenta el incremento de ingreso de energía causado por el alargamiento del periodo de vibración asociado a la plastificación.
- $\bar{\omega}_h = \frac{1}{1+3h+1.2\sqrt{h}}$; Término reductor de resistencia que tiene en cuenta la energía disipada por amortiguamiento viscoso.
- $\alpha_0 = \frac{2\pi V_E(T)}{Tg}$; Resistencia requerida en el caso de un sistema elástico sin amortiguamiento.

El parámetro α representa la resistencia requerida al sistema (expresada en forma de coeficiente de fuerza de cortante de fluencia), para que pueda soportar el input de energía total correspondiente a V_E . El término D_η reduce la resistencia según la cantidad de energía histerética disipada y es independiente del término reductor de resistencia por la energía disipada mediante amortiguamiento viscoso.

Por otra, el cociente $V_E(T_e)/V_E(T)$ es un término suplementario que tiene en cuenta el aumento del ingreso de energía que se produce en los sistemas elastoplásticos debido al alargamiento del periodo de vibración que acompaña a la plastificación, y es independiente de D_η y de $\bar{\omega}_h$.

2.2.4.2. Teniendo en cuenta el acoplamiento entre amortiguamiento histerético y viscoso

Supongamos que en un sistema elástico W_h se puede expresar también formalmente de la siguiente manera:

$$W_h = (1 - \bar{\omega}_h)E \quad (2.40)$$

El coeficiente de fuerza cortante requerido en un sistema elástico con amortiguamiento, α_e , vendrá dado por:

$$\alpha_e = \sqrt{\bar{\omega}_h} \alpha_0 \quad (2.41)$$

Si suponemos ahora que en un sistema elastoplástico W_h es proporcional al valor del coeficiente de fuerza cortante de fluencia podremos escribir la siguiente ecuación:

$$W_h = (1 - \bar{\omega}_h) \frac{\alpha}{\alpha_0} E \quad (2.42)$$

Si sustituimos las Ecs. 2.37, 2.38 y 2.41 en la Ec. 2.10 que establece el balance de energía, se llega a la siguiente expresión para α :

$$\alpha = D_\eta \left\{ \sqrt{1 + (D_\eta r_h)^2} - D_\eta r_h \right\} \alpha_0 \left[\frac{V_E(T_e)}{V_E(T)} \right] \quad (2.43)$$

donde $r_h = \frac{1 - \bar{\omega}_h}{2\sqrt{\bar{\omega}_h}}$.

Si se toma como valor de W_h en el sistema elástico el dado por la Ec. 2.34 con $n = 3$ tendremos que:

$$\bar{\omega}_h = \frac{1}{1 + 12\pi h} \quad (2.44)$$

El valor de V_D/V_E correspondiente a la Ec. 2.43 está indicado en la figura 2.19 con línea discontinua y, tal como se observa en la misma, es muy cercano al límite inferior de las respuestas reales obtenidas de los cálculos dinámicos. Se puede considerar por lo tanto, que la Ec. 2.43 proporciona el ingreso de energía V_D en un sistema elástico.

Para finalizar, en el caso de que $T_e = T$, el cociente α/α_0 se puede escribir formalmente como sigue:

$$\frac{\alpha}{\alpha_0} = D_\eta \frac{V_D}{V_E} \quad (2.45)$$

Si se ignora el acoplamiento entre el amortiguamiento histerético y el viscoso, V_D/V_E se puede expresar mediante la Ec. 2.28.

Si por el contrario, se requiere tener en cuenta dicho acoplamiento a partir de 2.42 V_D/V_E se puede expresar como sigue:

$$\frac{V_D}{V_E} = \sqrt{1 + (D_\eta r_h)^2} - D_\eta r_h \quad (2.46)$$

La Ec. 2.42 proporciona resultados más ajustados a la realidad, aunque el amortiguamiento en sí mismo posee tal grado de ambigüedad que esta afirmación puede ser discutible. A efectos prácticos se puede utilizar la Ec. 2.39.

2.3. AMORTIGUAMIENTO DE ESTRUCTURAS

Amortiguar se define como reducir o detener la vibración. En la ingeniería estructural, el amortiguamiento puede definirse como la propiedad inherente de los materiales que tienden a oponerse al movimiento. Entre más alto sea el amortiguamiento de un sistema, más rápido regresa a reposo desde una posición desplazada, como se muestra en la figura 2.1. El amortiguamiento viscoso, β , también cambia el periodo de respuesta para un sistema sin amortiguamiento, T , el periodo amortiguado, T_D , se define como:

$$T_D = \frac{T}{\sqrt{1 - \beta^2}} \quad (2.47)$$

Para los niveles comunes de amortiguamiento estructural, el cambio en el periodo es insignificante. Por un 5% de amortiguamiento el cambio es sólo de 0.1% e incluso con un 20% de amortiguamiento el periodo incrementa tan sólo 2%.

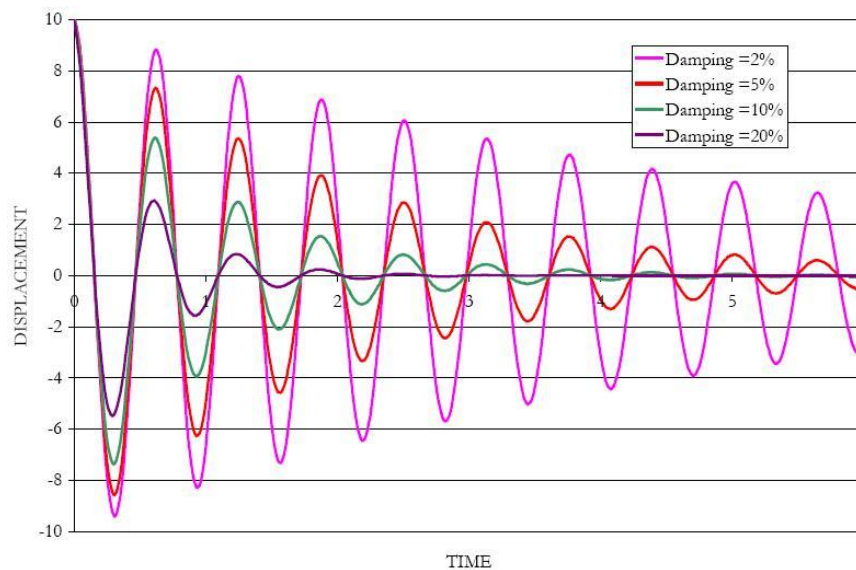


Figura 2.3: Efecto del amortiguamiento.

(In-Structure Damping And Energy Dissipation - Design Guidelines, Trevor E. Kelly, S.E. – Página 7)

2.3.1. Amortiguamiento viscosos equivalente

A pesar de que es conveniente usar amortiguamiento viscoso para análisis dinámicos, mucha de la disipación de energía en sistemas estructurales no es verdaderamente viscosa por naturaleza. El concepto de amortiguamiento viscoso consiste en convertir el amortiguamiento proveniente de fuentes como la elasticidad de los materiales, produciendo un rango de amortiguamiento parecido al viscoso.

El amortiguamiento viscoso equivalente, β , se define como:

$$\beta = \frac{W_D}{4\pi W_S} \quad (2.48)$$

donde W_D es la energía cíclica disipada (el área sombreada en la figura 2.2) y W_S es la energía potencial (el área con sombras finas en la figura 2-2).

Esta formulación aparenta ser un simple método para calcular el amortiguamiento viscoso equivalente donde se conoce el área del ciclo de histéresis de un mecanismo. Y, de hecho, la implementación es directa para sistemas de aislamiento base en donde la energía potencial y la energía disipada son funciones de las propiedades de un aislador; y se asume que todos los aisladores tienen el mismo desplazamiento.

En un amortiguamiento distribuido la energía potencial es mucho más difícil de calcular, ya que es la suma de la energía potencial a través de la estructura más la energía potencial en todos los mecanismos, de los cuales todos podrían tener diferentes desplazamientos. Debido a esto, un amortiguamiento viscoso equivalente puede proporcionar sólo una indicación muy aproximada de la efectividad de los mecanismos.

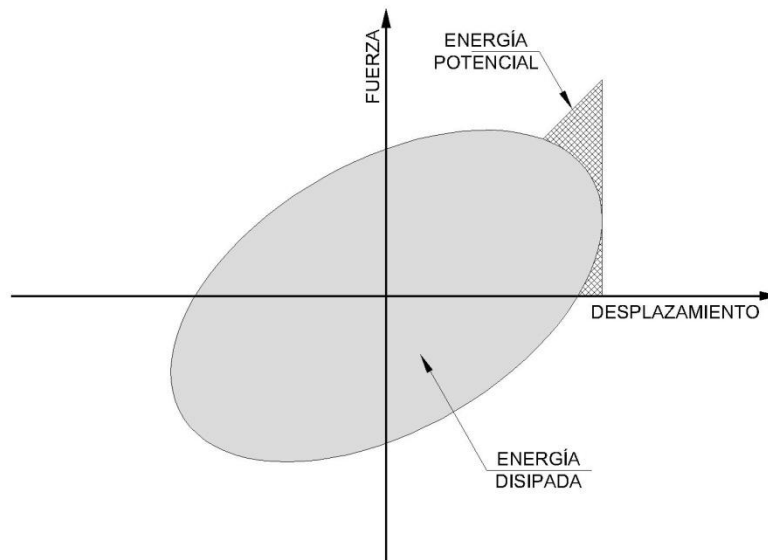


Figura 2.4: Amortiguamiento viscoso equivalente.

2.3.2. Efecto del amortiguamiento en la respuesta

En general, un amortiguamiento elevado reduce la respuesta, como se muestra en la aceleración y espectro de respuesta del desplazamiento en la figura 2-3. Sin embargo, la reducción no es constante sobre el rango del periodo completo de respuesta, y también varía con terremotos.

En los periodos cero, un amortiguamiento no tiene efecto ya que el valor del espectro es igual a la directriz máxima de aceleración. En periodos muy largos un amortiguamiento también suele tener poco efecto en las aceleraciones, pero tiene más efecto en los desplazamientos.

Amortiguamiento Efectivo β, % del crítico	B_S	B_1
< 2	0.8	0.8
5	1.0	1.0
10	1.3	1.2
20	1.8	1.5
30	2.3	1.7
40	2.7	1.9
> 50	3.0	2.0

Tabla 2.5: Factores de reducción de amortiguamiento.

Códigos tales como UBC y FEMA aproximan el efecto de amortiguamiento al definir un coeficiente de amortiguamiento, B , que es una función de un amortiguamiento viscoso equivalente, β . La tabla 2-1 enlista los valores de FEMA, que define B_S como el coeficiente para ajustar la respuesta espectral de periodo corto y B_1 , para ajustar la respuesta de periodo de un-segundo, por el efecto de amortiguamiento viscoso.

El factor B_S se aplica a periodos arriba de T_0 , que es el periodo característico del espectro de respuesta, definido como el periodo asociado con la transición del segmento de aceleración constante del espectro, al segmento de velocidad constante del espectro. (Ver figura 2-4). Para periodos más largos que T_0 , se aplica B_1 .

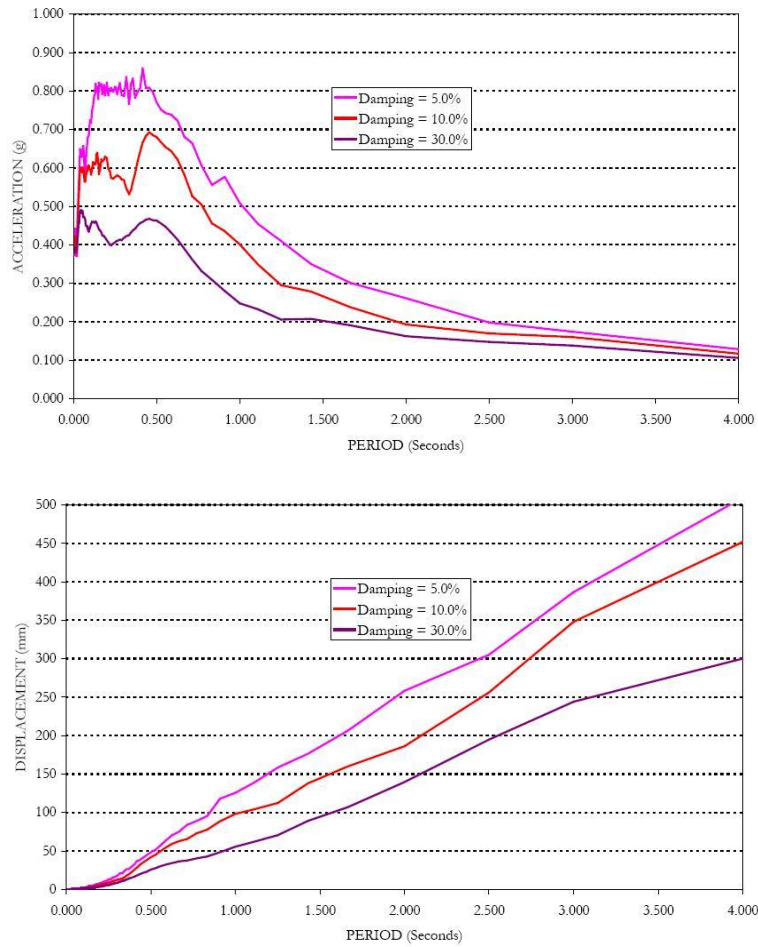


Figura 2.5: Efecto del amortiguamiento en los espectros de respuesta.
(In-Structure Damping And Energy Dissipation - Design Guidelines, Trevor E. Kelly, S.E. – Página 10)

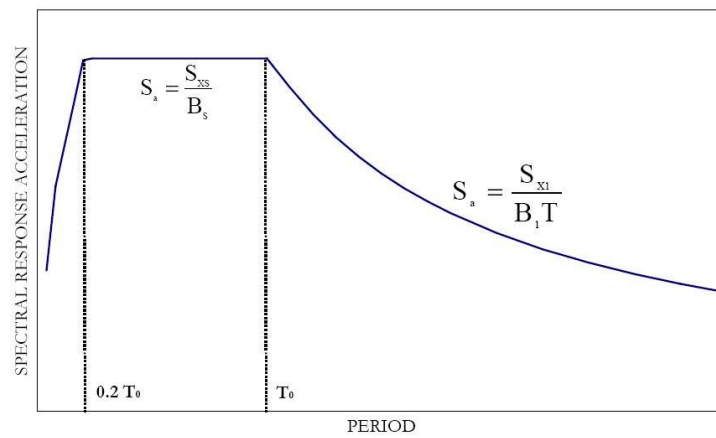


Figura 2.6: Espectro de aceleraciones según el FEMA.
(In-Structure Damping And Energy Dissipation - Design Guidelines, Trevor E. Kelly, S.E. – Página 11)

CAPITULO 3: SISTEMAS DE DISIPACIÓN DE ENERGÍA SÍSMICA

3.1. INTRODUCCIÓN

Las técnicas convencionales empleadas en la actualidad en las distintas normativas de diseño sismorresistente se basan en la experimentación y en el estudio del daño estructural producido por terremotos.

Tal como se ha visto, la ductilidad y el hiperestatismo o redundancia estructural constituyen la base de los criterios actuales de diseño, permitiendo reducir las fuerzas sísmicas significativamente con el objetivo de proyectar estructuras económicas que se comporten satisfactoriamente ante un eventual sismo severo. La ductilidad, sin embargo, significa daño en los elementos estructurales y, en muchos casos, incluso daño significativo que origina el cierre por lo menos temporal del edificio.

La disipación de energía en el diseño convencional se concentra en los nudos de unión de vigas y columnas, donde el comportamiento inelástico conduce a daños estructurales. A pesar que las secciones sean específicamente diseñadas, el comportamiento histerético finalmente se degrada y con ello la disipación.

Por ello, en los últimos años se han desarrollado y experimentado técnicas que reducen la fuerza sísmica a fin de evitar el daño en la estructura, o que lo localice en determinados puntos. Una tendencia moderna de diseño sísmico es buscar sistemas estructurales que localicen las demandas de ductilidad en determinados puntos “débiles”, que disipen la energía de forma estable y que, además sean reparables.

El objetivo del control de vibraciones posee dos aspectos importantes a considerar:

- Hacer que los periodos naturales de vibración sean muy diferentes de los periodos predominantes de la excitación sísmica, con el objeto de evitar el fenómeno de resonancia.
- Lograr que el amortiguamiento sea alto, y así reducir las deformaciones debidas a la sollicitación sísmica.

De acuerdo con el mecanismo utilizado y sus características histeréticas los sistemas de control de vibración o de respuesta se pueden clasificar como sistemas de control pasivos, activos o híbridos.

Los sistemas de control pasivo son aquellos en los cuales se utilizan dispositivos en los que no es necesario ningún tipo de energía externa para lograr su acción; los sistemas de control activo se activan a través de energía externa, y sistemas de control híbrido que son una combinación de diferentes sistemas de control pasivo con sistemas de control activo que necesitan mucho menos energía y maquinaria que los sistemas de control activo.



Clasificación del Diseño Sismorresistente.

3.2. SISTEMAS DE REDUCCIÓN DE VIBRACIONES

En esta sección se revisan los sistemas de protección adaptados a las estructuras para mitigar el daño de fuerzas ambientales adversas como los sismos, los vientos y las mareas.

Los sistemas de protección sísmica empleados en la actualidad comprenden desde relativamente simples dispositivos de control pasivo hasta avanzados sistemas completamente activos. Los sistemas pasivos son tal vez los más conocidos e incluyen los sistemas de aislamiento sísmico y los sistemas mecánicos de disipación de energía.

Este último sistema se puede decir que es la continuación del desarrollo de la filosofía de buscar sistemas estructurales que ubiquen demandas de ductilidad en una forma racional, formando puntos especiales que disipen energía en forma estable que se puedan reparar como son los marcos excéntricos. Los puntos especiales mencionados anteriormente son subsistemas mecánicos que disipan energía y pueden reemplazarse.

La disipación pasiva de energía es una tecnología que mejora el desempeño de una edificación añadiendo amortiguamiento a su estructura, siendo el uso primario de los disipadores de energía la reducción de los desplazamientos sísmicos de la estructura.

La eficacia de estos sistemas depende de la cantidad de dispositivos, su ubicación en el edificio, clase de disipador y adecuado diseño. Estos elementos disipan energía en función de los desplazamientos relativos de entrepiso, que típicamente determinan las deformaciones de los disipadores.

Los disipadores de energía reducen, igualmente la fuerza en la estructura, proporcionándole a su vez una respuesta elástica, en algunos casos, sin que deba esperarse la reducción de la fuerza en estructuras que estén respondiendo más allá de la fluencia. En ciertos casos (disipadores de fluido viscoso y polímeros viscoelásticos) la frecuencia de deformación tiene una función significativa en la disipación por deformación cíclica.

En muchos casos la disipación de energía se ha constituido en una alternativa para los esquemas convencionales de rigidización y reforzamiento y se debe esperar que alcancen un nivel de desempeño comparable.

En general, estos dispositivos pueden ser una buena opción a considerar en los casos en los cuales se espera un buen nivel de desempeño en cuanto a la protección de la vida de las personas o, quizás, respecto de la ocupación inmediata, pero con aplicabilidad limitada en proyectos con un nivel de desempeño de prevención de colapso.

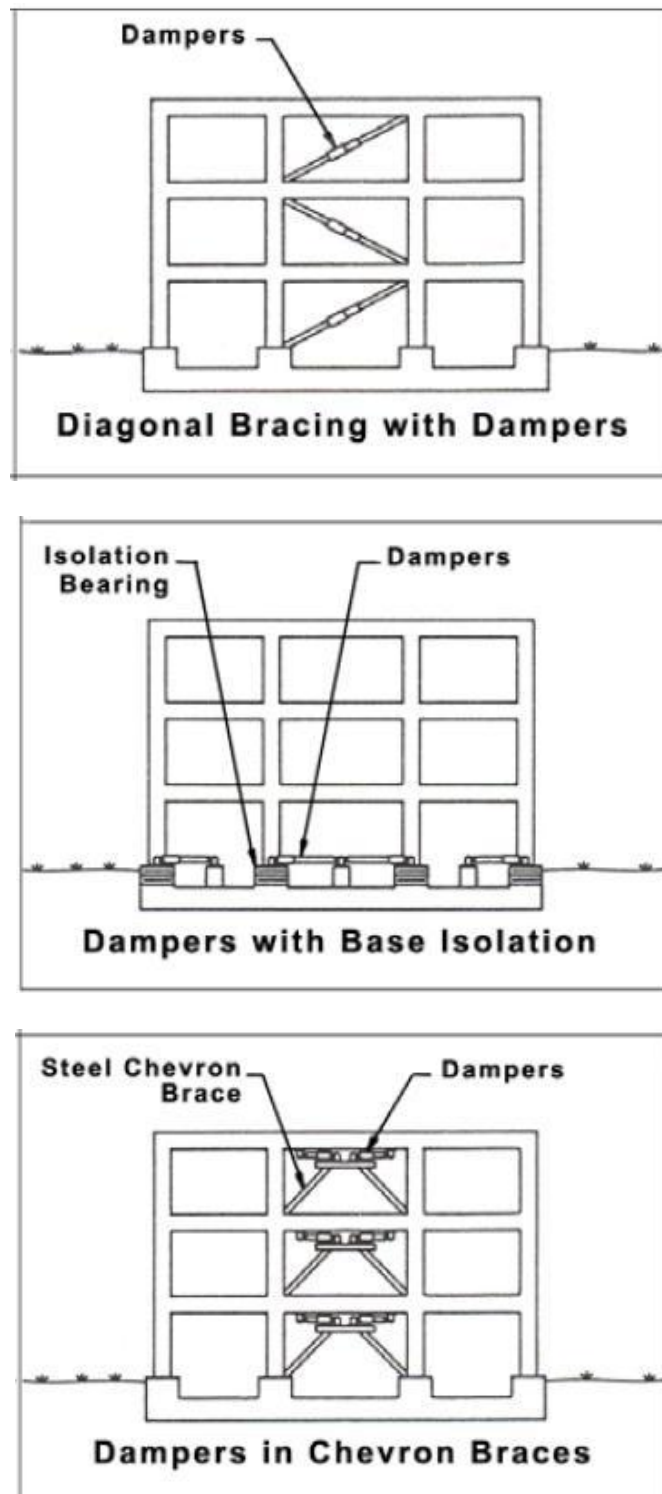


Figura 3.1: Ubicación de los sistemas de disipación de energía. (a) Amortiguadores viscosos. (b) Aisladores de base. (c) Amortiguadores tipo ADAS.
(Copyright © 2012 Taylor Devices All Rights Reserved)

Sistemas de aislamiento	○ Aislamiento de base	<ul style="list-style-type: none"> • Apoyo de goma laminada con capas de acero • Amortiguador compuesto • Apoyo de goma laminada con núcleo de plomo • Apoyo de goma con alto amortiguamiento • Sistema de fricción puro • Sistema de péndulo friccional • Sistema elástico-friccional 	
	○ Aislamiento de piso	<ul style="list-style-type: none"> • Bidimensional • Tridimensional 	
Sistemas de control de vibraciones	○ Pasivos	<ul style="list-style-type: none"> • Amortiguadores histeréticos 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Amortiguadores de acero ✓ Amortiguadores de plomo ✓ Amortiguadores friccionales ✓ Amortiguadores viscoelásticos
		<ul style="list-style-type: none"> • Amortiguadores viscosos 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Amortiguadores viscosos ✓ Amortiguadores de aceite
	○ Activos	<ul style="list-style-type: none"> • Mecanismos de masa 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Amortiguadores de masa sintonizados ✓ Amortiguadores de líquido sintonizados ✓ Amortiguadores de impacto
		<ul style="list-style-type: none"> • Amortiguadores activos 	

Figura 3.2: Sistemas de reducción de vibraciones.

3.2.1. Sistemas de control de vibraciones

Los disipadores de energía son dispositivos diseñados para absorber la mayoría de la energía sísmica, evitando así que ésta sea disipada mediante deformaciones inelásticas en los elementos estructurales. Pueden ser clasificados como histeréticos o viscoelásticos.

Los disipadores histeréticos incluyen los disipadores metálicos y los disipadores friccionantes, y dependen esencialmente de los desplazamientos de la estructura. Los disipadores metálicos están basados en la fluencia de los metales debido a flexión, corte, torsión, o extrusión. Uno de los dispositivos metálicos más reconocidos es el ADAS, que está compuesto por placas de acero con sección transversal en forma de X instaladas en paralelo sobre los arriostres.

Los disipadores friccionantes son dispositivos que disipan la energía mediante las fuerzas de fricción que se presentan por el desplazamiento relativo entre dos placas en contacto. Son diseñados para deslizar a una carga predeterminada, y permanecen inactivos mientras no existe una demanda sísmica importante sobre el edificio.

Los disipadores viscoelásticos incluyen los sistemas de sólidos viscoelásticos, fluidos viscoelásticos, y los disipadores de fluido-viscosos. Los dispositivos viscoelásticos dependen esencialmente de la velocidad.

Los disipadores viscoelásticos sólidos están constituidos por una capa de material viscoelástico ubicada entre dos placas de acero, usualmente acopladas a los arriostres que conectan los extremos del entrepiso. Los dispositivos viscoelásticos líquidos disipan la energía por medio de las deformaciones inducidas por un pistón en una sustancia altamente viscosa.

Los disipadores de fluido-viscosos son dispositivos que disipan energía forzando el flujo de un fluido a través de un orificio. Estos dispositivos son similares a los amortiguadores de un automóvil, pero operan con un mayor nivel de fuerzas y son fabricados con materiales más durables para lograr un mayor tiempo de vida útil.

Los dispositivos de este tipo son usados tanto para solicitaciones sísmicas como para cargas de vientos. Introducen el concepto de disipación de energía asociado al de amortiguamiento suplementario. Se incorporan a las estructuras con la finalidad de absorber o consumir una porción de la energía de ingreso.

Se trata de los siguientes.

- i. Amortiguadores metálicos.
- ii. Amortiguadores de fricción.
- iii. Amortiguadores visco-elásticos.
- iv. Amortiguadores viscosos.
- v. Amortiguadores de masa sintonizados.
- vi. Amortiguadores líquidos sintonizados.

Estos dispositivos reducen la demanda de disipación de energía en los principales componentes de la estructura y minimizan los posibles daños estructurales.

3.2.1.1. Sistemas por plastificación de metales

Teóricamente, cada esfuerzo seccional, sea de torsión, flexión, cortante o axial, puede emplearse como disipador de energía.

Durante un sismo, estos dispositivos, que se ubican habitualmente en las diagonales mostradas en la figura 3.1, plastifican y cambian las características dinámicas del edificio. El periodo fundamental, por ejemplo, será distinto en cada instante de tiempo y, por ello, las fuerzas dinámicas cambiarán. Además se produce la reducción de las fuerzas sísmicas por su disipación de energía. Tienen comportamiento similar a las rótulas plásticas que se forman en las estructuras convencionales. Se pueden combinar con sistemas con aisladores de base.

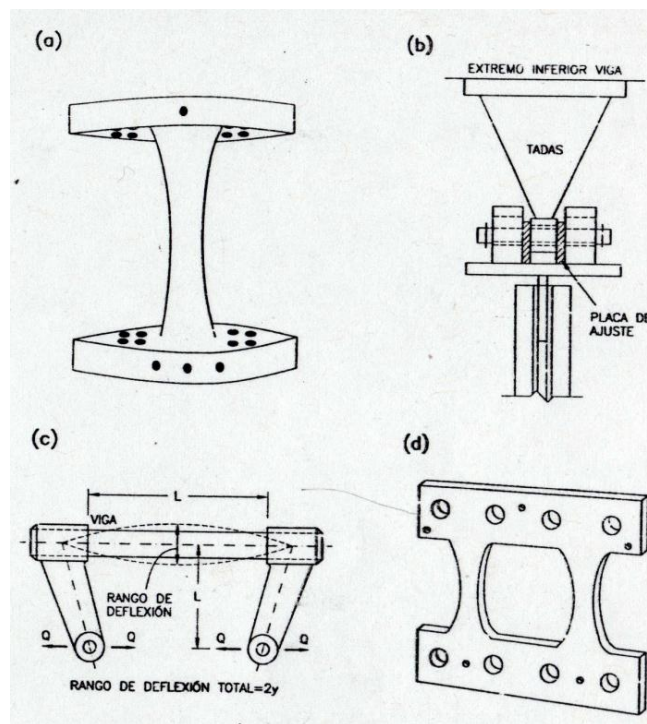


Figura 3.3: Disipadores por plastificación de metales. (a) Dispositivo de barra. (b) Dispositivo TADAS. (c) Barra a flexión constante. (d) Disipador tipo panel.
(Diseño Sismorresistente De Edificios, Bozzo, Luis M. y Barbat, Alex H. - Página 299)

El sistema más conocido es el ADAS (*Adding Damping and Stiffnes*) implantado por Scholl (1993). Su óptima ubicación es en la unión de las diagonales debajo de las traveses de piso. También se pueden ubicar en la unión de las traveses de acoplamiento entre muros de concreto. La plastificación se produce al mismo tiempo en cada plancha y la variación en altura del número de planchas utilizadas permite optimizar la respuesta estructural. Cada plancha está bi-empotrada y su forma de X optimiza la disipación de energía en todo su volumen, siguiendo la ley de momentos flexionantes.

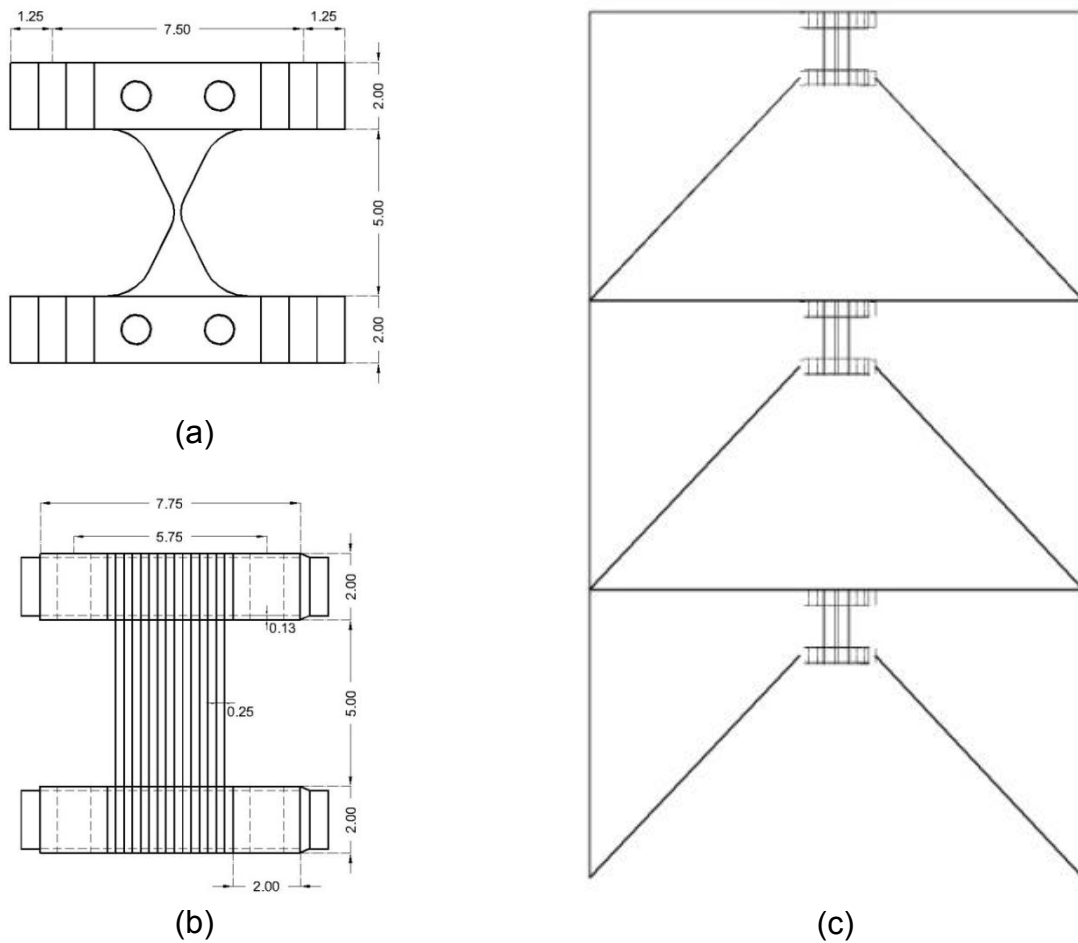


Figura 3.4: Sistema ADAS desarrollado por Scholl (1993). (a) Dimensiones. (b) Conexión típica con planchas en paralelo. (c) Ubicación de la conexión en un marco.

La respuesta histerética de estas conexiones es sumamente estable sin degradación significativa después de muchos ciclos de carga. Figura 3.5

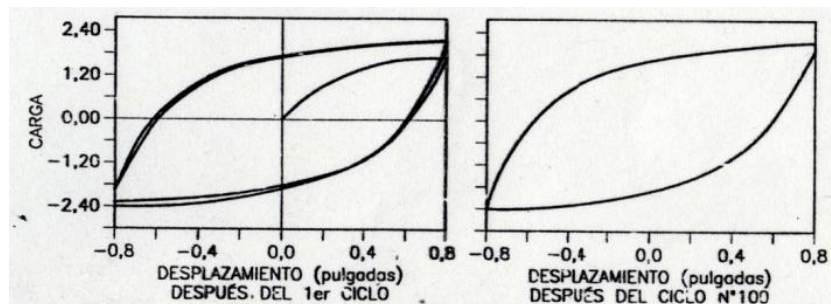


Figura 3.5: (a) Ubicación del sistema ADAS en muros de concreto reforzado. (b) Respuesta histerética estable.

(Diseño Sismorresistente De Edificios, Bozzo, Luis M. y Barbat, Alex H. - Página 301)

Los disipadores de torsión tienen la ventaja de plastificar en toda la longitud de la barra, optimizándose de forma simple la disipación. Este sistema está conformado por una plancha metálica con perforaciones. La energía disipada por ciclo es estable, sin producirse degradación de resistencia.

Un disipador de energía recientemente desarrollado en la Universidad de Girona es el denominado *Shear Link* o SL. Este sistema concentra la disipación de energía en brazos excéntricos en los cuales la plastificación se debe principalmente a las tensiones de cortante. Tal como es sabido, el acero es un muy buen disipador de cortante, con curvas histeréticas estables y con poca degradación de resistencia siempre que se eviten fenómenos de abolladuras locales.

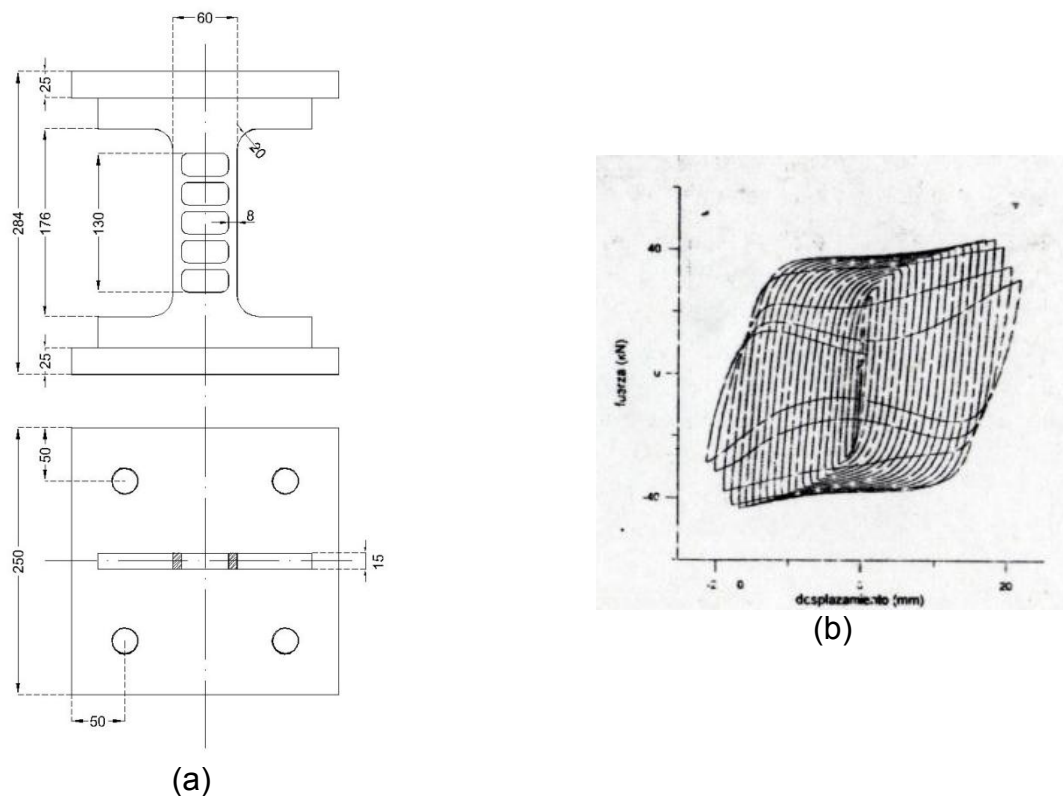


Figura 3.6: *Disipador de energía SL desarrollado por Cahís y Bozzo.*

(a) Geometría en [mm]. (b) Curva histerética.
(Diseño Sismorresistente De Edificios, Bozzo, Luis M. y Barbat, Alex H. - Página 303)

El disipador SL tiene diversas características particularmente eficientes para el diseño sismorresistente. En primer término, la disipación por cortante es estable y los rigidizadores horizontales evitan fenómenos de abolladura local. Es simple modificar las dimensiones y aumentar el espesor en función de la fuerza de plastificación de diseño. Este elemento se puede fabricar desde perfiles laminados estándares o mediante el fresado de perfiles rectangulares.

Otro aspecto único de este disipador es su doble modo de fallo. En condiciones de disipación de energía normales, la respuesta sigue un modo de cortante caracterizado por una deformada del elemento casi lineal y con una distribución de cortante y plastificación uniforme en casi todo el elemento. Las curvas histeréticas en este rango tienen una forma convexa hasta que se alcanza el inicio de la degradación de resistencia. A partir de allí se desarrolla un modo de trabajo por flexión caracterizado por una deformada curva del elemento. Este modo se inicia cuando se agota la capacidad de disipación de las zonas de menor espesor transformándose este en un elemento tipo viga Vierendell. Sin embargo, el disipador sigue trabajando, aunque disminuye sensiblemente su rigidez y las curvas histeréticas son más alargadas. Este doble mecanismo de trabajo proporciona una seguridad adicional difícil de obtener con otros sistemas.

3.2.1.2. Sistemas por fricción

Generalmente se ubican en las diagonales de marcos con contraventeos. Los sistemas por fricción tienen la ventaja de producir curvas histeréticas rígido-plásticas, donde la energía disipada en cada ciclo es máxima como se aprecia en la figura 3.7.

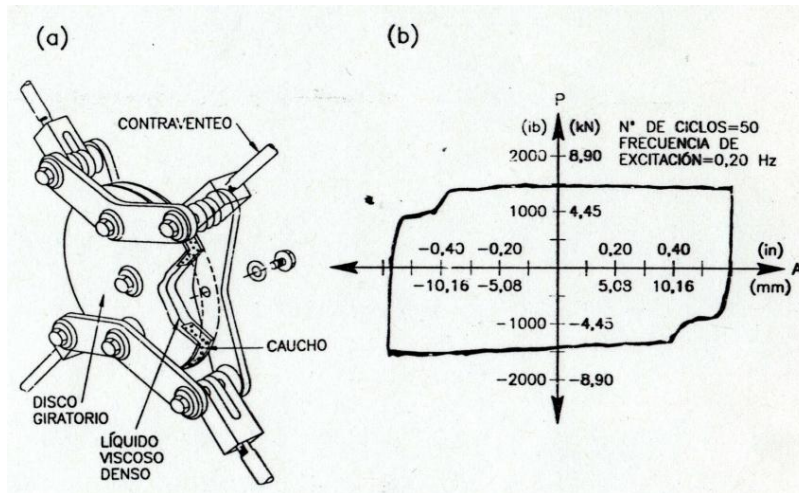


Figura 3.7: (a) Disipador por fricción ubicado en la intersección de las diagonales. (b) Diagrama fuerza-desplazamiento.

(Diseño Sismorresistente De Edificios, Bozzo, Luis M. y Barbat, Alex H. - Página 308)

Su fuerza de fricción es igual al producto de la fuerza normal por el coeficiente de fricción. La fuerza normal se puede variar en cada conexión empleando, por ejemplo, herramientas dinamométricas para producir una variación de la fricción en altura que minimice la respuesta. El coeficiente de fricción depende de los materiales y tratamiento de las superficies en contacto. Este coeficiente es, en general, diferente en carga estática y dinámica, varía por otra parte, durante el deslizamiento, en función de la velocidad y de la presión normal.

La disipación de energía por fricción proporciona una alternativa económica y simple para reducir la acción sísmica. La posibilidad de variar las características fuerza desplazamiento de cada conexión de forma simple permite buscar diseños que minimicen la respuesta.

La fricción varía durante el deslizamiento de forma importante, por lo que su representación y análisis numérico es más difícil que en el caso de otros sistemas. La variación del coeficiente de fricción durante el deslizamiento en estructuras con aislamiento de base no es significativa si la estructura permanece en rango elástico, mientras que esta variación es significativa si el edificio entra en el rango no lineal. Estos resultados sugieren emplear valores conservadores del coeficiente de fricción si se debe utilizar un único valor constante, y distinto según el parámetro de respuesta que se desea obtener. Por ejemplo, para determinar el desplazamiento máximo es conveniente emplear el valor mínimo, mientras que para determinar el cortante en la base se debe emplear el máximo.

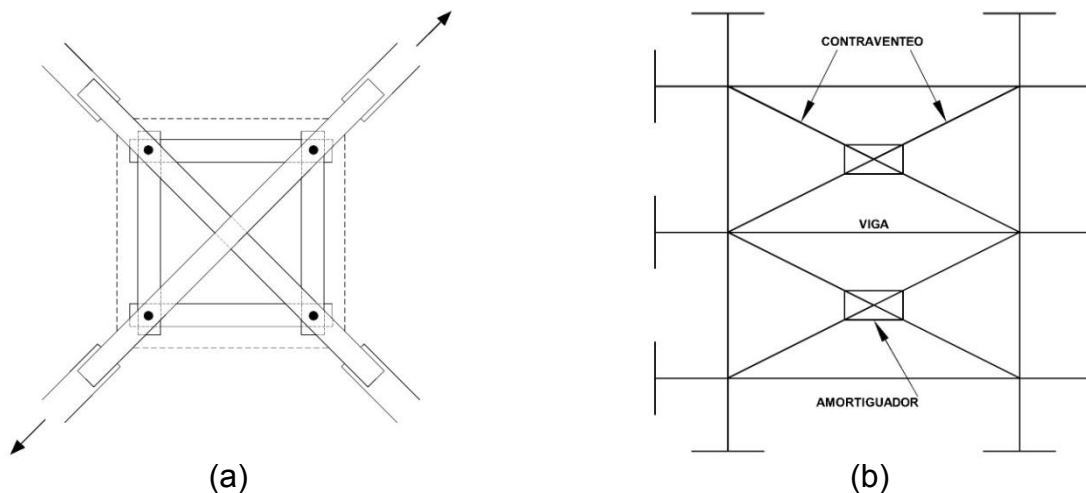


Figura 3.8: (a) Disipador por fricción. (b) Ubicación en un marco.

3.2.1.3. Sistemas por extrusión de metales

La extrusión es un proceso mecánico por el cual un material blando cambia de forma.

La curva histerética resultante es muy estable para un dispositivo sometido a más de cien ciclos de carga. en este sistema, de forma similar a los dispositivos por fricción, no se observa una pendiente definida de la curva desplazamiento por lo que, en general, no se puede obtener un amortiguamiento equivalente y su análisis debe ser no lineal. Sin embargo, la clara ventaja de esta característica es que el área disipada en cada ciclo de carga es cercana a la máxima que se puede obtener para un nivel de fluencia y de desplazamientos dados.

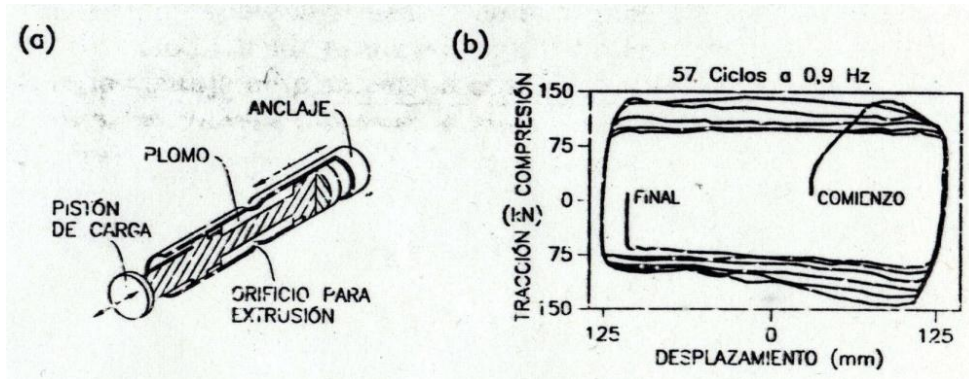


Figura 3.9: (a) Disipador por extrusión de plomo. (b) Comportamiento histerético.
(Diseño Sismorresistente De Edificios, Bozzo, Luis M. y Barbat, Alex H. - Página 309)

3.2.1.4. Sistemas viscoelásticos

Las curvas fuerza-deformación en estos elementos tienen una pendiente definida, independiente del nivel de deformación, tal como se aprecia en la figura 3.10. El ancho de la histerésis define el amortiguamiento equivalente. Por tanto, la reducción de las fuerzas sísmicas empleando estos sistemas se basa exclusivamente en el aumento del amortiguamiento estructural. Las características dinámicas del edificio –como el periodo fundamental- no cambian significativamente.

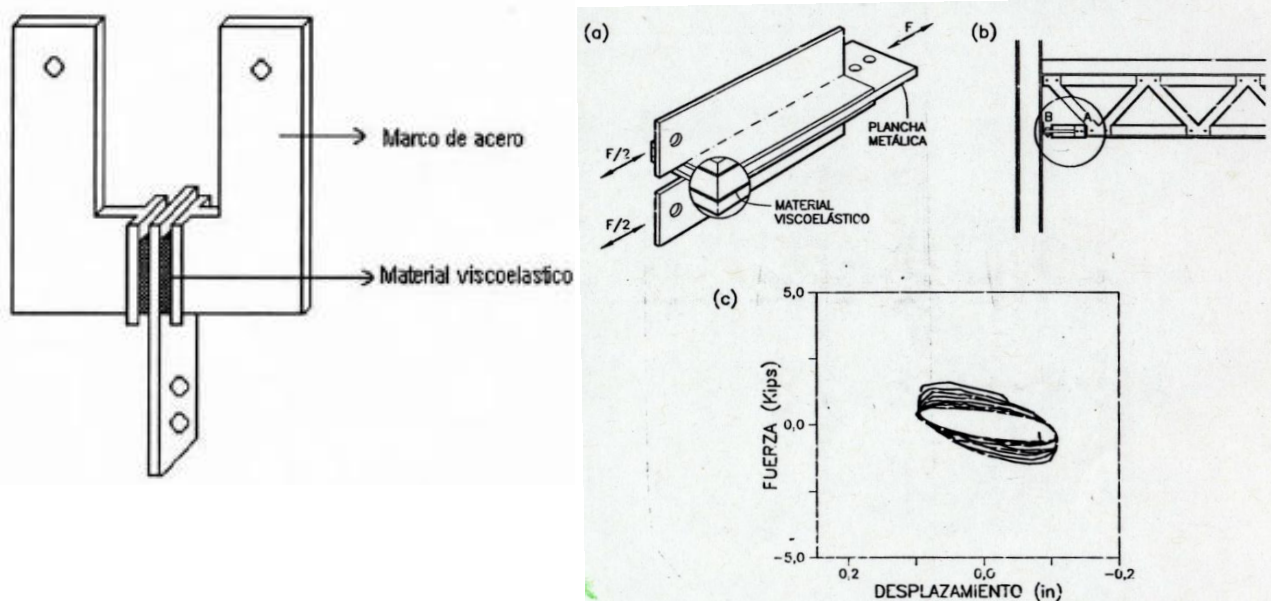


Figura 3.10: Disipadores viscoelásticos
(a) Esquemas. (b) Ubicación. (c) Comportamiento histerético.
(Diseño Sismorresistente De Edificios, Bozzo, Luis M. y Barbat, Alex H. - Página 310)

Estos sistemas son eficientes para el control de vibraciones, pero se requiere un gran número de ellos, con características geométricas difíciles de conseguir de una manera económica para reducir significativamente las fuerzas sísmicas. El comportamiento mecánico de los amortiguadores viscoelásticos es dependiente de la frecuencia de excitación, la temperatura de operación y el nivel de deformación del material.

La característica histerética de mantener una pendiente estable bajo distintos desplazamientos permite plantear un análisis lineal elástico, modificando el amortiguamiento. Este comportamiento permite la ventaja de plantear procedimientos de diseño simples, similares a los convencionales en el diseño sismoresistente.

Están compuestos por placas metálicas unidas por un polímero viscoelástico que se deforma en corte. Con estos dispositivos se incrementa el amortiguamiento estructural (el ancho de histéresis define su amortiguamiento), lo cual tiene como efecto la reducción de fuerzas sísmicas. El periodo fundamental cambia muy poco y se requiere un volumen significativo de polímero en corte debido al bajo modulo elástico de este material.

Este sistema permite desarrollar un análisis lineal elástico, gracias a las características de estabilidad de su histéresis, esto modifica el factor de amortiguamiento en la medida en que el diseño tenga en cuenta la sensibilidad del polímero a cambios de temperatura.

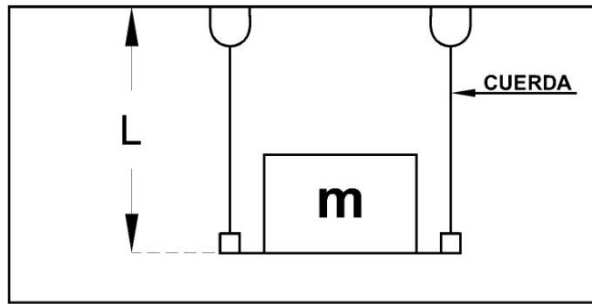
3.2.1.5. Sistemas de masa

Dentro de los sistemas de masa se encuentran los amortiguadores de masa sintonizados (AMS) y los amortiguadores de líquido sintonizados (ALS) y sus subgrupos, como los múltiples amortiguadores de masa sintonizados (MAMS) y los amortiguadores de columna de líquido sintonizados (ACLS).

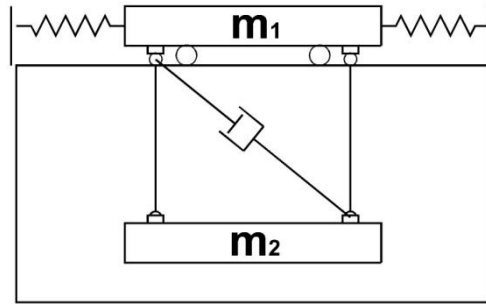
El amortiguador de masa sintonizado (AMS) consiste en una masa, un resorte y un amortiguador viscoso colocados en el sistema vibrante principal para atenuar la vibración no deseada a una frecuencia determinada. La frecuencia natural del amortiguador se sintoniza cerca de la frecuencia natural del sistema principal provocando que el amortiguador vibre en resonancia, disipando la energía absorbida a través de los mecanismos de amortiguamiento del AMS.

Los parámetros de diseño del AMS que se deben hallar para lograr la máxima eficiencia del mismo, son la relación de frecuencia (frecuencia del amortiguador/frecuencia de la estructura), la relación de amortiguamiento y la relación de masa (masa AMS/masa de la estructura). Los AMS sólo pueden ser sintonizados a una sola frecuencia estructural.

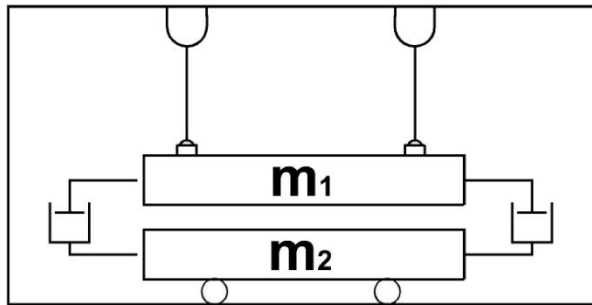
Como es de esperarse, para sistemas de n -grados de libertad, la efectividad es mayor cuando la estructura oscila alrededor de un modo predominante. Puede ocurrir que los desplazamientos correspondientes al primer modo de la respuesta se reduzcan considerablemente, mientras que los desplazamientos de los modos altos se incrementen cuando el número de pisos aumenta. Esta dificultad se soluciona colocando varios AMS que cubren una banda de frecuencias (MAMS).



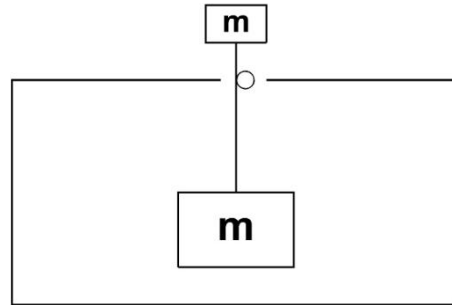
(a) Péndulo simple



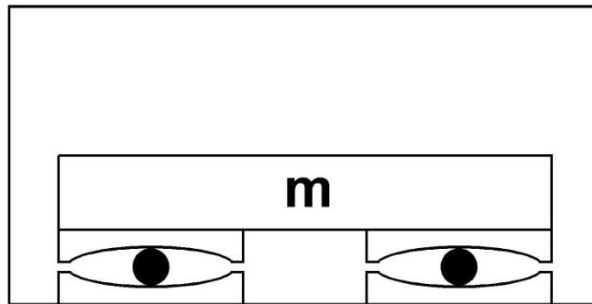
(b) Dos AMS



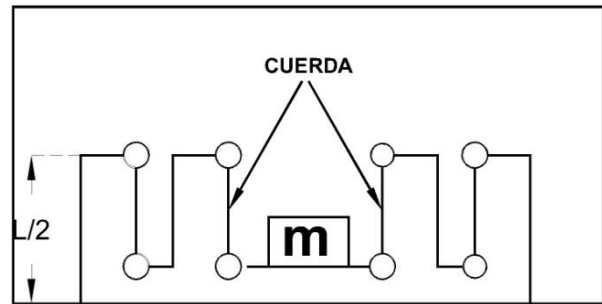
(c) AMS conectados



(d) Péndulo múltiples etapas



(e) Péndulo a rodillo



(f) Barra rígida

Figura 3.11: Configuraciones del AMS.

En la figura 3.11 se muestran las implementaciones más usuales. En el caso (a) es un simple péndulo, cuyo periodo de vibración depende sólo del largo del mismo, siendo su principal desventaja el gran espacio requerido para su instalación. En los casos (b), (c) y (d) la cuerda del péndulo es una barra rígida y se utilizan dos masas, una de las cuales está apoyada en el piso. Cuando hay limitaciones de espacio se puede utilizar un amortiguador de péndulo de rodillo (caso d). Otra solución es el péndulo de múltiples etapas como el mostrado en el caso (e), que reduce el espacio vertical necesario a la mitad.

Los MAMS consisten en un gran número de pequeños osciladores con frecuencias naturales distribuidas alrededor de la frecuencia natural del modo principal de la estructura. Una de las desventajas de los AMS es su sensibilidad a un error en la frecuencia natural de la estructura y/o la relación de amortiguamiento del AMS, disminuyendo su efectividad.

Para disminuir este problema, se propuso la utilización de más de un AMS con diferentes características dinámicas para mejorar la robustez, y ser menos afectada la eficiencia por las incertidumbres del sistema principal o del AMS. Los MAMS se distribuyen en toda la altura del edificio.

El ALS es, en el caso más general, un tanque que contiene líquido, que, en muchos casos es agua. Los ALS absorben la energía de la vibración por el movimiento oscilante del líquido contenido en el recipiente y la disipan a través de la fricción intrínseca del líquido y la fricción con la superficie de las paredes. La frecuencia del ALS, que se ajusta con la altura del agua y la dimensión de los recipientes, se sintoniza con la frecuencia natural del edificio.

3.2.1.6. Sistemas de impacto

Un amortiguador de impacto (cadenas colgantes) consiste en una cadena que cuelga desde la parte superior de la estructura que está vibrando y cuando la estructura se mueve, incrementa la amplitud del movimiento del extremo libre de la cadena. Si la amplitud es suficientemente grande, produce un impacto entre la cadena y la estructura, y si la cadena esta dentro de un cilindro, de un determinado diámetro, se puede producir más de un impacto por ciclo.

El impacto no sólo ocurre en el extremo libre de la cadena, si la vibración es severa se produce también a lo largo de la misma. Los mecanismos de disipación de energía son dos: la pérdida de energía debida al impacto inelástico de las cadenas contra las paredes de cilindro y la fricción interna entre eslabones de las cadenas de goma.

3.2.1.7. Sistemas activos

Estos sistemas son dispositivos que generan fuerzas de control para modificar la respuesta dinámica de la estructura. Las fuerzas de control son aplicadas mediante actuadores integrados a un conjunto de sensores, controladores y procesadores de información en tiempo real. La figura 3.12 describe esquemáticamente el proceso.

Los sensores instalados en la estructura miden las excitaciones externas y la respuesta dinámica de la estructura; los dispositivos de procesamiento en tiempo real procesan la información proveniente de los sensores y calculan las fuerzas de control necesarias para estabilizar la estructura; finalmente los actuadores generan las fuerzas necesarias para contrarrestar los movimientos sísmicos.

Las fuerzas de control pueden ser aplicadas a la estructura mediante una masa activa (AMD), arriostres activos (ABS), o tendones activos. Los osciladores de masa activa (AMD) proporcionan la forma más simple y compacta de aplicar las fuerzas de control a una estructura. Los arriostres y tendones activos requieren un diseño más complicado y se encuentran actualmente en nivel experimental.

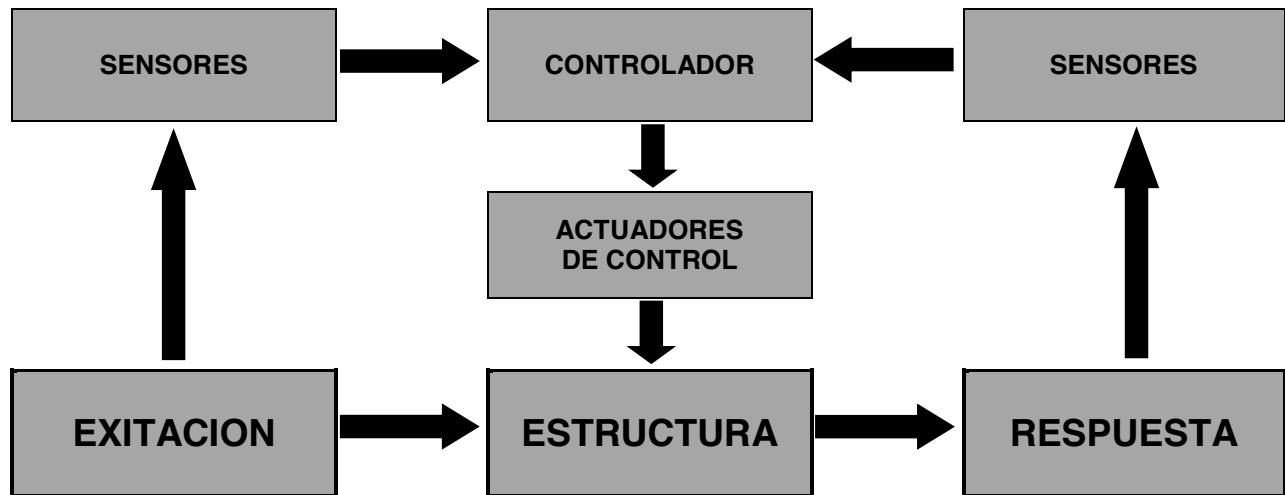


Figura 3.12: Diagrama de flujo de los sistemas activos.

3.2.1.8. Sistemas semi-activos

Los sistemas semi-activos no aplican fuerzas de control en el sistema estructural, pero poseen propiedades variables que pueden ser controladas para reducir óptimamente la respuesta del sistema estructural. Se muestra la configuración de estos sistemas en la figura 3.13.

La atención recibida por estos sistemas en los últimos años puede ser atribuida al hecho de que los dispositivos de control semi-activo ofrecen la adaptabilidad de los sistemas de control activo sin la demanda de grandes fuentes de energía.

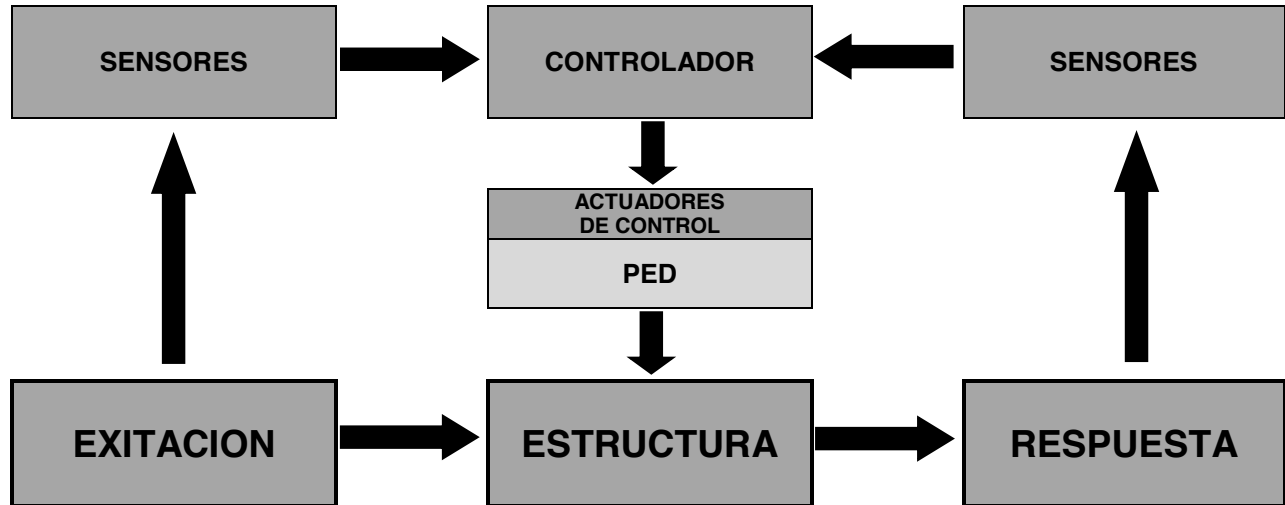


Figura 3.13: Diagrama de flujo de los sistemas semi-activos.

3.2.1.9. Sistemas híbridos

Los sistemas híbridos emplean una combinación de dispositivos pasivos y activos con el fin de incrementar la confiabilidad y eficiencia del control estructural. Algunas de las restricciones que presenta un sistema completamente activo pueden ser superadas por los sistemas de control híbrido debido a que estos operan múltiples dispositivos de control, logrando mayores niveles de rendimiento.

Las investigaciones en el campo de los sistemas de control híbrido han sido enfocadas principalmente en dos tipos de sistemas: osciladores híbridos (HMD) y aislamiento activo. Todos los sistemas híbridos funcionan según la configuración mostrada en la figura 3.14.

El oscilador híbrido HMD (*Hybrid Mass Damper*) es el resultado de la combinación de un oscilador resonante (TMD) y un actuador de control activo. La capacidad de este dispositivo para reducir la respuesta estructural radica principalmente en el movimiento natural del oscilador resonante.

Las fuerzas de control generadas por el actuador son empleadas sólo para mejorar el desempeño del oscilador resonante, incrementando la eficiencia del sistema y permitiendo su adaptabilidad a los cambios en las características dinámicas de la estructura.

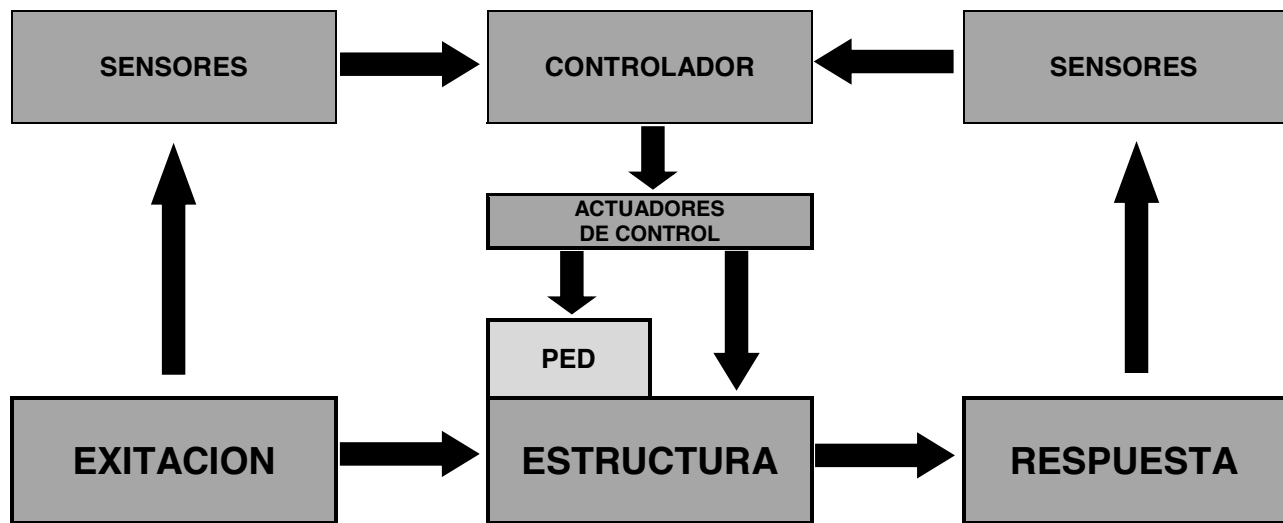


Figura 3.14: Diagrama de flujo de los sistemas híbridos.

3.2.2. Sistemas de aislación

El aislamiento sísmico separa, mediante una interfaz, generalmente flexible la estructura del suelo. El diseño sismorresistente convencional se basa en aumentar las capacidades de resistencia y deformación de los elementos estructurales. Para estas estructuras el sismo genera altas aceleraciones, esfuerzos y deformaciones, produciendo daño en ella y sus contenidos.

El diseño sismorresistente con aislamiento sísmico modifica las características dinámicas de una estructura, reduciendo así la demanda sísmica. En este caso se reducen las aceleraciones y deformaciones de la superestructura, eliminando el daño en ella y sus contenidos.

El aislamiento sísmico modifica las propiedades dinámicas de rigidez (aumento del período fundamental en torno a 2.5 seg) y amortiguamiento (incremento de amortiguamiento a valores del orden del 10%) del sistema estructural de modo que los esfuerzos inducidos por la excitación son considerablemente menores. Gráficamente este efecto se puede apreciar en un espectro de pseudo-aceleración como el que se muestra en la figura 3.15.

3.2.2.1. Apoyos de goma laminada con capas de acero

Los apoyos transmiten las cargas verticales del edificio y absorben la energía sísmica, además, además de evitar las vibraciones producidas por el viento. El propósito de las capas de acero es acotar los desplazamientos verticales de la goma. El amortiguador en conjunto son láminas de acero que se intercalan entre láminas de goma. Estos aisladores son de sección cuadrada o circular, de diámetro aproximado de 50 a 80 [cm].

La sección cuadrada presenta algunas desventajas frente a la circular debido a que, en la primera, pueden ocurrir, en las esquinas del aislador, concentraciones de deformaciones locales. Por otra parte, las distribuciones de tensiones en el aislador cuadrado son más complejas y dependen de la dirección del movimiento. Ambos aspectos se evitan con el uso de aisladores circulares.

3.2.2.2. Aislamiento de base híbrida

Se componen de amortiguadores viscoelásticos y de acero combinados con láminas de goma. El comportamiento de un material es viscoelástico si acumula elásticamente parte de la energía de deformación y disipa el resto a través de fuerzas viscosas. Son adecuados para evitar las vibraciones verticales producidas por el tránsito vehicular, que tienen la característica de ser de alta frecuencia.

Para lograr niveles más altos de amortiguamiento (20% al 40%) se utiliza el aislador de goma con núcleo de plomo que también se conocen como sistemas de goma Nueva Zelanda. Este aislador es idéntico al apoyo de goma laminada con capas de acero salvo que en el centro se le adiciona el núcleo de plomo confinado por las láminas de acero y goma.

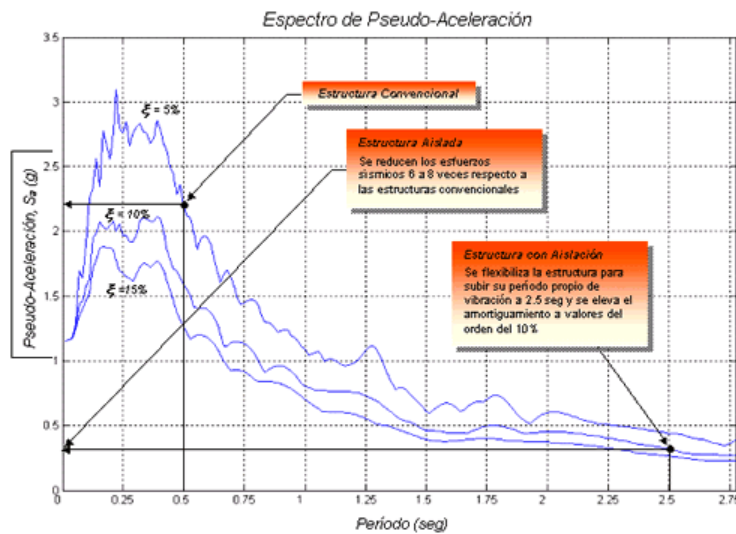


Figura 3.15: Espectro de pseudo-aceleración para el registro de Llole (1985) para relaciones de amortiguamiento de 5%, 10% y 15%.

Este núcleo cumple dos funciones primordiales. La primera es aumentar el amortiguamiento del aislador a través de la fluencia bajo deformación lateral del núcleo de plomo. Y la segunda, es la de rigidizar la estructura lateralmente para cargas de servicio y eventuales.

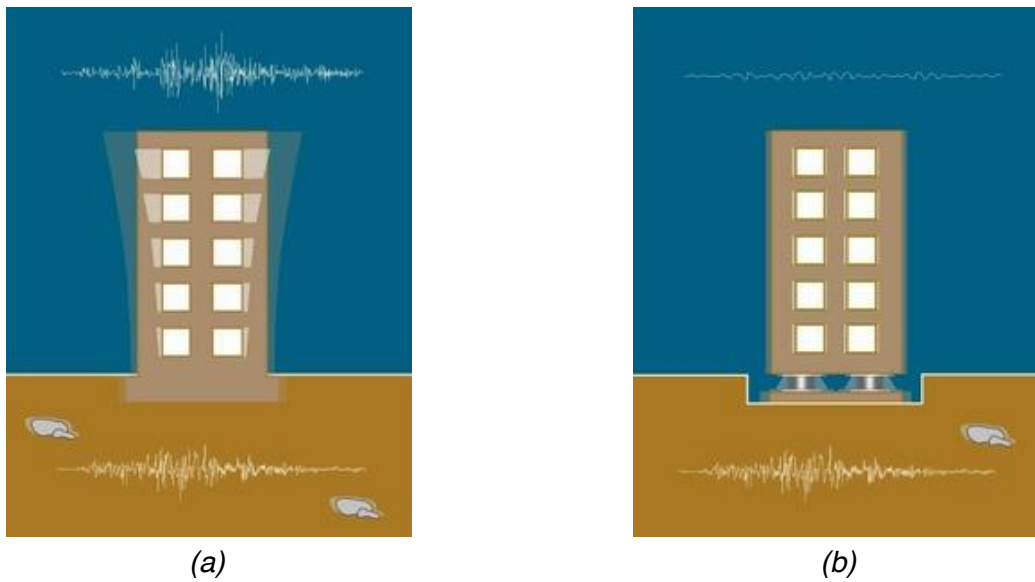


Figura 3.16: (a) Efecto de un sismo en un edificio. (b) Efecto de un sismo con aislamiento de base.

Para lograr un buen funcionamiento mecánico del núcleo de plomo en el aislador se requiere un ajuste preciso entre éste y las placas intermedias de acero. Esto se logra haciendo que el volumen de plomo sea ligeramente mayor (1%) que el volumen del orificio, lo que produce una extrusión del plomo en las capas de goma y así el ajuste deseado. Es importante también que el núcleo de plomo se encuentre confinado por las placas intermedias de acero y las placas superior e inferior para garantizar una fluencia uniforme.



Figura 3.17: Corte esquemático de un aislador de base.

3.2.2.3. Apoyos de goma con alto amortiguamiento

Estos apoyos no necesitan de capas de acero debido a sus características de alto amortiguamiento, para un amplio rango de frecuencias y deformaciones típicas de diseño. El material de este aislador sigue siendo de goma que contiene adiciones que modifican su composición química y un tratamiento especial.

3.2.2.4. Sistemas de fricción puros

Se basan esencialmente en los mecanismos de deslizamiento friccionales. La fuerza horizontal friccional ofrece resistencia al movimiento y disipa la energía. El uso de capas de arena o rodillos en las fundaciones de los edificios es el más simple ejemplo de fricción pura para aislación de base.

3.2.2.4.1. Péndulo de fricción

Consiste en una articulación de deslizamiento o “slider” que se mueve sobre una superficie esférica cóncava. Cualquier movimiento de la base producirá un desplazamiento del “slider” a lo largo de esa superficie disipando energía por fricción.

Sin embargo este deslizamiento al ser sobre una superficie curva hacer que la carga vertical transmitida por el “slider” provoque una componente tangencial que tienda a centrar el sistema.

Este aislador puede ser colocado tanto en su posición basal como invertida, mejorando así la posibilidad de mantener limpia la superficie esférica, a pesar de que existe un sello de goma alrededor del aislador que evita el ingreso de polvo y agua.

Este sistema usa la gravedad y su geometría para alcanzar el aislamiento sísmico deseado.

3.2.2.5. Sistemas elásticos-friccionales

Consisten en capas concéntricas de placas de teflón que están en contacto friccional unas con otras, y poseen un núcleo central de goma. Combinan el efecto de amortiguamiento friccional con la elasticidad de la goma. El núcleo de la goma distribuye los desplazamientos y velocidades en toda la altura del amortiguador.

3.2.2.6. Pisos aislantes

Se utilizan cuando se desea aislar sólo una habitación del edificio y su principal ventaja es su menor costo con respecto a los aisladores de base. Estos sistemas se usan para aislar máquinas, computadoras e instrumental de precisión.

Los sistemas de pisos aislantes pueden ser bidimensionales o tridimensionales. Los sistemas tridimensionales consisten en un piso aislado donde se instalan las computadoras e instrumental de precisión, aisladores de goma laminada con capas de acero para controlar los movimientos horizontales, resortes especiales para controlar el movimiento vertical y amortiguadores de aceite para reducir los desplazamientos.

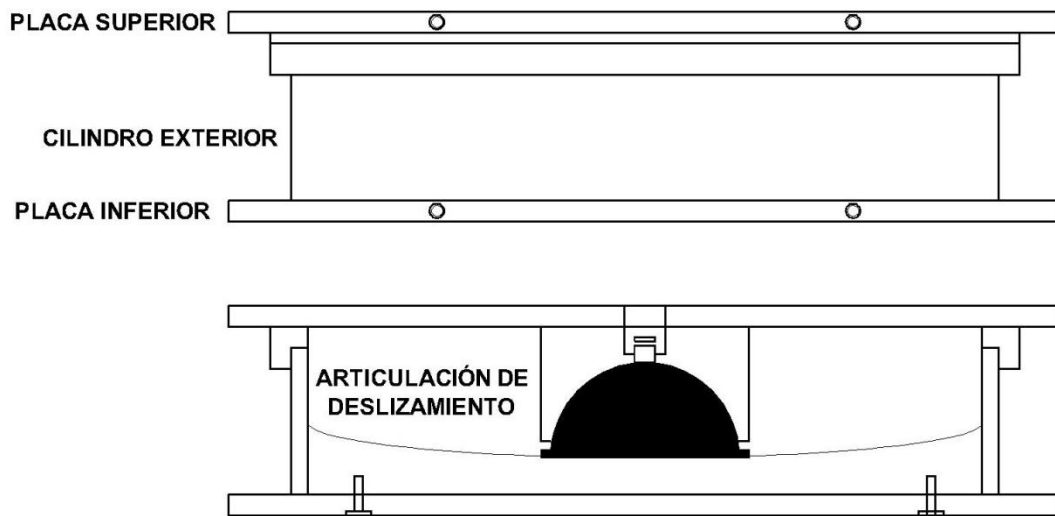


Figura 3.18: Péndulo de fricción.

CAPÍTULO 4: CARACTERÍSTICAS Y COMPORTAMIENTO DE LOS AMORTIGUADORES VISCOSOS

4.1. INTRODUCCIÓN

La cantidad de amortiguamiento en los sistemas estructurales se puede aumentar debido a la adición de amortiguadores lineales viscosos, produciendo un sistema con amortiguamiento no clásico.

Uno de los mecanismos más eficientes para añadir capacidad de disipación de energía a una estructura es mediante el uso de amortiguadores viscosos. Este mecanismo disipa energía transfiriendo un fluido a través de un orificio, produciendo presión y amortiguamiento.

Los amortiguadores viscosos son mecanismos que proporcionan una fuerza resistente que es proporcional a la velocidad aplicada más que al desplazamiento aplicado. Estos mecanismos tienen poca resistencia a la deformación cuando las cargas son aplicadas muy lentamente, pero la resistencia aumenta mientras la velocidad a la cual la deformación es aplicada, aumenta.

Estas fuerzas que amortiguan son 90 grados fuera de fase con las fuerzas conducidas de la dislocación en la estructura. Esto significa que la fuerza que amortigua no aumenta perceptiblemente las cargas sísmicas para un grado comparable de deformación estructural.

Los amortiguadores no requieren técnicas constructivas ni de proyecto distintas de las que se emplean en edificios convencionales. Su utilización es eficiente en edificios de poca y gran altura y el costo unitario de muchos de estos dispositivos es muy reducido.

Básicamente, un amortiguador viscoso es comparable en la acción al amortiguador de choque en un automóvil, pero operan en un rango de fuerzas más altos. Además, los amortiguadores estructurales son perceptiblemente más grandes que los amortiguadores automotores, y se construyen de acero inoxidable y de otros materiales extremadamente durables, como sea necesario para equipar una vida por lo menos de 40 años.

El fluido de estos amortiguadores tienen las siguientes propiedades generales: es inerte, no inflamable, no tóxico, y estable por largos periodos de tiempo. Puede ser visto que simplemente moviendo la barra del pistón hacia adelante y hacia atrás, el líquido pasa a través de los orificios de la cabeza del pistón, generando la fuerza que amortigua.

Las variables por considerar en el diseño de elementos de un amortiguador son relativamente pocas. Sin embargo, el detalle de estos elementos varía grandemente y puede, llega a ser en algunos casos difícil y complejo. La figura 4.1 muestra un amortiguador viscoso típico y sus piezas.



Figura 4.1: Amortiguador Viscoso (VD).
(Copyright © 2012 Taylor Devices All Rights Reserved)

4.2. DESCRIPCIÓN DE LOS AMORTIGUADORES VISCOSOS.

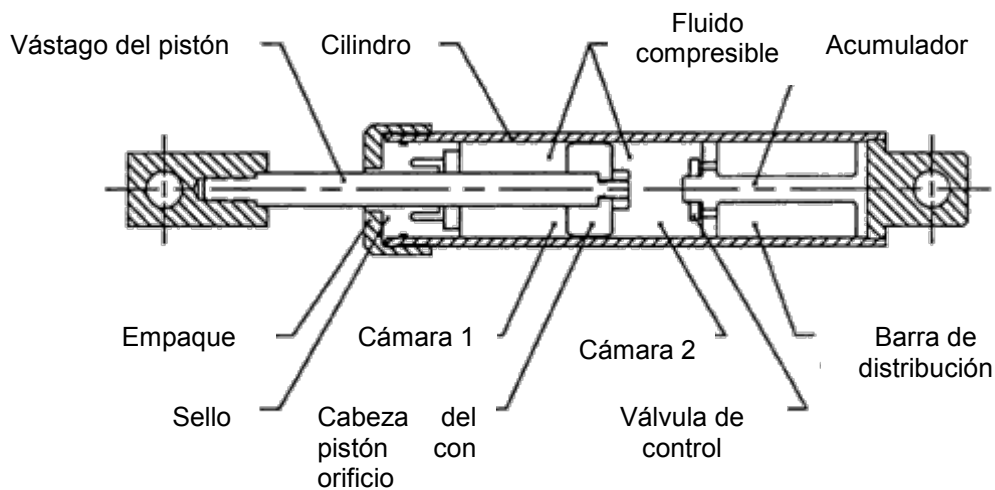


Figura 4.2: Partes que forman un amortiguador viscoso (VD).

(Copyright © 2012 Taylor Devices All Rights Reserved)

4.2.1. Vástago del pistón

Pulido en su diámetro exterior, la biela se desliza a través del sello y el empaque. El extremo externo del vástago se fija a una de las dos horquillas de montaje, mientras el extremo interno se adhiere a la cabeza del pistón. En general, el vástago del pistón tiene que hacer reaccionar todas las fuerzas de amortiguación, además de proporcionar una interface selladora con el empaque. Ya que el vástago es relativamente delgado y tiene que soportar las condiciones de la columna de carga, generalmente se manufactura con acero de alta resistencia. Se prefiere el acero inoxidable como material, ya que cualquier tipo de óxido o corrosión en la superficie puede causar fallas catastróficas en el empaque. Además, el diseño del vástago debe basarse en la presión más que en la tensión, ya que el cable elástico de la biela durante la compresión del amortiguador puede causar un atasco o fuga del empaque.

4.2.2. Cilindro

El cilindro del amortiguador contiene el fluido medio y tiene que aceptar carga de recipientes a presión cuando el amortiguador está en operación. Los cilindros generalmente son manufacturados con tubería de acero sin costura. No se permite soldar o fundir en la construcción de cilindros de amortiguadores, por asuntos de resistencia a la fatiga y agotamiento de esfuerzos. Los cilindros por lo general están diseñados para una mínima prueba de carga de presión equivalente a 1.25 veces la presión interna esperada bajo un máximo evento sísmico creíble. Por definición, la prueba de carga de presión tiene que ser contenida por el cilindro sin que ceda, o produzca un daño o fuga de ningún tipo.

4.2.3. Fluido

Los amortiguadores utilizados en aplicaciones de ingeniería estructural necesitan un fluido que sea resistente al fuego, no tóxico, térmicamente estable y que no se degrade con el tiempo. Este fluido tiene que ser clasificado como no-inflamable y no-combustible, con un punto de inflamación de fluido arriba de los 90 grados centígrados. En la actualidad, los únicos fluidos que tienen todos esos atributos son de la familia del silicón. Los fluidos de silicón comunes tienen un punto de inflamación en exceso de 340 grados centígrados, son cosmetológicamente inertes, completamente no tóxicos y térmicamente estables. El fluido de silicón común que se usa en un amortiguador es virtualmente idéntico al silicón utilizado en las típicas cremas cosméticas para manos y cara.

4.2.4. Sellos

Los sellos utilizados en un amortiguador de fluido, tienen que ser capaces de ofrecer una larga vida de servicio, por lo menos de 25 años sin necesidad de reemplazos periódicos. Los materiales del sello tienen que ser cuidadosamente seleccionados por este requerimiento de vida de servicio y por la compatibilidad con el fluido del amortiguador. Debido a que los amortiguadores en estructuras son generalmente sujetos a largos períodos de uso poco frecuente, los empaques no tienen que presentar adherencias de larga duración, ni permitir fugas de fluido. La mayoría de los amortiguadores utilizan sellos dinámicos en la interfaz de la biela, y sellos estáticos donde las tapas o empaques finales están unidos al cilindro. Para los sellos estáticos, los *elastómeros* convencionales o sellos de anillo han demostrado ser aceptados. Los sellos dinámicos para el vástago del pistón deben manufacturarse con polímeros estructurales de alta resistencia para eliminar series de adherencia o compresión durante los largos períodos de inactividad. Los materiales comunes de los sellos dinámicos incluyen: *Teflon*®, nylon estabilizado y miembros de la familia de resinas *acetyl*. Los sellos dinámicos manufacturados de polímeros estructurales no se gastan, degradan o fluyen frío con el paso del tiempo. En comparación, los *elastómeros* convencionales requerirán reemplazos periódicos si se usan sellos dinámicos en un amortiguador.

4.2.5. Cabeza del pistón

La cabeza del pistón se anexa al vástago, y efectivamente divide el cilindro en dos cámaras de presión. Como tal, la cabeza sirve para barrer el fluido a través de los orificios localizados dentro de éste, y así generar la presión de amortiguamiento. La cabeza del pistón normalmente es un ajuste muy cercano al calibre del cilindro, en algunos casos, la cabeza puede incluso incorporar un sello al calibre del cilindro. Las cabezas del pistón son relativamente simples en apariencia. Sin embargo, los pasajes de los orificios maquinados o construidos dentro de la cabeza, generalmente tienen figuras muy complejas, depende de la ecuación del rendimiento del amortiguamiento seleccionada.

4.2.6. Empaque

Se usa para cerrar los extremos abiertos del cilindro, estos extremos generalmente se conocen como las puntas de las tapas, los chapones o las prensaestopas. Es preferible usar hilos de diámetro largo torneados ya sea en el exterior o interior de la superficie del cilindro para asegurar el empaque. Los objetos múltiples como pernos, tornillos, u otro tipo de auxiliares; deben evitarse, ya que éstos pueden ser afectados por la resonancia de alta frecuencia ya sea por un terremoto transitorio o por el espectro de respuesta de la construcción.

4.2.7. Acumulador

El amortiguador simple representado en la figura 4.2, utiliza un acumulador interno, alineado a la biela. El acumulador consiste ya sea en un bloque de esponja plástica compacta, un acumulador de pistón movable (y con gas presurizado), o uno de una cámara de goma. El propósito del acumulador es acceder por medio del desplazamiento volumétrico del vástago del pistón mientras entra o sale el amortiguador durante la excitación. Un segundo propósito es compensar por la expansión y contracción termal del fluido. El amortiguador en la figura 4.2 usa una válvula de control para medir la cantidad de fluido desplazado dentro del acumulador, cuando el amortiguador se está comprimiendo. Cuando el amortiguador se extiende, la válvula de control se abre para permitir al fluido del acumulador entrar libremente a las cámaras de presión del amortiguador.

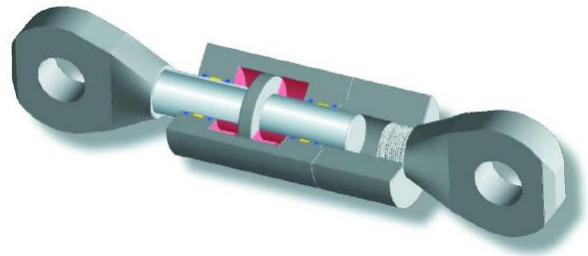
4.2.8. Orificios

El flujo presurizado del fluido a través de la cabeza del pistón es controlado por los orificios. Éstos pueden consistir en un complejo módulo de conductos maquinados, o alternamente, pueden usar agujeros perforados, balines cargados por medio de resortes, válvulas de retención, o bobinas. Los orificios relativamente complejos son necesarios si el amortiguador es para producir rendimiento con una amortiguación exponente de menos de dos. Es más, un simple orificio de agujero perforado seguirá la *ecuación de Bernoulli*, y el rendimiento del amortiguador será limitado por la fuerza variante con el cuadrado de la velocidad del amortiguador. Debido a que la amortiguación de la "velocidad al cuadrado" es de uso limitado en la disipación de energía sísmica, ya se están requiriendo métodos de orificios más robustos y sofisticados. Dependiendo de la ecuación del rendimiento de amortiguación deseada, los conductos de los orificios podrían utilizar flujos convergentes o divergentes, los vórtices podrían ser inducidos para formar áreas específicas, o los conductos de flujo podrían doblarse o retorcerse de manera radical.

4.3. FUNCIONAMIENTO

La acción de amortiguación es proporcionada por el flujo del fluido a través de la cabeza del pistón. La cabeza del pistón está hecha con una deliberada holgura entre el interior del cilindro y el exterior de la cabeza del pistón, la cual forma un orificio anular. El fluido fluye a través de ese orificio a alta velocidad mientras el amortiguador entra en acción. La forma de la cabeza del pistón determina las características del amortiguamiento.

Cuando el amortiguador se comprime, los fluidos fluyen de la cámara 2 a la cámara 1. Cuando el amortiguador se extiende, los fluidos fluyen de la cámara 1 a la cámara 2. La fuerte caída de presión a través del orificio anular, produce una diferencia de presión a través de la cabeza del pistón, la cual crea la fuerza de amortiguamiento.



Como el orificio de amortiguación se da por la holgura entre la cabeza del pistón y el cuerpo del cilindro, es posible que se proporcione compensación térmica inherente por hacerse estas dos partes de materiales diferentes. Al escoger materiales con los coeficientes térmicos correctos de expansión, es posible hacer la variación en el espacio para compensar la variación en las propiedades del fluido al tiempo que la temperatura cambia. Por medio de técnicas propias del diseño, puede obtenerse una variación en el amortiguamiento tan pequeña como el más o menos 15% sobre un rango de temperatura de +20 grados F +120 grados F.

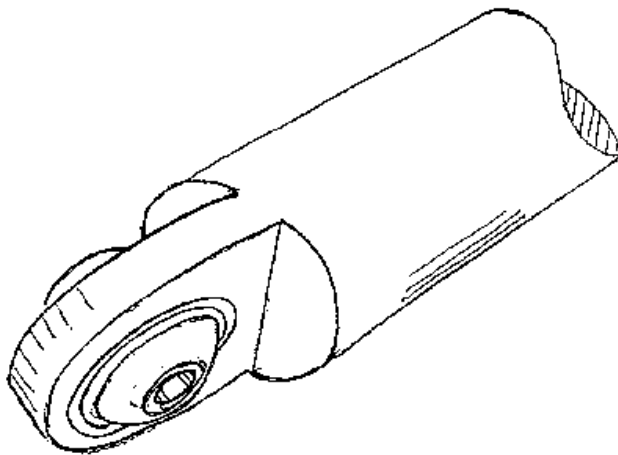


Figura 4.3: Cojinetes esféricos
(Copyright © 2012 Taylor Devices All Rights Reserved)

Los cojinetes esféricos en cada extremo del amortiguador, le permiten hacer ángulos en comparación con la estructura sin tener que amarrar. La figura 4.3 muestra un detalle de estos esféricos cojinetes extremos. Estos cojinetes permiten la rotación en cada dirección, lo cual previene el amarre en el amortiguador.

En algunos casos, hay suficiente flexibilidad en la estructura que es posible soportar los amortiguadores de manera sólida, en cuyo caso, los cojinetes esféricos podrían ya no ser necesarios o sólo usarse en un extremo.

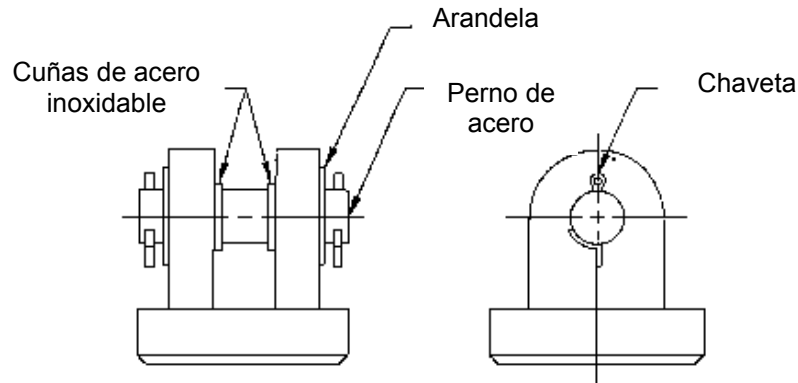
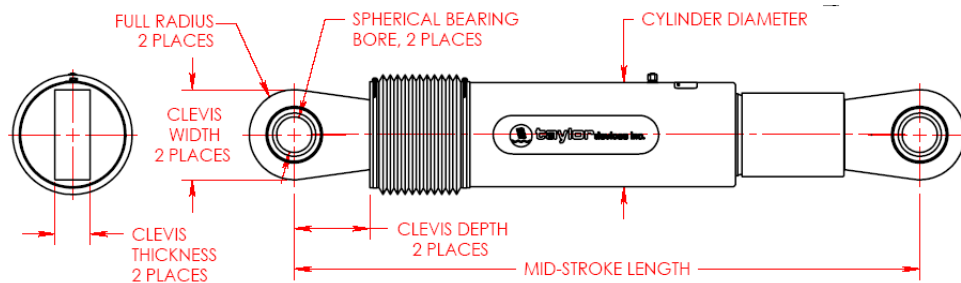


Figura 4.4: Soporte de montaje.
(Copyright © 2012 Taylor Devices All Rights Reserved)

La figura 4.4 muestra un soporte común para los amortiguadores. Este soporte consiste en una abrazadera hembra montada a una base del chapón la cual sucesivamente se suelda a la estructura. En la instalación, los amortiguadores simplemente se deslizan en las abrazaderas. Una vez que los amortiguadores están en las abrazaderas, la inserción de los pernos los mantiene en posición. Entonces las llaves de las chavetas aseguran los pernos en su lugar. Los amortiguadores siempre están hechos con suficiente trayecto extra para dar cuentas por variaciones en la distancia de boquete a boquete en la estructura.



FORCE	SPHERICAL BEARING BORE DIA. (mm)	MD-STROKE LENGTH (mm)	STROKE (mm)	CLEVIS THICKNESS (mm)	CLEVIS WIDTH (mm)	CLEVIS DEPTH (mm)	CYLINDER DIA. (mm)	WEIGHT (Kg)
250 kN	38.10	867	±75	41	102 MAX.	82	115 MAX.	41
500 kN	50.80	1067	±100	54	121 MAX.	102	150 MAX.	82
750 kN	57.15	1194	±100	57	152 MAX.	129	185 MAX.	136
1000 kN	69.85	1238	±100	70	184 MAX.	149	210 MAX.	193
1500 kN	76.20	1314	±100	76	203 MAX.	162	245 MAX.	360
2000 kN	101.60	1575	±125	114	286 MAX.	190	350 MAX.	385
4000 kN	127.00	1880	±125	140	324 MAX.	241	425 MAX.	590
6500 kN	152.40	2134	±125	152	356 MAX.	273	515 MAX.	1202
8000 kN	177.80	2242	±125	178	413 MAX.	317	565 MAX.	1860

Figura 4.5: Dimensiones y características de un amortiguador de Taylor Devices Inc.
(Copyright © 2012 Taylor Devices All Rights Reserved)

4.4. AMORTIGUAMIENTO VISCOSO

La relación *fuerza/velocidad* para este tipo de amortiguador puede caracterizarse como:

$$F_D = CV^\alpha \text{sgn}(V) \quad (4.1)$$

donde F_D es el rendimiento de la fuerza, V es la velocidad relativa a través del amortiguador, C es una constante determinada principalmente por el diámetro del amortiguador y el área del orificio, y α es un exponente constante el cual puede ser cualquier valor desde 30 hasta 1.95. El valor exacto de α depende de la forma de la cabeza del pistón. Los valores de α con rango de 0.3 a 1.1 parecen trabajar mejor para aplicaciones estructurales. Algunos amortiguadores tienen una válvula de fuga que proporciona un límite de velocidad. Para todas las velocidades más allá del límite la fuerza de amortiguamiento es constante.

Los amortiguadores viscosos son atractivos desde el punto de vista teórico, porque la velocidad está fuera de fase con el desplazamiento. La figura 4.5 muestra la velocidad correspondiente a una onda senoidal de desplazamiento con un periodo de 1 segundo. Al máximo desplazamiento la velocidad es cero y, a la inversa, la máxima velocidad ocurre cuando el desplazamiento es cero.

En teoría, las fuerzas de un amortiguador viscoso no se añadirían al total de las fuerzas elásticas en una estructura, porque las máximas fuerzas de amortiguamiento ocurren cuando las fuerzas elásticas son pequeñas, por causa de la deformación. En la práctica, las dos fuerzas hacen pareja para alguna amplitud y así la fuerza total generalmente se incrementa.

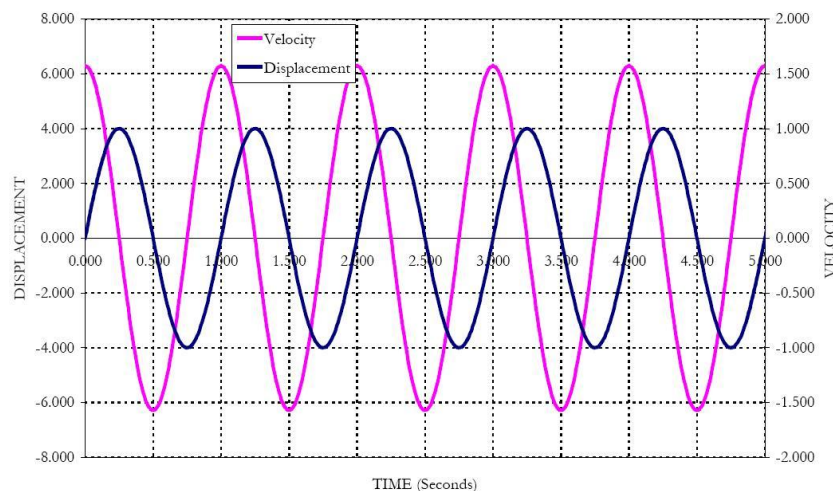


Figura 4.6: Desfase entre desplazamiento y velocidad.
(*In-Structure Damping And Energy Dissipation - Design Guidelines*, Trevor E. Kelly, S.E. – Página 24)

4.4.1. Propiedad del amortiguador

Como se muestra en la Ec. 4.1, los parámetros del amortiguador que definen la fuerza de amortiguamiento son el coeficiente C , el exponente α y el límite de velocidad, si existe alguno. El impacto de esos parámetros, y el efecto de las características del régimen de carga, se ilustran en las siguientes figuras de la 4.7 a la 4.12, cada una generada por un trazo de desplazamiento sinusoidal. Las fórmulas para el desplazamiento, Δ y velocidad, V , son:

$$\Delta = \Delta_0 \sin\left(\frac{2\pi}{T} t\right) \quad (4.2)$$

$$V = \frac{d\Delta}{dt} = \Delta_0 \frac{2\pi}{T} t \cos\left(\frac{2\pi}{T} t\right) \quad (4.3)$$

En cada figura la leyenda identifica los valores de los parámetros; T es el periodo de la onda senoidal aplicada, C es el coeficiente de amortiguamiento y α es el exponente de amortiguamiento, α .

- Figura 4.7 muestra el efecto de variación C . Como se esperaba de la forma de la Ec. 4.1, la fuerza de amortiguamiento es lineal con C . Si C se duplica, la fuerza de amortiguamiento se duplica por la misma velocidad. La forma del amortiguamiento contra la curva de desplazamiento, es elíptica, siguiendo la forma del trazo de velocidad.

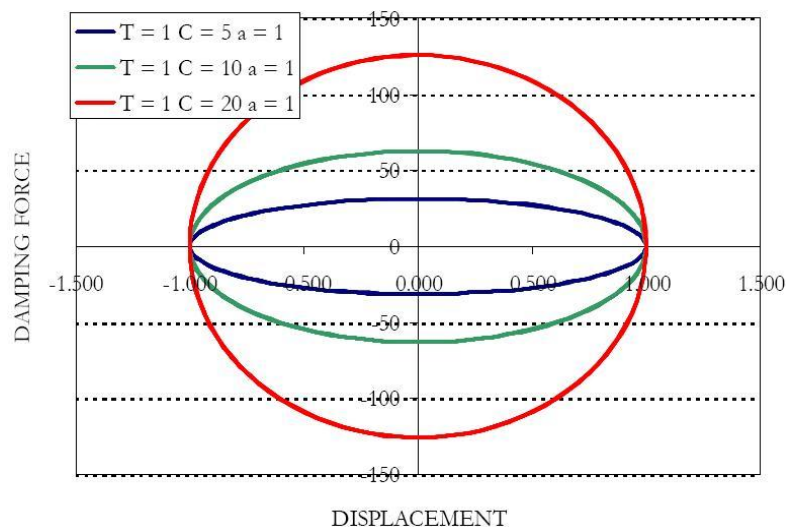


Figura 4.7: Coeficiente de amortiguamiento, C .

(In-Structure Damping And Energy Dissipation - Design Guidelines, Trevor E. Kelly, S.E. – Página 26)

- Figura 4.8 mantiene constante el coeficiente C y el exponente α varía de 0.3 a 1.0, el rango normal de mecanismos prácticos. Mientras α reduce de 1.0 a 0.3 la fuerza de amortiguamiento disminuye y la función de la fuerza de amortiguamiento tiende a cambiar de una forma elíptica hacia una más rectangular.

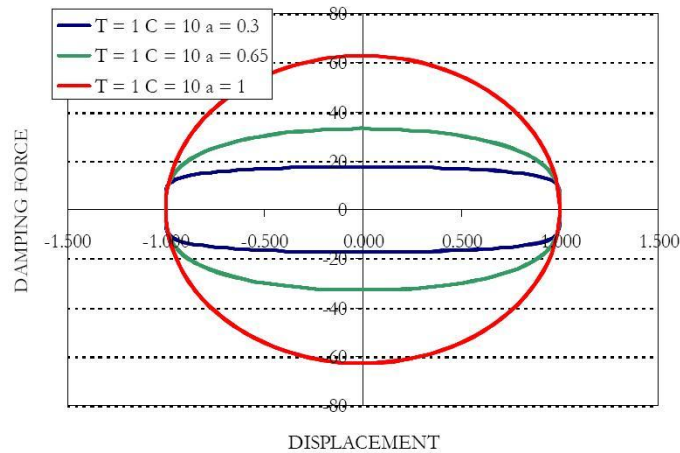


Figura 4.8: Exponente α , para C constante.

(In-Structure Damping And Energy Dissipation - Design Guidelines, Trevor E. Kelly, S.E. – Página 26)

- Figura 4.9 también varía α pero el coeficiente C se ajusta, de tal manera que la fuerza de amortiguamiento total es la misma. Para mantener la fuerza de amortiguamiento proporcionada por $\alpha = 1.0$ cuando α se reduce a 0.3, el coeficiente de amortiguamiento tiene que aumentar de 5.5 a 20. Este plano muestra claramente el cambio de elipse a rectángulo mientras que el exponente se reduce.

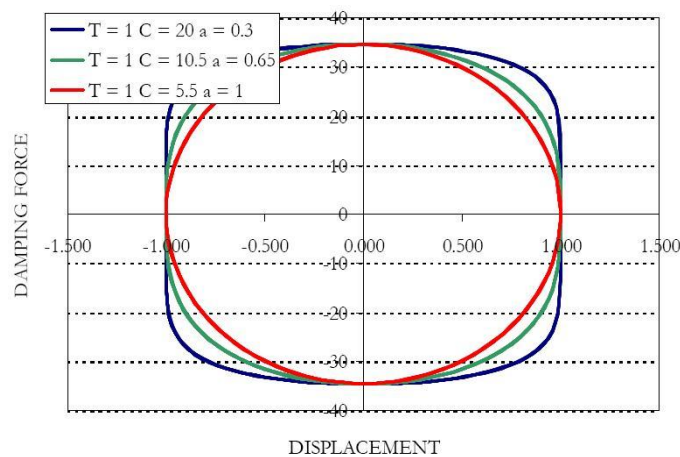


Figura 4.9: Exponente α , para la fuerza de amortiguamiento F_D constante.

(In-Structure Damping And Energy Dissipation - Design Guidelines, Trevor E. Kelly, S.E. – Página 27)

- Figura 4.10 muestra el efecto de un límite de velocidad que limita la fuerza del amortiguador a 50 unidades mientras C aumenta de 5 a 20 (Ver también figura 4.7, las mismas curvas sin el límite de velocidad). Mientras el valor de C aumenta el límite trunca el eclipse. Esto tiene un efecto similar al reducir el exponente en el que la forma elíptica se convierte en una más rectangular.

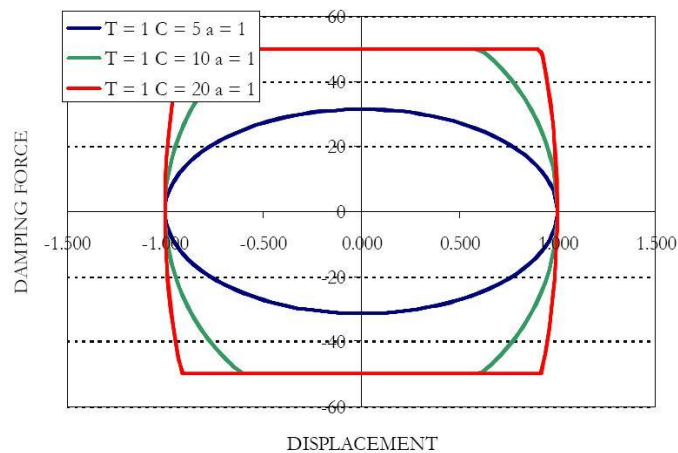


Figura 4.10:

(*In-Structure Damping And Energy Dissipation - Design Guidelines, Trevor E. Kelly, S.E. – Página 27*)

- La Figura 4.11 muestra el efecto de variar en la fuerza de amortiguamiento del periodo de desplazamiento de la curva senoidal, pero reteniendo la misma amplitud. De la Ec. 4.3, la velocidad es inversamente proporcional al periodo de respuesta, T . Para el mismo desplazamiento, un periodo más corto proporciona una fuerza de amortiguamiento más larga.

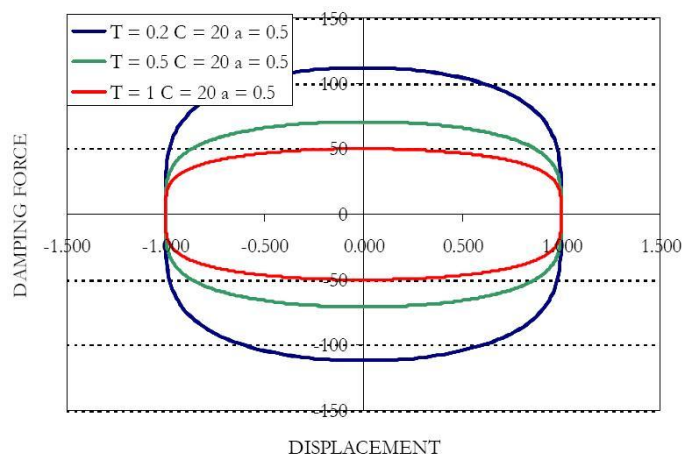


Figura 4.11: Frecuencia de carga.

(*In-Structure Damping And Energy Dissipation - Design Guidelines, Trevor E. Kelly, S.E. – Página 28*)

- La Figura 4.12 plantea las fuerzas de amortiguamiento para variar desplazamientos. La velocidad es directamente proporcional al desplazamiento por un periodo constante. La fuerza del amortiguador es proporcional al desplazamiento del poder del exponente. En este caso, el exponente es 0.6 y entonces, si el desplazamiento aumenta por un factor de 4 la fuerza de amortiguamiento aumentará por un factor de $\sqrt[4]{4} = 2$.

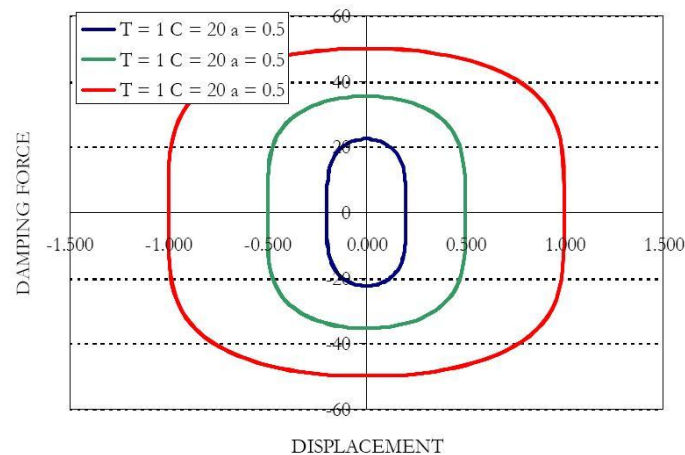


Figura 4.12: Amplitud de desplazamiento.

(In-Structure Damping And Energy Dissipation - Design Guidelines, Trevor E. Kelly, S.E. – Página 28)

En términos de las propiedades disponibles del amortiguador, el coeficiente C puede ser seleccionado para ser casi cualquier valor, como puede variarse simplemente instalando más o menos amortiguadores en la estructura. El exponente α puede variar entre los límites de 0.3 y 1.0. En general, el valor más alto, el cual proporciona una relación lineal entre la fuerza de amortiguamiento y la velocidad, proporcionará los mejores resultados, y un valor de 1.0 es el más usado comúnmente.

A pesar de que el límite de velocidad podría ser útil para limitar las fuerzas, esta función removería parte de las características deseables de los amortiguadores viscosos, fuerzas que están fuera de fase con desplazamientos.

4.4.2. Interacción de la estructura con el amortiguador

Como para la fricción del amortiguador, la función del amortiguamiento de un amortiguador viscoso podría ser modificada por la flexibilidad de la conexión entre el amortiguador y la estructura. Por ejemplo, un amortiguador viscoso en una abrazadera tendría propiedades de un amortiguador además de un resorte en series. Parte de la historia de desviación causaría deformación en el resorte el cual reduciría el relativo movimiento del amortiguador. Esto reduciría la fuerza de amortiguamiento por un factor constante, cuya magnitud sería una función de la rigidez de la conexión.

Los amortiguadores también actuarían en paralelo con la estructura a la que están amortiguando. Si la estructura es elástica entonces el efecto sería "inclinarse" la elipse. Si la estructura se vence, un caso común, entonces se presentaría un trazo de la forma combinado de fuerza-desplazamiento, como se muestra en la figura 4.13.

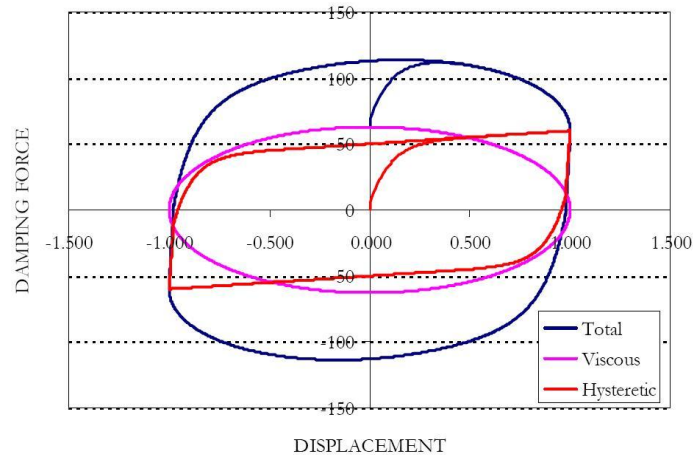


Figura 4.13: Amortiguamiento histerético en paralelo con el amortiguamiento viscoso.
(In-Structure Damping And Energy Dissipation - Design Guidelines, Trevor E. Kelly, S.E. – Página 29)

En el ejemplo ilustrado en la figura 4.13, la máxima fuerza de la estructura es 60 y la fuerza más alta es 31.4. La máxima fuerza en el sistema combinado es 83.2 y así la "asociación" es $83.2 - 60 = 23.2$, que significa que la máxima fuerza en la estructura se incrementa por un 74% de la fuerza del amortiguador. Si el exponente α es menor que uno, entonces la asociación se incrementa. $\alpha = 0.3$ y la fuerza de amortiguamiento máxima es la misma, entonces la asociación aumenta a 81%. Para un amortiguador constante de exponente de 1.0, el grado de asociación es una función del coeficiente del amortiguador, C .

La figura 4.14 plantea la cantidad de amortiguamiento proporcionada (que se define tanto como el radio de la fuerza máxima en el amortiguador, como la fuerza máxima en la estructura) contra el excedente de la asociación (que se define como el radio de la fuerza total máxima menos la fuerza de la estructura máxima dividida por la fuerza del amortiguador máxima)

Para cantidades relativamente pequeñas de amortiguamiento (fuerza de amortiguador 10% de la fuerza de la estructura) no hay mucha asociación, menos del 30%. Sin embargo, la asociación incrementa rápidamente con la fuerza de amortiguamiento y cuando la fuerza del amortiguador iguala la estructura, hay un 80% de asociación, esto es, la fuerza de la estructura se incrementa un 85% de la fuerza del amortiguador.

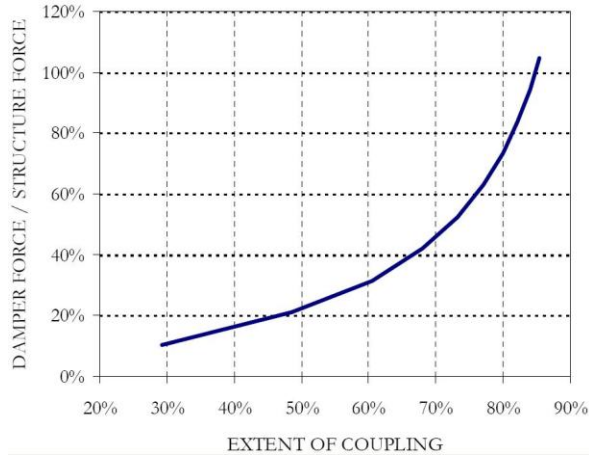


Figura 4.14: Acoplamiento entre la estructura y el amortiguamiento viscoso, con $\alpha = 1.0$.
(In-Structure Damping And Energy Dissipation - Design Guidelines, Trevor E. Kelly, S.E. – Página 30)

4.5. RESUMEN

El amortiguador viscoso proporciona fuerzas de amortiguamiento que están fuera de fase con los desplazamientos y así, estas fuerzas no están directamente aditivas a las fuerzas de la estructura. En teoría, esto hace a la velocidad dependiente del amortiguador más eficiente.

En la práctica, a pesar de que la velocidad y los desplazamientos están fuera de fase, existe un grado de asociación entre dos conjuntos de fuerzas, especialmente si el exponente del amortiguador está cerca del límite más bajo de 0.3. La amplitud de la asociación incrementa con la cantidad de amortiguamiento. En efecto, entre más proporciona el amortiguamiento, más pequeño es el beneficio de tener la fuerza del amortiguador fuera de fase con la fuerza de la estructura.

CAPÍTULO 5: MODELACIÓN Y ANÁLISIS DE EDIFICIOS CON AMORTIGUADORES VISCOSOS

5.1. INTRODUCCIÓN

Con el propósito de reducir la respuesta ante acciones sísmicas de un sistema estructural, se propone el uso de amortiguadores viscosos como sistemas pasivos de protección.

Debido a la escasa información bibliográfica para modelar el comportamiento de de estructuras con amortiguadores viscosos en programas de análisis estructural, propongo el siguiente método.

Como se ha mencionado anteriormente en la sección 4.4, los amortiguadores responden a la ley:

$$F_D = CV^\alpha \quad (5.1)$$

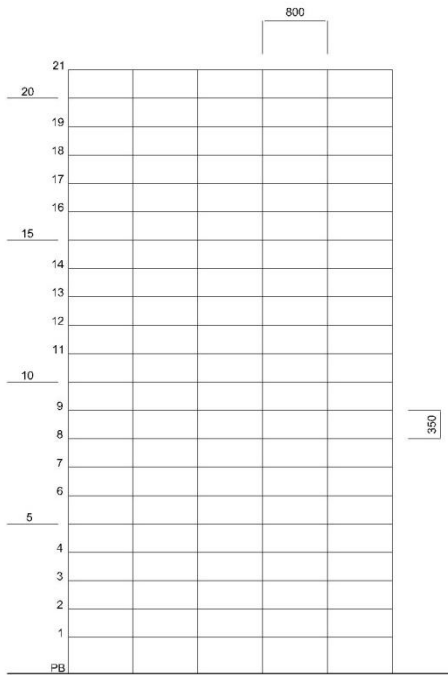
Partiendo de la ecuación 5.1, obtendremos las variables que nos ayudarán a modelar los amortiguadores viscosos.

5.2. CARACTERÍSTICAS DE LA ESTRUCTURA

5.2.1. Sistema Estructural Básico - SB

Primeramente definamos el sistema estructural básico llamado en adelante "SB", el cual nos ayudara a obtener las propiedades dinámicas del sistema.

Para obtenerlas, el SB será analizado linealmente en el modelo realizado con el programa SAP2000.



Estructura de 21 niveles y 5 crujiás, formada a base de marcos de acero.

- Uso: *Habitacional*
- Grupo: *B*
- Material: *Acero* – $F_Y = 3,515.0 [Kg/cm^2]$
- Altura de entrepiso: $h = 350.0 [cm]$
- Longitud de crujía: $L = 800.0 [cm]$

Figura 5.1: Definición del sistema estructural básico - SB

5.2.2. Análisis Lineal

Como mencionamos anteriormente, será necesario obtener las propiedades dinámicas del SB, para lo cual se han utilizado los siguientes parámetros:

- Zona Sísmica: *IIIb*
- Factor de Comportamiento Sísmico: $Q = 2$
- Espectro de Diseño:

Zona	C	C _e	a ₀	T _a	T _b	r
III _b	0.45	0.68	0.11	0.85	3.00	2.00

Tabla 5.1: Valores de los parámetros para calcular el espectro de aceleraciones.

5.2.2.1. Análisis Dinámico Modal Espectral

En base a un “Análisis Dinámico Modal Espectral” hemos obtenido las propiedades dinámicas del SB y se ha revisado que cumpla con las indicaciones que señalan las “Normas Técnicas Complementarias – Diseño por Sismo” en su inciso “9. Análisis Dinámico”

- Periodo

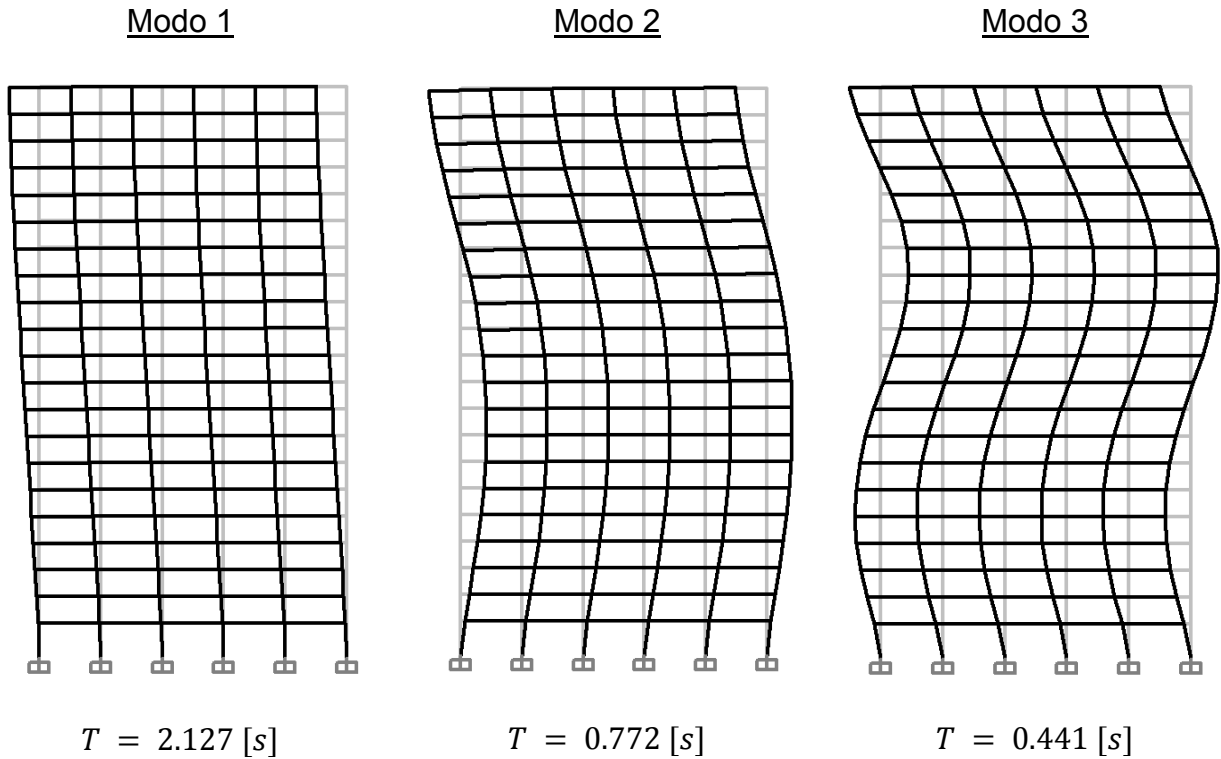


Figura 5.2: Modos naturales de vibración con periodo superior a 0.4 [s]

- Cortante Basal

Conforme al inciso 9.3 de las Normas Técnicas Complementarias – Diseño por Sismo se tiene:

Caso Acción	Reacción - W_0 [Ton]
PESO PROPIO	225.8
LOSA	366.2
SCM	508.8
CVA	293.6
$\Sigma =$	1,394.4

$$W_0 = 1,394.4 [Ton], C = 0.45, Q = 2$$

$$V_B = \frac{C}{Q} W_0 = \frac{0.45}{2} \times 1,394.4$$

$$V_B = 313.8 [Ton]$$

$$V_Y = 0.8V_B$$

$$0.8V_B = 0.8 \times 313.8 = 251.0 [Ton]$$

Se tiene:

1ª Revisión:

Caso Acción	Reacción - V_y [Ton]
SISMO - D_y	306.2

$$V_y > 0.8V_B$$

2ª Revisión:

Caso Acción	Reacción - V_y [Ton]
SISMO - D_y	251.0

$$V_y = 0.8V_B \therefore \text{Cumple}$$

Factor de Corrección:

$$\varphi = \frac{0.8V_B}{V_y} = \frac{251.0}{306.2} = 0.820$$

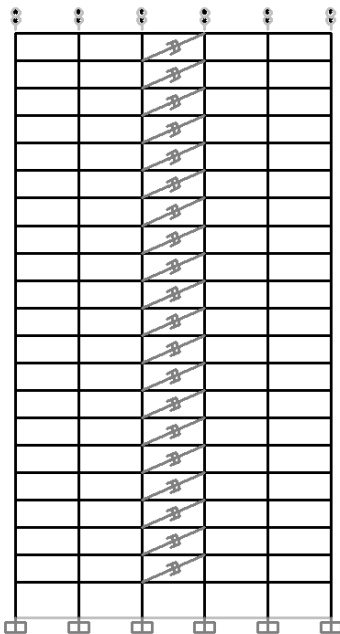
Se corrige la constante g :

$$g' = \varphi g = 0.820 \times 9.81$$

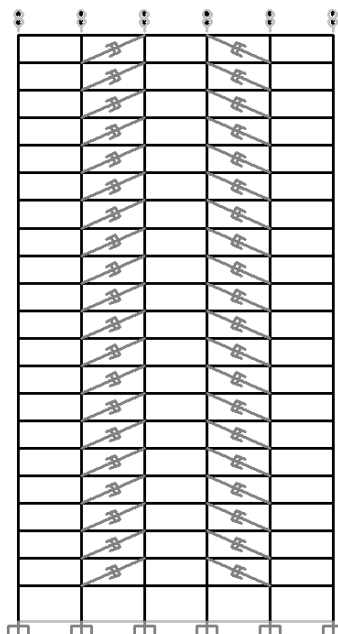
$$g' = 8.042 \text{ [m/s}^2\text{]}$$

5.2.3. Sistema Estructural Disipador – SD

1 Amortiguador



2 Amortiguador



3 Amortiguador

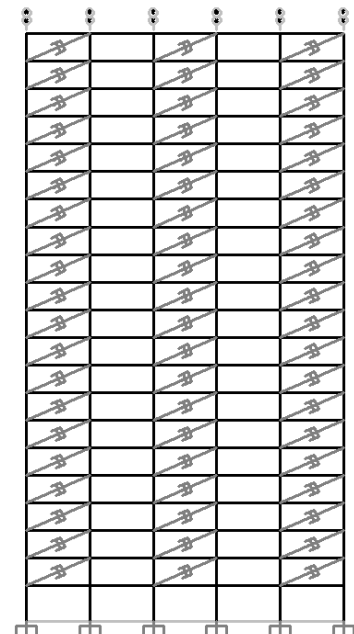


Figura 5.3: 3 distintas configuraciones

5.2.4. Análisis No – Lineal

A fin de conocer la respuesta del Sistema Básico y del Sistema Disipador ante un temblor, realizaremos un análisis en el tiempo o paso a paso, utilizando para ello el sismo de 1985 ocurrido en la Ciudad de México.

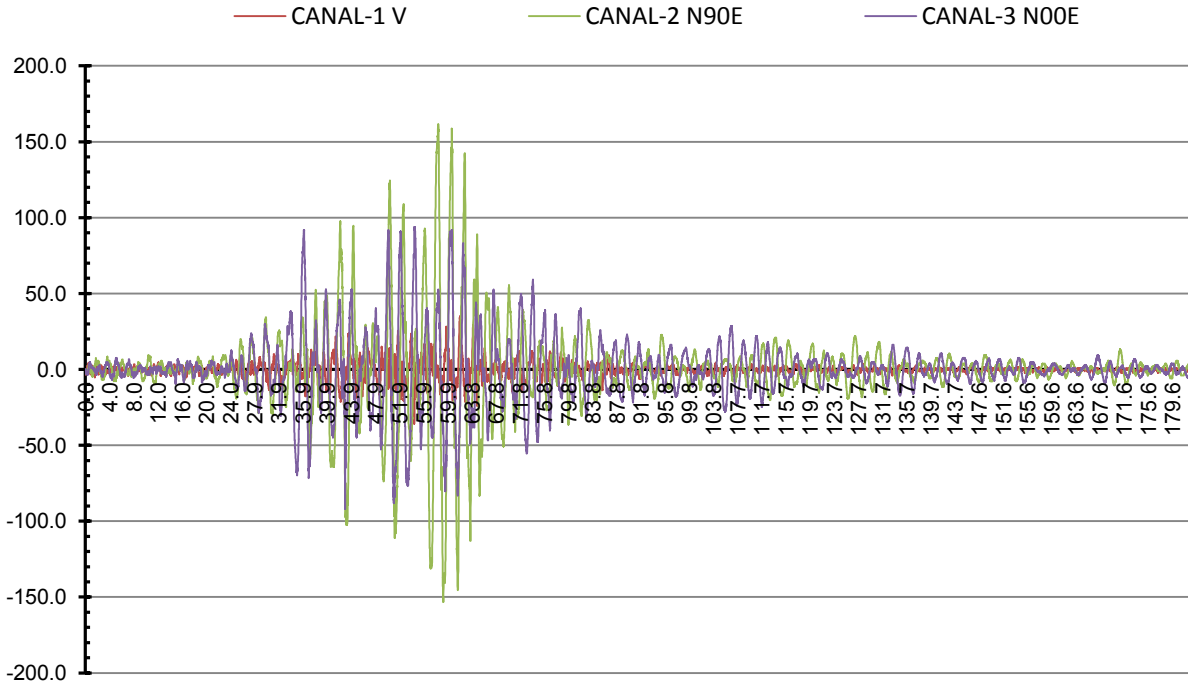


Figura 5.3: Acelerograma del Sismo de 1985 en la Cd. De México

5.2.4.1. Elección del amortiguador

Conforme a la teoría, los amortiguadores responden a la ley:

$$F_D = CV^\alpha \quad (5.1)$$

Para idealizarlos en el programa de análisis estructural (SAP2000), es necesario introducir la variable C , por lo que, despejándola de la Ec. 5.1 tenemos:

$$C = \frac{F_D}{V^\alpha} \quad (5.1)$$

- Fuerza - F_D

Se propondrán 3 amortiguadores con distinta fuerza de amortiguamiento capaces de soportar los rangos de fuerzas cortantes obtenidas del análisis no-lineal. Tabla 5.2.

Para obtener la fuerza del amortiguador, será necesario descomponer la fuerza cortante en un componente no ortogonal a la dirección de ésta, dado que el amortiguador trabaja en forma axial. Figura 5.4

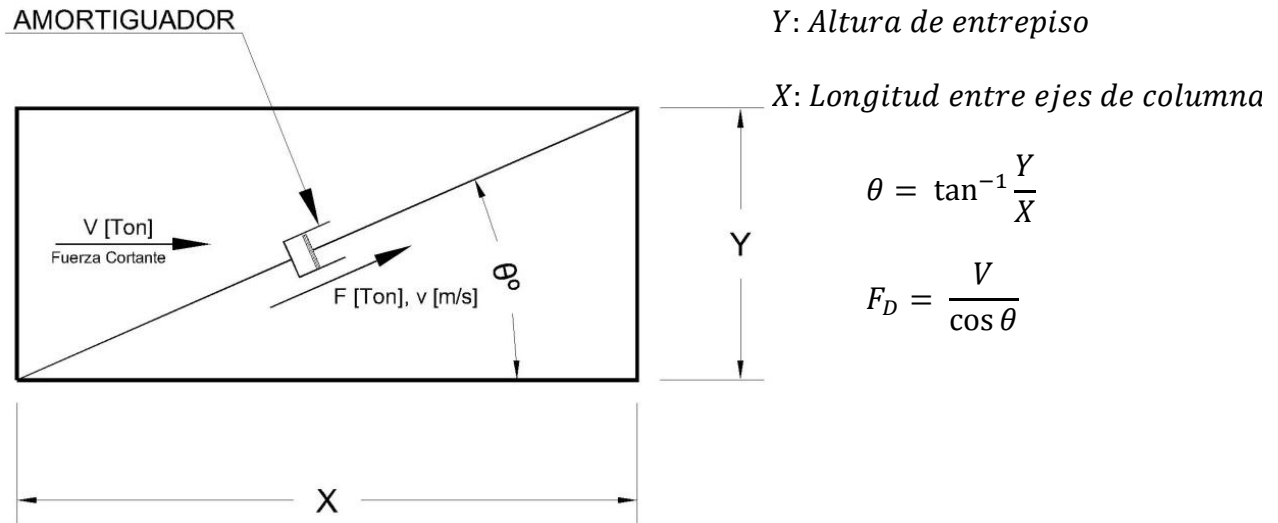


Figura 5.4: Posición y sentido del amortiguador

Tendremos entonces:

De:	Rango - V [Ton]	F_D [Ton]
PB a Nivel 6	1,201.8 a 1,1,104.6	1,250.0
Nivel 7 a Nivel 13	1,066.4 a 713.9	1,100.0
Nivel 14 a Nivel 20	637.4 a 116.8	650.0

- Velocidad - V

En la tabla 5.3, se han obtenido las máximas velocidades alcanzadas durante el sismo.

Nivel	V1 [Ton]	V2 [Ton]	V3 [Ton]	V4 [Ton]	V5 [Ton]	V6 [Ton]	V [Ton]	F_D [Ton]
20	7.9	17.6	28.7	28.1	16.9	7.9	107.0	116.8
19	16.5	33.7	41.5	41.1	32.3	15.7	181.0	197.6
18	23.7	51.7	61.5	61.0	49.8	22.8	271.0	295.8
17	34.3	67.7	76.9	76.4	65.7	33.2	355.0	387.5
16	41.7	83.9	93.7	93.1	81.8	40.7	435.0	474.8
15	48.6	99.4	109.7	109.2	97.4	47.7	513.0	559.9
14	60.1	111.8	121.5	121.0	110.0	59.3	584.0	637.4
13	63.0	126.6	138.5	137.9	124.9	62.3	654.0	713.9
12	65.5	140.8	154.8	154.1	139.2	64.9	720.0	785.9
11	75.4	151.3	164.5	163.9	149.7	74.7	780.0	851.4
10	81.5	162.7	175.2	174.6	161.0	80.8	836.0	912.5
9	89.6	171.9	183.6	183.0	170.2	88.8	888.0	969.3
8	92.5	182.1	194.1	193.5	180.3	91.7	935.0	1,020.6
7	95.0	191.4	203.4	202.8	189.4	94.1	977.0	1,066.4
6	101.7	197.7	208.2	207.7	195.7	100.8	1,012.0	1,104.6
5	105.8	204.0	212.8	212.4	202.1	104.9	1,043.0	1,138.5
4	109.6	209.1	216.0	215.7	207.4	108.7	1,067.0	1,164.6
3	112.8	213.1	217.8	217.5	211.6	112.0	1,085.0	1,184.3
2	116.4	215.3	217.7	217.5	214.2	115.8	1,097.0	1,197.4
1	118.9	216.9	216.3	216.2	216.1	118.5	1,103.0	1,203.9
PB	155.8	197.9	196.8	196.8	197.4	155.5	1,101.0	1,201.8

Tabla 5.2: Fuerzas cortantes de en cada uno de los ejes de columna.

Nivel	U_2 [m/s]	v [m/s]	v [m/s]
21	4.9	5.4	6.0
20	4.8	5.2	
19	4.6	5.1	
18	4.5	4.9	
17	4.2	4.7	
16	4.0	4.4	
15	3.8	4.2	
14	3.5	3.9	4.0
13	3.2	3.6	
12	3.0	3.3	
11	2.7	3.0	
10	2.5	2.7	
9	2.2	2.5	
8	2.0	2.2	
7	1.7	1.9	2.0
6	1.5	1.6	
5	1.2	1.4	
4	1.0	1.1	
3	0.7	0.8	
2	0.4	0.5	
1	0.2	0.3	
PB	0.0	0.0	

Tabla 5.3: Velocidades relativas [m/s].

- Cálculo de la constante C

Nivel	F [Ton]	v [m/s]	α	C [Ton s/m]		
				1-A	2-A	3-A
PB a 6	1,250.0	2.0	0.5	883.9	441.9	294.6
Nivel 7 a 13	1,100.0	4.0	0.5	550.0	275.0	183.3
Nivel 14 a 20	650.0	6.0	0.5	265.4	132.7	88.5

En la figura 5.5 se muestran los datos de entrada para definir las características del amortiguador dentro del programa SAP2000.

Dentro de las propiedades se definen:

- Sentido de trabajo (U_1, U_2, U_3)
- Coeficiente de amortiguamiento
- Exponente

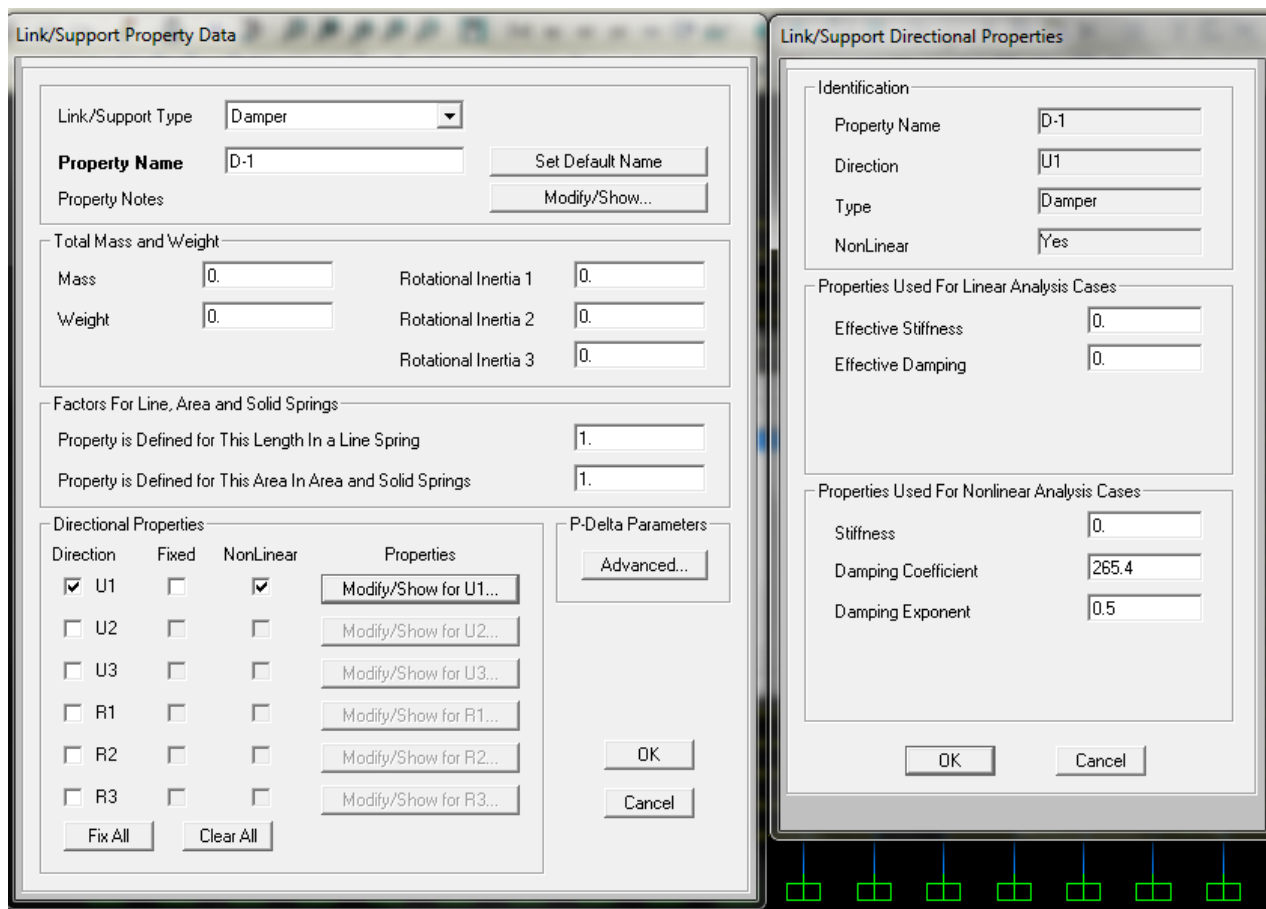


Figura 5.5: Datos de entrada en el programa SAP2000

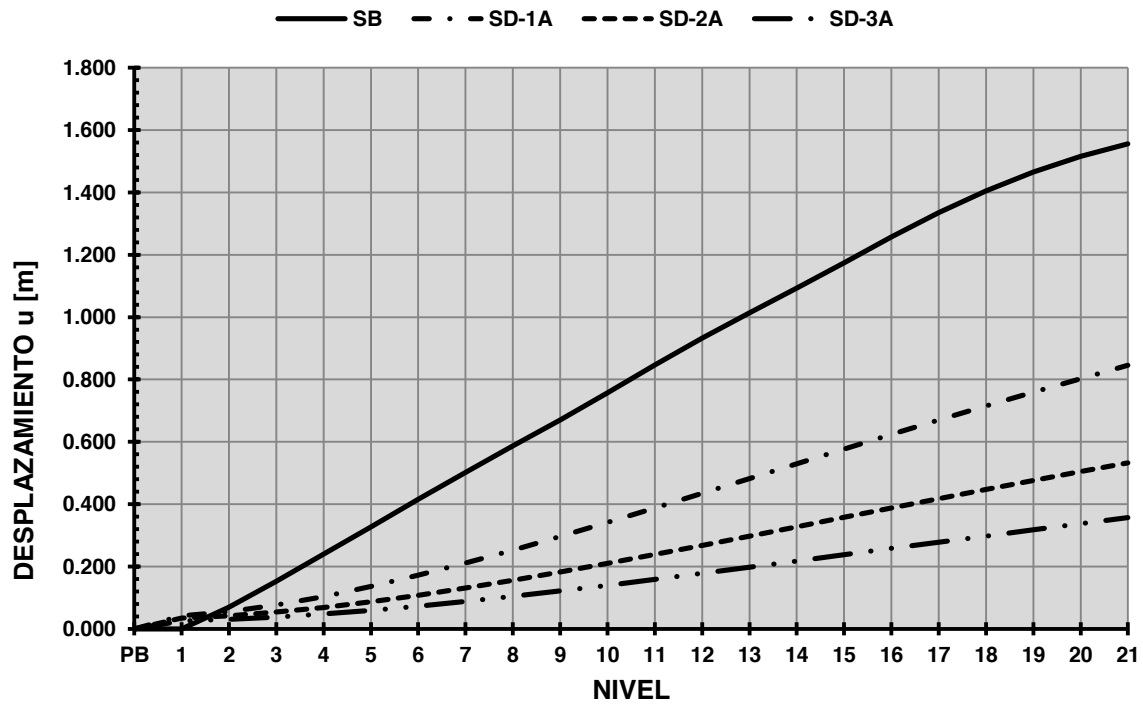
5.1. RESULTADOS

SB	SD-1A	SD-2A	SD-3A
T [s]	T [s]	T [s]	T [s]
2.127	1.615	1.371	1.310%
Decremento:	24.10 %	35.60 %	38.40 %

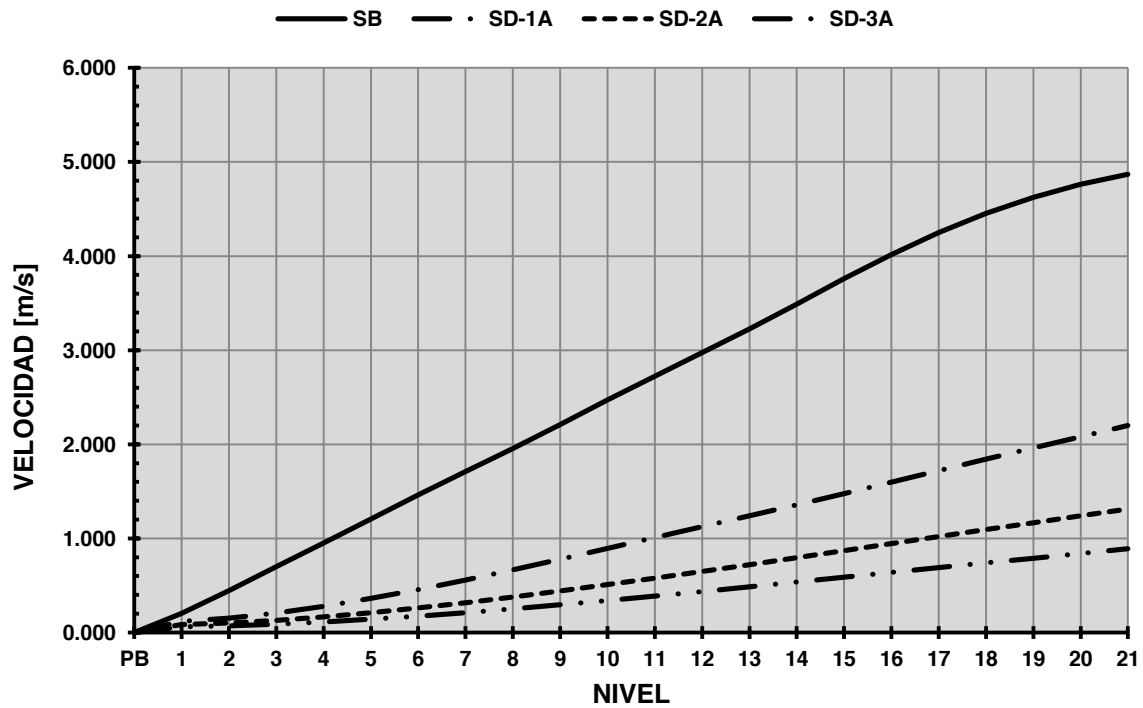
Tabla 5.4: Modo natural de vibración

Desplazamientos de Entrepisos				Velocidades de Entrepisos			
Nivel	SB-U2	SD-U2	Decremento	Nivel	SB-U2	SD-U2	Decremento
	[m]	[m]	%		[m/s]	[m/s]	%
PB	0.000	0.000	0.00%	PB	0.000	0.000	0.00%
1	0.000	0.042	0.00%	1	0.203	0.119	41.66%
2	0.070	0.055	20.60%	2	0.445	0.154	65.47%
3	0.152	0.076	49.88%	3	0.698	0.208	70.16%
4	0.240	0.104	56.75%	4	0.953	0.279	70.73%
5	0.328	0.136	58.57%	5	1.207	0.362	69.97%
6	0.415	0.172	58.63%	6	1.460	0.456	68.77%
7	0.502	0.211	57.96%	7	1.710	0.558	67.40%
8	0.587	0.253	56.94%	8	1.956	0.665	66.00%
9	0.670	0.296	55.80%	9	2.210	0.777	64.83%
10	0.757	0.342	54.89%	10	2.470	0.892	63.88%
11	0.846	0.388	54.16%	11	2.723	1.009	62.95%
12	0.933	0.435	53.35%	12	2.976	1.126	62.17%
13	1.014	0.482	52.46%	13	3.226	1.242	61.50%
14	1.093	0.530	51.54%	14	3.488	1.357	61.10%
15	1.175	0.577	50.87%	15	3.759	1.475	60.76%
16	1.258	0.624	50.40%	16	4.015	1.599	60.17%
17	1.335	0.670	49.83%	17	4.248	1.721	59.48%
18	1.405	0.715	49.11%	18	4.455	1.843	58.64%
19	1.466	0.759	48.22%	19	4.625	1.963	57.57%
20	1.516	0.802	47.08%	20	4.762	2.082	56.29%
21	1.556	0.845	45.69%	21	4.870	2.200	54.83%

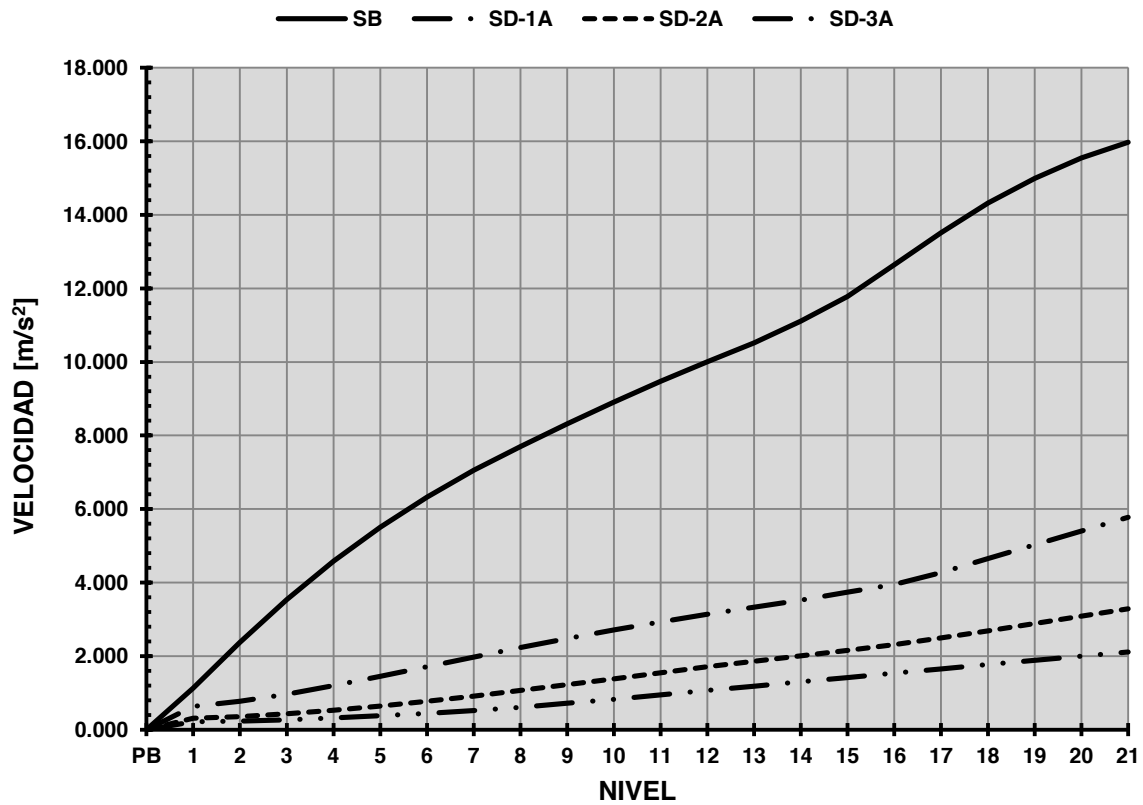
Tabla 5.5: Comparativa entre la respuesta del Sistema Básico (SD) y el Sistema Disipador (SD)



(a)



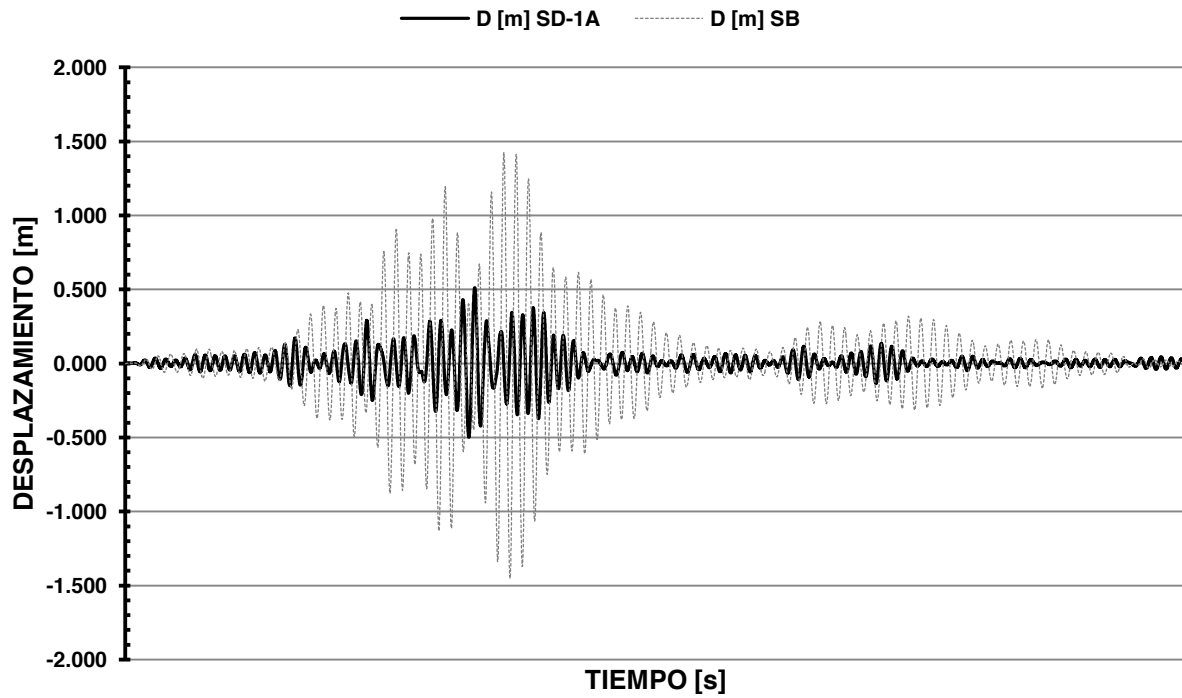
(b)



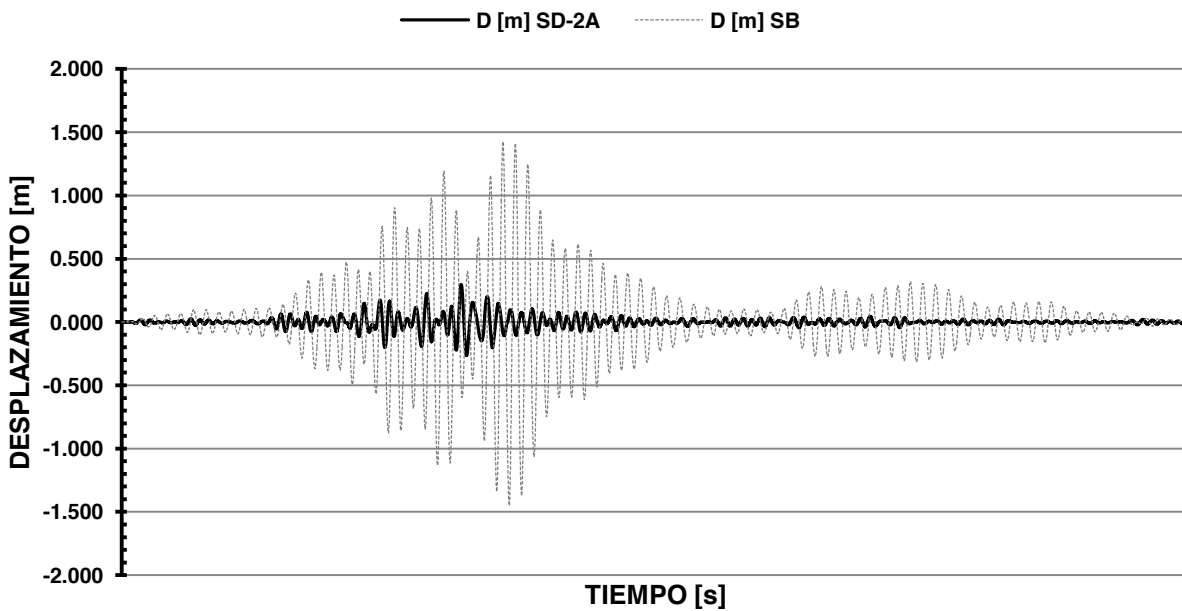
(c)

Figura 5.5: Reducción en la respuesta; (a) desplazamientos, (b) velocidades y (c) aceleraciones

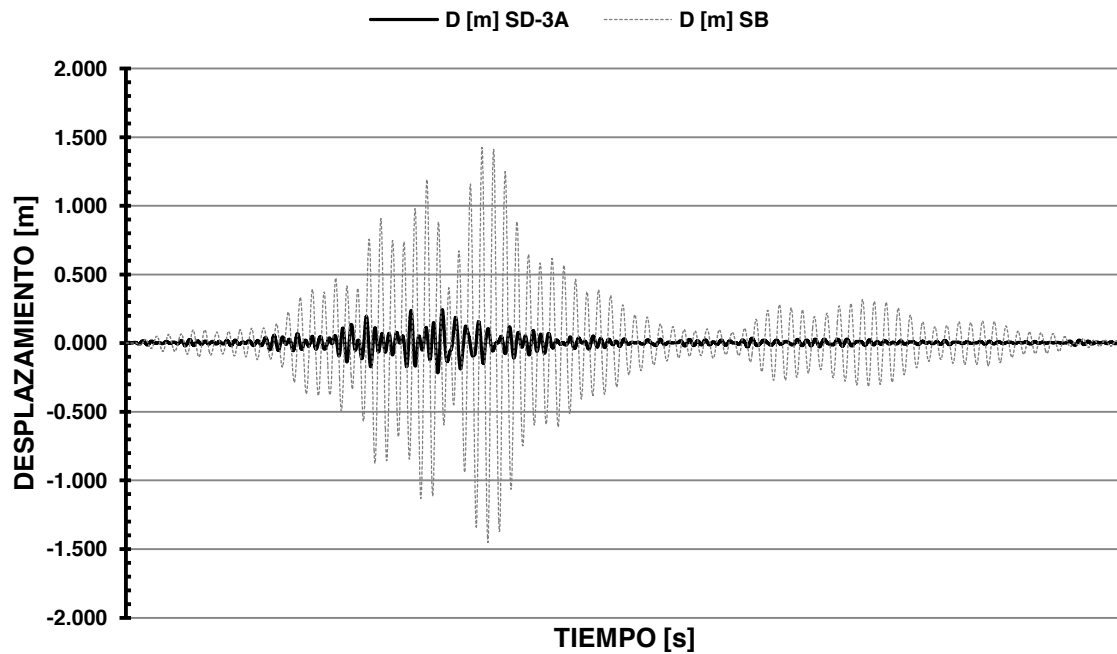
5.1.1. Respuesta en el Tiempo



(a)



(b)

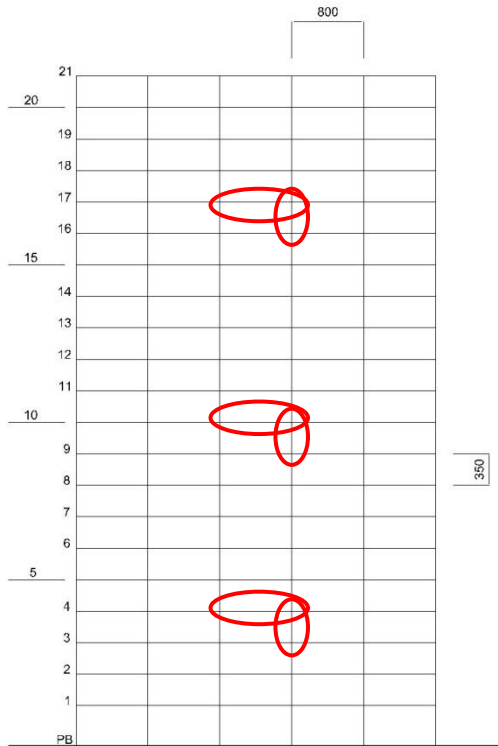


(c)

Figura 5.6: Desplazamiento, (a) SD-1A, (b) SD-2A y (c) SD-3A

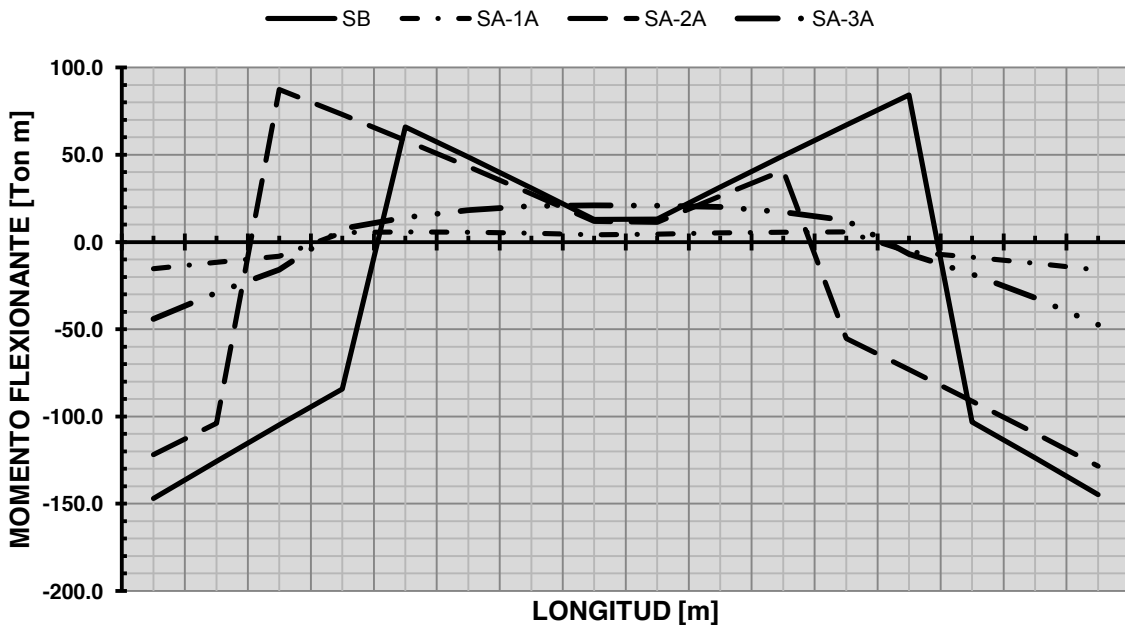
En la figura 5.6 se muestra el desplazamiento que sufre la estructura base (SB) durante la ocurrencia del sismo, así mismo, en las gráficas se sobrepone la respuesta que tienen

5.1.2. Elementos Mecánicos

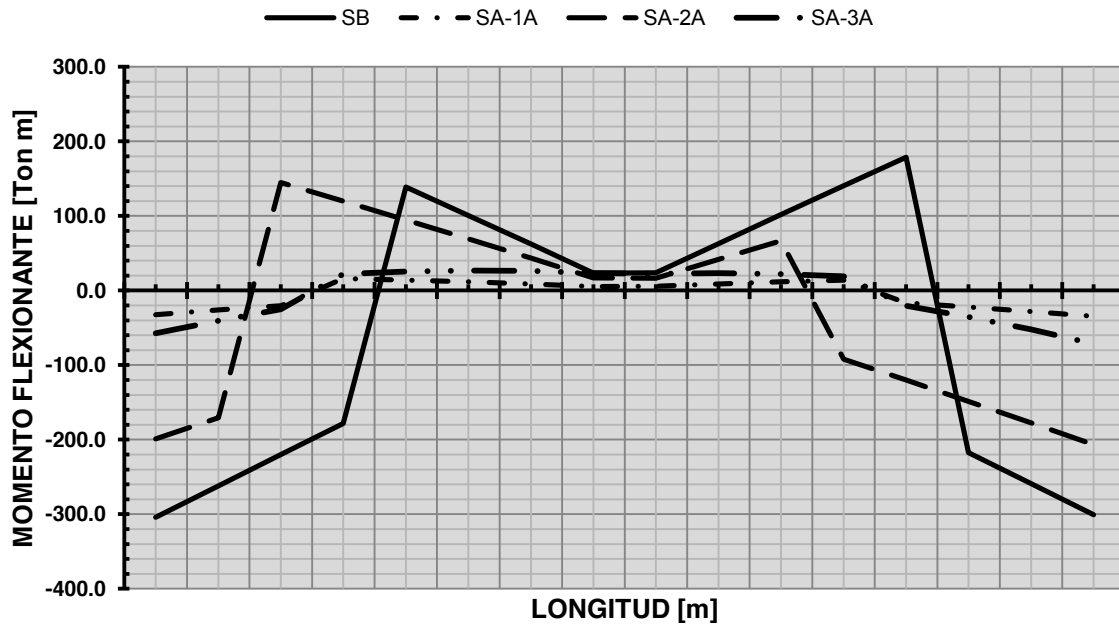


En la figura 5.7 se muestran los elementos que se tomaron para comparar los elementos mecánicos (figuras 5.8, 5.9, 5.10 y 5.11) entre el sistema base SB y los sistemas disipadores, SD-1A, 2A y 3A.

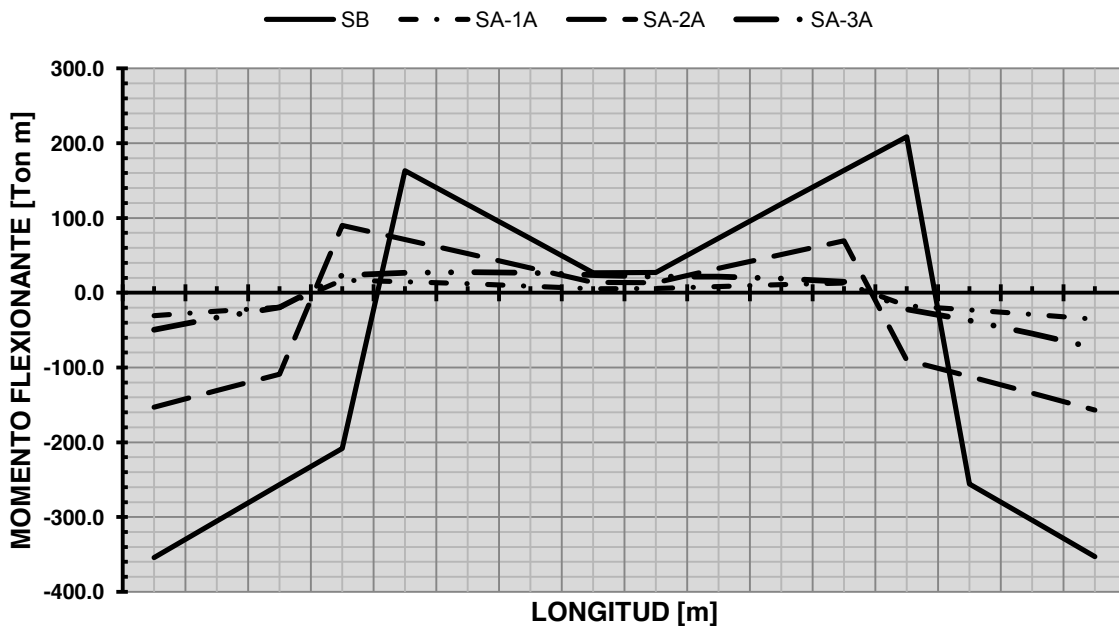
Figura 5.7



(a)

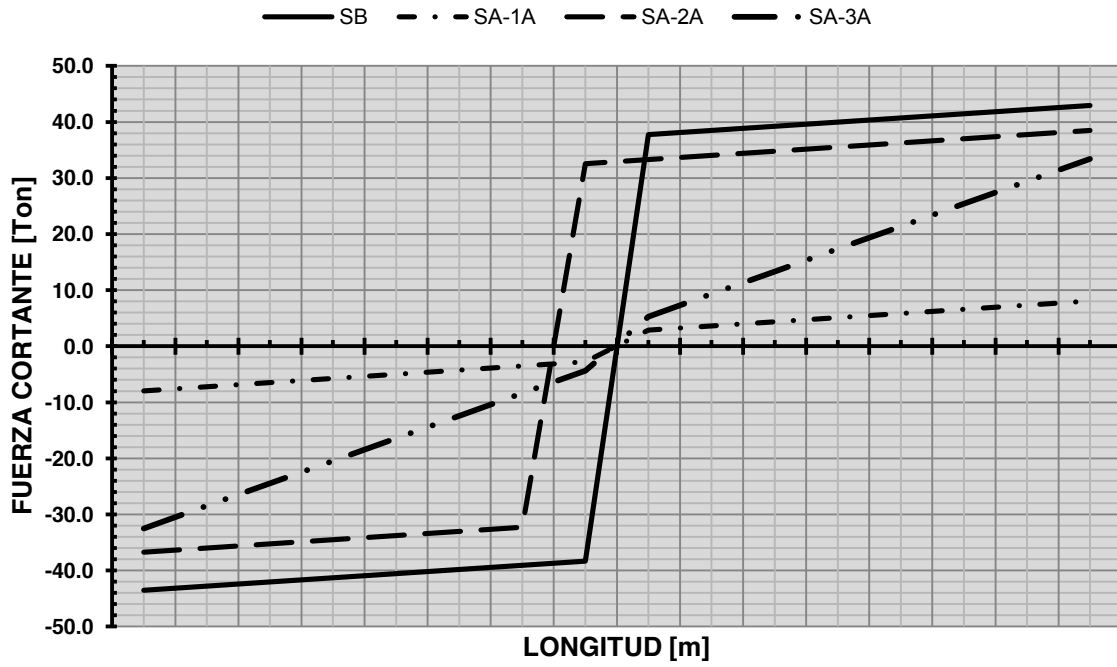


(b)

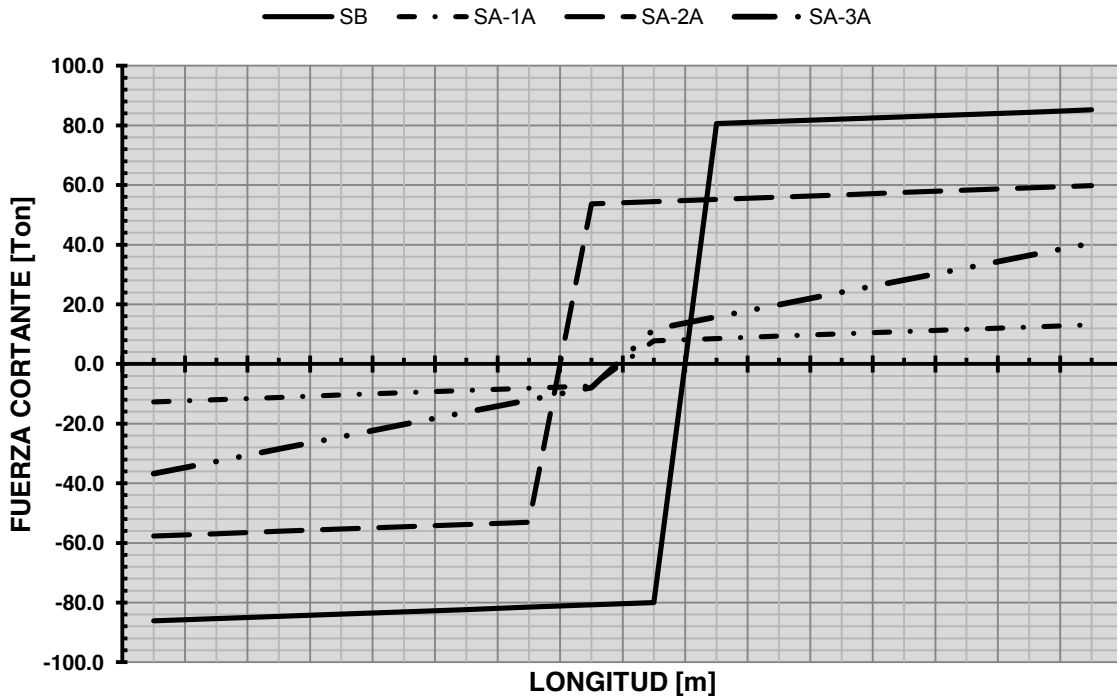


(c)

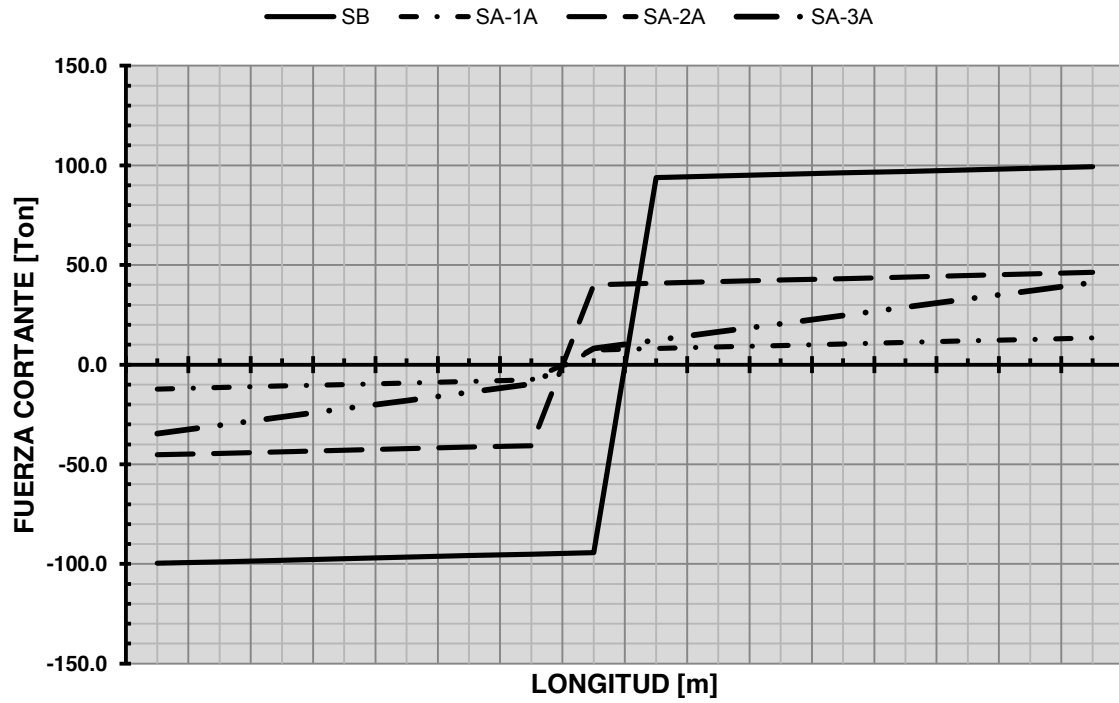
Figura 5.8: Diagramas de momento flexionante en travesaños; comparativa entre el Sistema Base (SB) y el Sistema Disipador (SD); (a) Nivel 1, (b) Nivel 2 y (c) Nivel 3



(a)

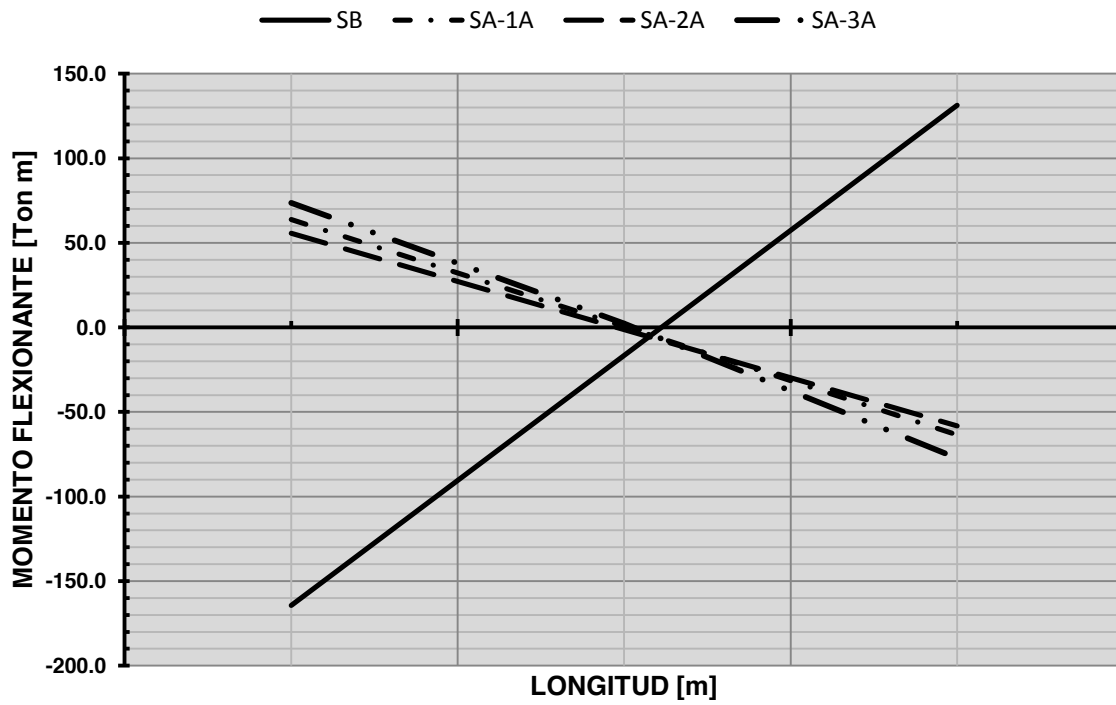


(b)

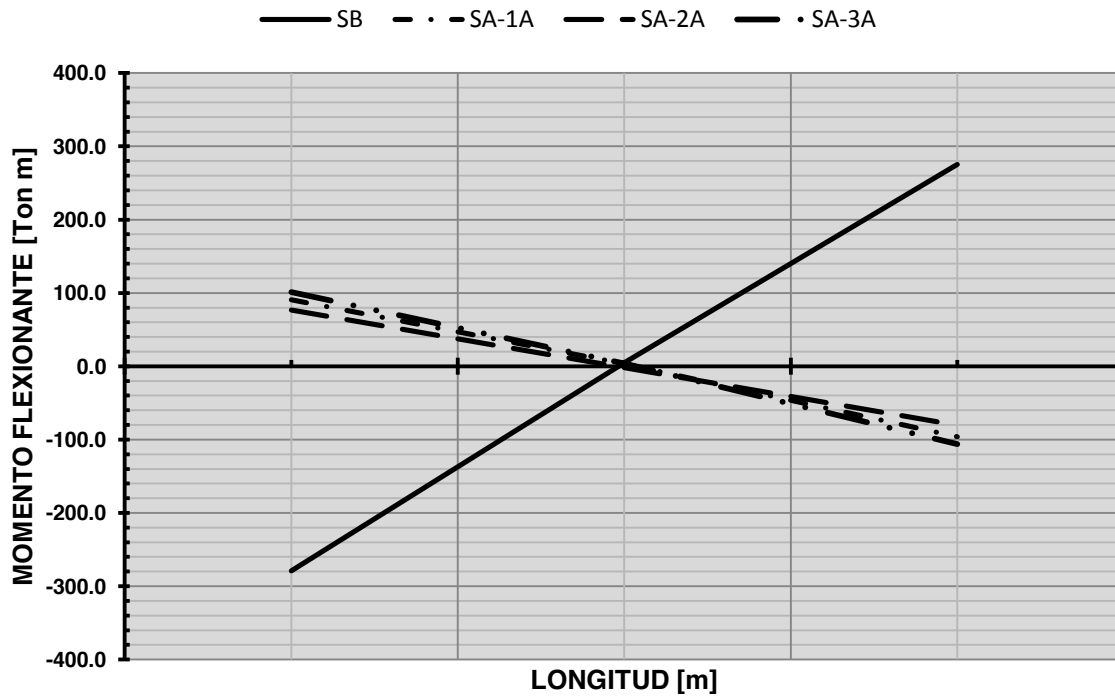


(c)

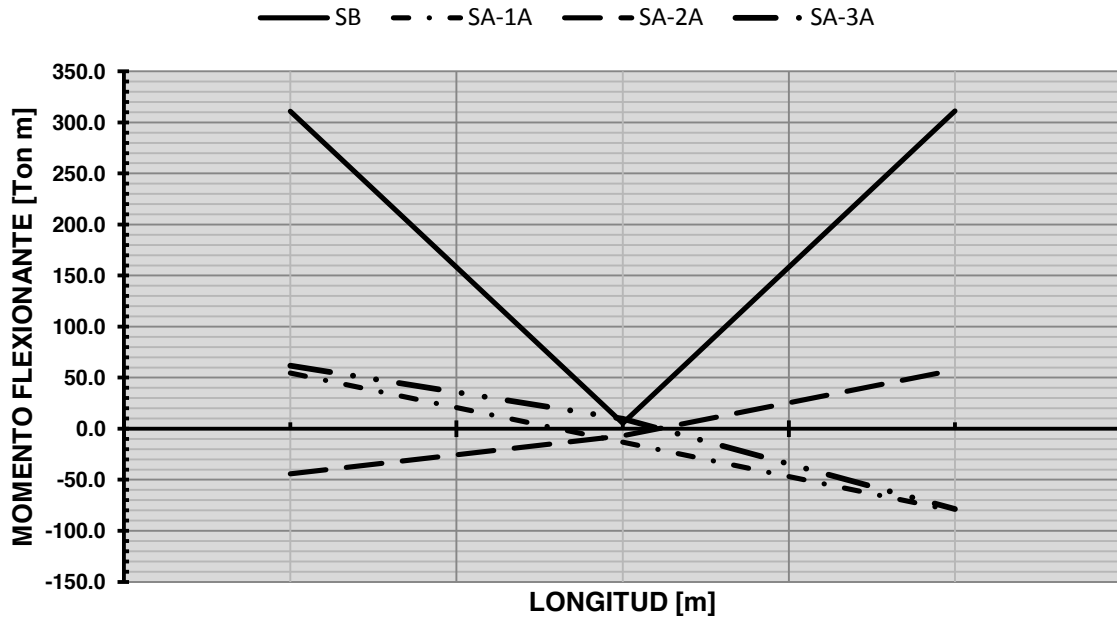
Figura 5.9: Diagramas de fuerza cortante en traveses; comparativa entre el Sistema Base (SB) y el Sistema Disipador (SD); (a) Nivel 1, (b) Nivel 2 y (c) Nivel 3



(a)

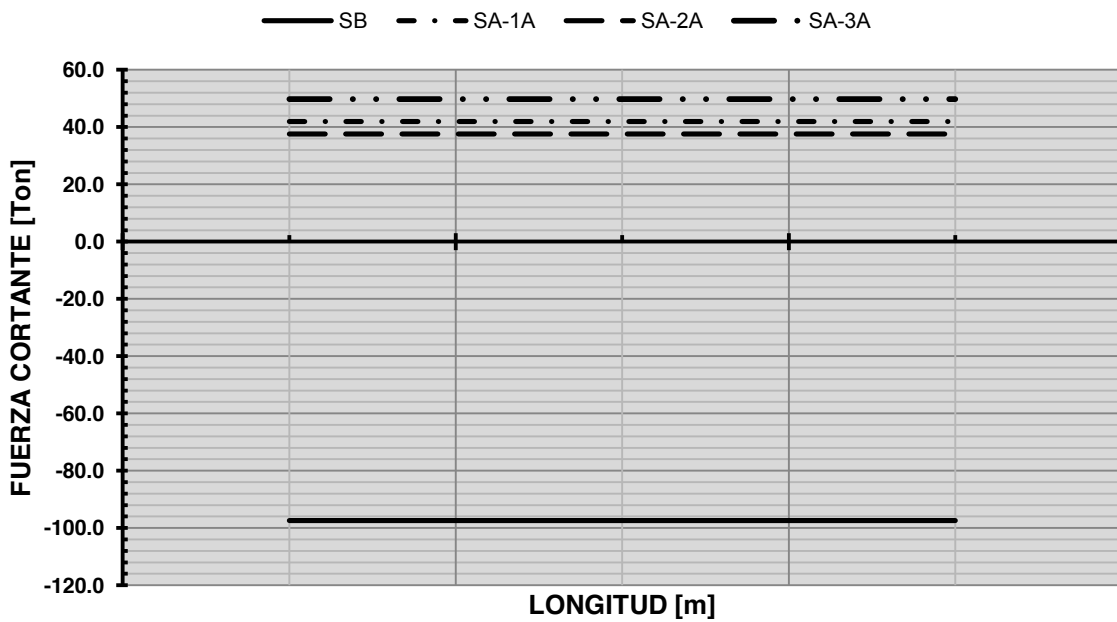


(b)

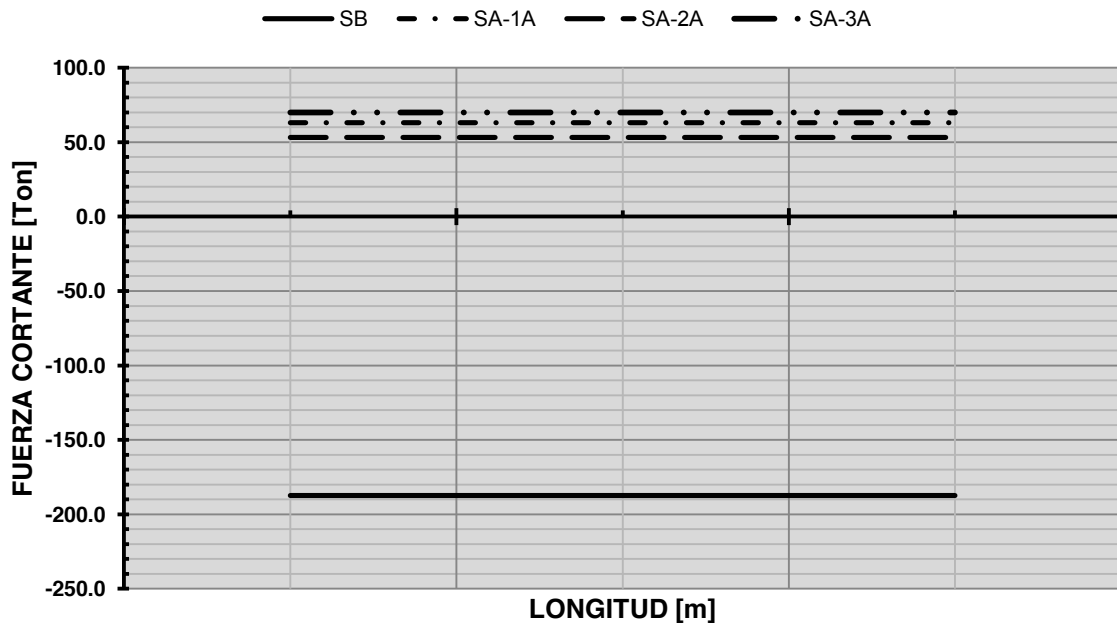


(c)

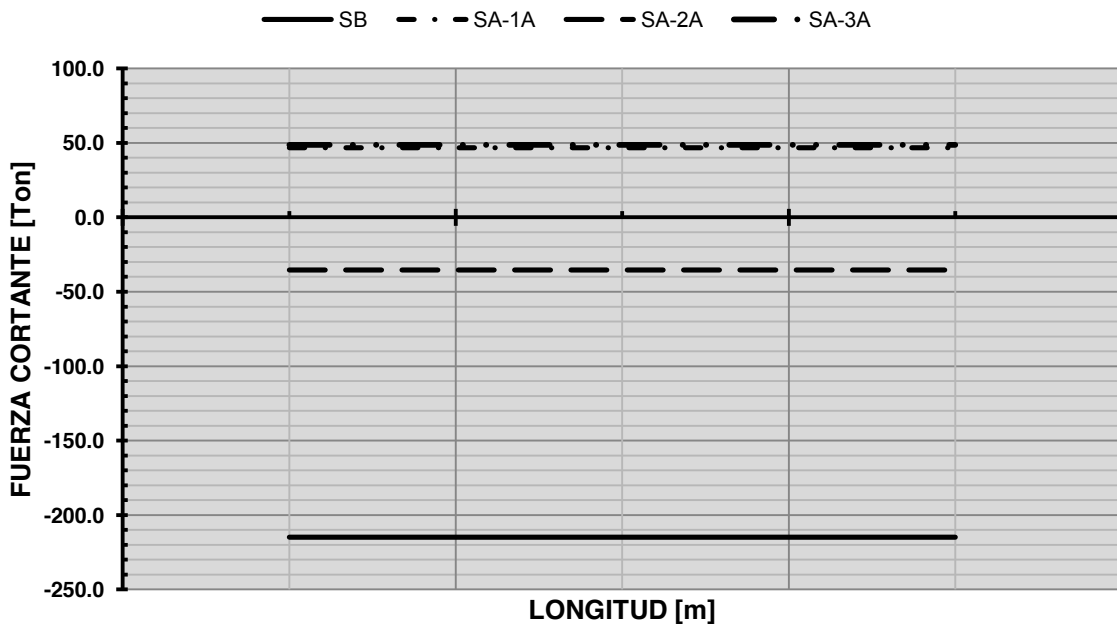
Figura 5.10: Diagramas de momento flexionante en columnas; comparativa entre el Sistema Base (SB) y el Sistema Disipador (SD); (a) Nivel 1, (b) Nivel 2 y (c) Nivel 3



(a)



(b)



(c)

Figura 5.11: Diagramas de fuerza cortante en columnas; comparativa entre el Sistema Base (SB) y el Sistema Disipador (SD); (a) Nivel 1, (b) Nivel 2 y (c) Nivel 3

En la figura 5.5, se presentan los resultados para las distintas configuraciones, 1, 2 y 3 amortiguadores. Puede apreciarse la reducción en los desplazamientos de entrepiso, llegando hasta una disminución del 58% en los mismos, así mismo, la velocidad también se reduce en rangos que van del 41% hasta 70%.

Con este análisis, es evidente que el uso de los amortiguadores ha mejorado la respuesta de la estructura, disminuyendo el periodo de vibración, los desplazamientos y la velocidad a la que se mueve el edificio.

Mediante una distribución apropiada de los amortiguadores, puede tenerse un control sobre los desplazamientos de entrepiso.

Se obtienen mejores resultados utilizando un mayor número de amortiguadores por entrepiso pero de menor fuerza de amortiguamiento, cabe resaltar que a mayor fuerza el costo se incrementa considerablemente.

CAPÍTULO 6: EJEMPLOS DE APLICACIÓN

6.1. IMPLEMENTACIONES ESTRUCTURALES

6.1.1. Torre Mayor – Ciudad de México



(Copyright © Arturo García)

Ubicado en el prestigioso corredor Reforma-Centro Histórico de la Ciudad de México, Torre Mayor es un rascacielos de 59 niveles de construcción, 4 sótanos, y un helipuerto que conforman 225 metros de altura de esta estructura construida en acero, granito, concreto y cristal.

Más allá de erigirse como el edificio de mayor altura en América Latina, se destaca por estar diseñado para cumplir y exceder los requisitos sísmicos más rigurosos del mundo, así como para soportar vientos superiores a los 250 [Km/hr].

El diseño sísmico propuesto que se utilizó en este proyecto ofrece un innovador concepto de absorción de energía sísmica para edificios altos. Para obtener una información realista con respecto a la sismicidad y la respuesta de la misma, se llevó a cabo un análisis de interacción con la estructura del suelo y un análisis del espectro específico del sitio.

Ubicado en el límite entre las zonas sísmicas II y III, siendo esta última -por definición del RCDF- la zona sísmica más fuerte. En caso de que se repitiera un terremoto como el ocurrido en 1985, el edificio solamente se movería como si estuviera siendo sujeto a vientos de 32 Kilómetros por hora.

El sistema estructural seleccionado está basado en un sistema redundante múltiple, el cual se lleva a cabo introduciendo el sistema dual, (sensible a deflexión) de resistencia lateral de fuerza convencional, en combinación con un sistema de amortiguamiento

suplementario (sensible a la velocidad). El resultado es un sistema trío que está previsto para responder a la energía sísmica en un terremoto.

El sistema trío está compuesto de una estructura primaria de contraventeo extraordinario en el perímetro de la Torre, en conjunto con un sistema tubular formado por una estructura perimetral y un tubo estructurado a través del núcleo del edificio. El contraventeo que conecta a las columnas mixtas del núcleo crea una espina estructural del núcleo principal del edificio. El marco del perímetro y el poderoso sistema super diagonal crea una estructura eficiente a partir de tubos, juntando la espina para resistir las fuerzas sísmicas.

Este sistema es mejorado por una serie de amortiguadores viscosos suplementarios situados en las direcciones norte-sur y este-oeste. En la orientación norte-sur se colocaron un total de 72 amortiguadores dentro del sistema de armaduras del núcleo principal. Un total de 24 amortiguadores fueron colocados como parte del sistema de contraventeo perimetral. En la orientación este-oeste los amortiguadores están colocados en el perímetro norte y sur de la Torre.

Los amortiguadores suplementarios reducen el balanceo de todos los niveles intermedios y de conjunto de la Torre, así como la vibración y las fuerzas sísmicas de los elementos estructurales. Reducen la respuesta del edificio a través de la absorción y disipación de una porción significativa de esta energía sísmica transmitida al edificio y consecuentemente reducen la demanda de ductibilidad de la estructura de acero. Los elementos del sistema de amortiguamiento viscoso proveen radios equivalentes de amortiguamiento del 8.5 % en el sentido norte-sur y un 12 % en el sentido este-oeste para los grados básicos de vibración, considerado como un porcentaje crítico de amortiguamiento.

La capacidad de rigidez y carga de las columnas de la Torre se incrementa mediante un recubrimiento de concreto reforzado hasta la mitad de la Torre donde las demandas de rigidez y esfuerzo son mayores. El recubrimiento de concreto en las columnas del núcleo se extiende cinco niveles arriba de las columnas perimetrales para no crear un repentino cambio en la rigidez de los niveles intermedios.

El contraventeo de la estructura responde a la configuración de las Super X en las fachadas este y oeste de la Torre, donde las fachadas son cubiertas en su totalidad. En la fachadas norte y sur dos juegos de Super X fueron colocados. Ningún contraventeo se colocó en las dos naves centrales excepto en tres puntos donde un juego de diagonales forman un diamante conectándose al sistema de Super X.

Los amortiguadores en la fachada norte-sur están ubicados en donde el contraventeo forma éste diamante. Esto, de hecho, mejora el desempeño del sistema de amortiguamiento a través de la creación de una liga amortiguada entre los sistemas Super X. Fue necesaria una sintonización refinada adicional al elemento de liga secundario para enfatizar el concepto básico del elemento ligado amortiguado.

6.1.2. The Pacific Northwest Baseball Stadium – Seattle, Washington



(Copyright © 2012 Taylor Devices All Rights Reserved)

Este parque de béisbol de ligas mayores abrió sus puertas durante la temporada de 1999, y se caracteriza por su techo retráctil de tres secciones construido de armaduras de acero.

Extendido completamente, el techo mide 192 [m] x 200 [m] y 64 [m] de alto y pesa 10,000 toneladas.

Entre los riesgos potenciales al techo está la Zona Sísmica 4 de E.E.U.U. de temblores transitorios y fuertes vientos. Se seleccionó amortiguamiento viscoso agregado en la primera etapa del proceso de diseño para reducir las cargas sísmicas laterales y de viento al techo. Las cargas reducidas por las estructuras amortiguadas, según se reporta, proporcionaron un ahorro neto de \$4.2 millones de dólares en el proyecto.

Se agregaron amortiguadores extras entre las secciones del techo para eliminar el potencial por el daño del golpeteo longitudinal. La siguiente aplicación demostró ser ordinaria, usando amortiguadores prácticamente comunes dentro del rango de fuerza de 90-180. Fue mucho más difícil usar los amortiguadores en la dirección lateral, ya que el único punto de montaje disponible era usar amortiguadores grandes en los tirantes diagonales entre la columna y las armaduras del techo.

Los amortiguadores se colocaron relativamente cerca de la intersección de esos dos elementos estructurales; las regiones de montaje disponibles, dictaminaron que sólo podían usarse un total de ocho amortiguadores.



(Copyright © 2012 Taylor Devices All Rights Reserved)



(Copyright © 2012 Taylor Devices All Rights Reserved)

*Amortiguadores del The Pacific Northwest
 Baseball Stadium*

Estos ocho amortiguadores tuvieron que reducir el esfuerzo y la desviación en el techo de 10,000 toneladas, cada amortiguador debía tener la capacidad de 500 toneladas de rendimiento sobre condiciones de temblores máximas creíbles, con más o menos 375 [mm] de desviación. El diseño fue complicado aún más debido a la longitud necesaria para los amortiguadores, de 7 [m] de perno a perno; además de la restricción del arquitecto que no permitiría una junta de brida convencional entre el amortiguador y la extensión.

El diseño del amortiguador tuvo más restricciones por parte del arquitecto, quién solicitó que no hubiera una diferencia en el diámetro mayor del 25% en ningún punto por todo lo largo del mecanismo. Se impuso una tercera restricción en este diseño; la fauna local; concretamente gaviotas y otros pájaros, quienes estarían esperando habitar la estructura de la armadura del techo. Se sabe que las gaviotas tienen la capacidad de ingerir prácticamente cualquier cosa que parezca comida, y han evolucionado un poderoso sistema digestivo. Se ha comprobado con experimentos, que el excremento de gaviota puede carcomer o remover la mayoría de las pinturas, e incluso puede corroer el acero cromado. El problema radicaba en el hecho de que las gaviotas encontraran atractivas las superficies brillosas, lo cual es especialmente cierto cuando hablamos del excelente terminado de los vástagos del pistón. Para solucionar el problema, se utilizaron cubiertas de acero por encima de los vástagos del pistón inoxidables para los grandes amortiguadores de este proyecto. Las cubiertas de los pistones se combinaron con un cilindro forjado de acero inoxidable el cual fue "pasivado" después de maquinarse y pasar por un tratamiento térmico.

La pasivación es un proceso químico que remueve cualquier átomo de hierro libre de la superficie del acero, haciendo que el acero sea mucho más resistente a la corrosión, que el simple acero inoxidable. La pasivación también "rebaja" mucho del brillo, reflectante natural de las superficies de acero inoxidable, dejando así un terminado pálido, que con algo de suerte, probaría no ser atractivo para los pájaros.

6.1.3. Los Ángeles City Hall – L.A., California



(Copyright © 2012 Taylor Devices All Rights Reserved)

Localizado en una alta zona sísmica al este de Los Ángeles, California. Este gran edificio de oficinas del gobierno de 32 pisos, fue construido en 1926, y hoy en día sigue siendo el foco central del centro de Los Ángeles, California.

El tipo de construcción utilizado en el edificio fue considerado como el método más avanzado de protección sísmica en el año 1920: Una estructura de acero con enormes muros de concreto reforzado. Fue la primera estructura en exceder la limitación de código de altura de 46 [m] en la Ciudad de Los Ángeles.

Hasta finales del año 1950, era el edificio más alto en Los Ángeles. La estructura mide 144 [m] de largo, 82 [m] de ancho, y se eleva a una altura de 140 [m]. El área total del piso es de 85,000 metros cuadrados.

Desde que se construyó el edificio, el área de Los Ángeles ha vivido numerosos terremotos, muchos de los cuales causaron grandes daños a la estructura. Después de los principales terremotos en 1971, 1987 y 1994, se notaron grandes daños en los pisos más altos, ocasionaron enormes grietas en el relleno de la mampostería y en las paredes de concreto. Después del terremoto de Northridge en 1994, se tomó la decisión de renovar las instalaciones para soportar condiciones sísmicas, utilizando aislamiento de base.



(Copyright © 2012 Taylor Devices All Rights Reserved)

La renovación sísmica necesitó un total de 416 soportes de goma de aislamiento básico. Debido a la gran velocidad de la sacudida del terremoto de Northridge, la máxima velocidad de traslación del diseño, para el sistema de aislamiento, era muy alta; ésta se fijó a 2 metros por segundo.

Se instalaron un total de 52 amortiguadores de fluido junto con soportes de aislamiento para disipar la energía sísmica y reducir el requerido desplazamiento de soporte.

Instalación de los amortiguadores junto al sistema de aislación de base

Cada amortiguador produce una fuerza de rendimiento de 180 toneladas, y tiene un desplazamiento disponible de más o menos 0.65 [m]. Se seleccionó el amortiguamiento de bajo exponente en el rango V^5 para los amortiguadores de aislamiento de base. Estos amortiguadores también sirvieron para reducir la amplificación de cargas sísmicas en la estructura de la torre.

Para poder reducir las cargas de la torre incluso más allá de los pisos 24 al 32, se instalaron, en los elementos de anclaje de galón, 14 amortiguadores viscosos extras de 135 toneladas de fuerza y más o menos 115 [mm] de *stoke*. Estos amortiguadores están instalados en el 27° piso. El Ayuntamiento de Los Ángeles abrió nuevamente sus puertas en el 2001, después de completarse la renovación sísmica.

6.1.1. The San Francisco Civic Center Office Building – S.F. , California

Aquellos que están familiarizados con los diseños sísmicos en San Francisco, estarán de acuerdo que esta histórica ciudad es literalmente "el hogar del marco de acero reforzado con resistencia sísmica." El temblor de 1994 en Northridge, California, reveló problemas con los pórticos de momento de acero, normalmente se podría pensar en el deseo de convertir los marcos reforzados, en unos más fuertes. Podríamos entonces imaginar la sorpresa dentro de la comunidad de ingeniería estructural durante el año 1996, cuando comenzó a erguirse el edificio de 14 pisos de las Oficinas Municipales de San Francisco.



(Copyright © 2012 Taylor Devices All Rights Reserved)

Esta estructura de 75,000 metros cuadrados combinó 292 amortiguadores de fluido con el tan nombrado pórtico de momento "post-Northridge", para optimizar el comportamiento, al mismo tiempo de mantener rentable el presupuesto del proyecto. El ingeniero utilizó dos diferentes niveles de fuerza de amortiguador, de 100 y 55 toneladas. Todos los amortiguadores tenían más o menos 100 [mm] de carrera.

Ubicación de los amortiguadores.

Los amortiguadores se usaron en elementos de tirantes de extensión, con una junta de brida atornillada, para así añadir amortiguadores a las extensiones de sus tirantes. El extremo del vástago del pistón del amortiguador, incorporaba una abrazadera con un porte esférico, así como también el extremo opuesto de las extensiones de los tirantes.

A los amortiguadores se les suministraron abrazaderas con anclajes de construcción, que consistían en simples placas tangentes que fueron atornilladas de una chapa de unión en la viga del edificio, a las juntas de la columna. Se seleccionó el amortiguamiento de bajo exponente en el rango V^4 , en combinación con un marco de construcción que puede proporcionar deformación inelástica de gran alcance. El uso de amortiguamiento de bajo exponente tendió a limitar las fuerzas del amortiguador cuando el marco era cargado dentro del rango inelástico.



(Copyright © 2012 Taylor Devices All Rights Reserved)

Montaje del amortiguador

CAPÍTULO 7: COMENTARIOS Y CONCLUSIONES

7.1. COMENTARIOS Y CONCLUSIONES

- Los códigos sísmicos establecen requisitos mínimos para proteger la vida de los ocupantes, requisitos que muchas veces no son suficientes para garantizar el funcionamiento de las estructuras después del sismo. Cuando se diseña de acuerdo con una buena normativa sismorresistente, donde la construcción es sometida a una supervisión estricta y donde el sismo de diseño es representativo de la amenaza sísmica real de la zona, el daño sobre la estructura es marginal en comparación con el observado en sitios donde no se han dado estas circunstancias.
- El diseño de estructuras sismorresistentes, implica la creación de sistemas estructurales que tengan una combinación óptima de propiedades que les permitan soportar las acciones a las que están sometidas. Estas propiedades son: Resistencia, Rigidez y Ductilidad.
- Pocos edificios se diseñan para resistir sismos severos en el rango elástico, por lo cual es necesario proporcionarle a la estructura capacidad de disipación de energía en los lugares en que se espera que la resistencia elástica puede ser excedida.
- La energía que es creada en un sismo, entra al edificio y este la disipa de 4 formas diferentes:
 - Energía de Deformación Elástica
 - Energía de Movimiento, o de Energía Cinética
 - Energía de Amortiguamiento
 - Energía por comportamiento Inelástico (comportamiento no lineal o de ductilidad)
- La influencia del amortiguamiento en la frecuencia de vibración es pequeña, siendo su efecto más importante disminuir la amplitud de dicha vibración conforme avanza el tiempo.

- La cantidad de energía estructuralmente almacenada (E_s) ha de ser lo más baja posible para evitar daños. Por lo tanto el valor de la energía disipada (E_d) debe ser grande. La parte de energía E_h que compone la energía disipada E_d , debido a la deformación plástica de la estructura tiene que ser mantenida baja, ya que esta forma de disipación de energía causa fatiga estructural y grietas.
- Los sistemas de protección sísmica aseguran completo servicio después que un terremoto y daños a la estructura han sido evitados. Por lo tanto la estructura está nuevamente lista para un nuevo servicio contra posibles nuevos movimientos, ya que no son necesarios trabajos de reacondicionamiento, lo que lo hace al sistema de protección sísmica, la opción más económica.
- Los amortiguadores viscosos pueden diseñarse en edificios nuevos y estructuras existentes, pues son relativamente pequeños y discretos, pueden ser incorporados en una estructura sin el compromiso de su aspecto. Esto es especialmente útil en la restauración de edificios históricamente significativos. Pueden también ser agregados sin la modificación estructural significativa en la mayoría de los casos. Los amortiguadores pueden instalarse como miembros diagonales de varias maneras.
- Bajo condición de servicio los dispositivos no están pretensionados y el fluido no está bajo presión significativa.
- La fuerza máxima de respuesta es bien definida por un cierto límite. No ocurren daños estructurales en caso que el terremoto sea mayor de lo esperado y el ingeniero de diseño puede fácilmente calcular la fuerza de respuesta constante máxima, independientemente de la velocidad, pero aún con la seguridad de lograr los máximos factores de seguridad estructural posible.
- Extremadamente eficiente
- La máxima fuerza de respuesta es dada por el amortiguador dentro de décimas de segundos, minimizando los desplazamientos estructurales.
- La compensación automática de volumen del fluido debido a cambios de temperatura es alcanzada sin incrementos de presión dentro de los dispositivos.
- No son necesarios trabajos de mantenimiento
- Los dispositivos no son proclives a pérdidas de fluido ya que usan anillos selladores.

- En la figura 5.5, se presenta la respuesta para las distintas configuraciones, 1, 2 y 3 amortiguadores. Puede apreciarse la reducción en los desplazamientos, llegando hasta una disminución del 58% en los mismos, así mismo, la velocidad también se reduce en rangos que van del 41% hasta 70%.
- Con este análisis, es evidente que el uso de los amortiguadores ha mejorado la respuesta de la estructura, disminuyendo el periodo de vibración, los desplazamientos y la velocidad a la que se mueve el edificio.
- La figura 5.6 a, b y c muestra el desplazamiento del sistema base SB durante el periodo del sismo. En la misma figura, se muestran las tres diferentes configuraciones del sistema disipador y su desplazamiento.
- Es considerable la reducción en los desplazamientos de las tres distintas configuraciones
- Mediante una distribución apropiada de los amortiguadores, puede tenerse un control sobre los desplazamientos de entrepiso.
- Se obtienen mejores resultados utilizando un mayor número de amortiguadores por entrepiso pero de menor fuerza de amortiguamiento, cabe resaltar que a mayor fuerza el costo se incrementa considerablemente.

8. REFERENCIAS

8.1. BIBLIOGRAFICAS

- ANÁLISIS SÍSMICO MODERNO – ÉTICA APLICADA
Gómez Chávez, Salvador Ismael
Editorial Trillas, S.A. de C.V.
México, 2007
- DISEÑO SISMORRESISTENTE DE EDIFICIOS.
Bozzo, Luis M. y Barbat, Alex H.
Editorial Reverté, S.A.
España, 2004
- FUNDAMENTOS DE INGENIERÍA SÍSMICA
Rosenblueth, E. y Newmark, N. M.
Editorial Diana, S.A.
México, 1978
- HISTORY, DESIGN, AND APPLICATIONS OF FLUID DAMPERS IN
STRUCTURAL ENGINEERING
P. Taylor, Douglas
Taylor Devices, Inc.
- IN-STRUCTURE DAMPING AND ENERGY DISSIPATION – DESIGN
GUIDELINES
Trevor E. Kelly, S.E.
Holmes Consulting Group
July 2001

- METODOLOGÍA DE PROYECTO SISMORRESISTENTE DE EDIFICIOS BASADA EN EL BALANCE ENERGÉTICO.
Akiyama, Hiroshi
Editorial Reverté, S.A.
España, 2003
- SISTEMAS DE CONTROL DE VIBRACIONES EN ESTRUCTURAS DE GRAN ALTURA.
Montanaro, María Inés
Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de la Provincia de Buenos Aires,
Argentina
- TAYLOR DEVICES, INC.
www.taylordevices.com

9. APÉNDICE:

9.1. APÉNDICE A: Aplicaciones estructurales de los amortiguadores de fluido viscoso en el mundo

Extracto tomado del registro “*Structural Applications of Fluid Viscous Damper - Taylor Devices Inc.*”

RESUMEN	
<i>Periodo</i>	1984 – 2012
<i>No.Total de Estructuras</i>	406
<i>Edificios</i>	273
<i>Puentes</i>	117
<i>Otros</i>	16
<i>No.Total de Amortiguadores</i>	14,200
<i>Edificios en México</i>	5 (2002 – 2012)

Name and Type of Structure	Country/City	Type and Number of Dampers	Date	Load	Additional Information
Patio Mayor Project #945	Chile	Taylor Viscous Dampers Total: 36 550 kN ± 75mm stroke	2012	Seismic	
BC Place Stadium	CANADA, Vancouver, BC	Taylor Viscous Dampers Total: 96 2000 kN ± 60mm stroke 1500 kN ± 50mm stroke	2011	Seismic	Retrofit of football stadium for seismic protection and to act as an emergency shelter for Vancouver, BC.
Beijing Fuchengmen Bridge	CHINA, Beijing	Taylor Viscous Dampers Total: 20 500 kN Fluid ± 75mm stroke	2011	Seismic	Retrofit of elevated highway bridge uses dampers to control vibration due to vehicle and earthquake.
Cal Memorial Stadium	USA, Berkeley, CA	Taylor Viscous Dampers Total: 16 2000 kN Fluid ± 125mm stroke	2011	Seismic	
DAK Americas Silo #2	USA, Leland, NC	Taylor Dampers Total: 20 490 kN ± 100mm stroke	2011	Seismic	
DEH Cho Bridge	CANADA, Northwest Territories	Taylor Lock up Devices Total: 40 739 kN ± 270mm stroke	2011	Seismic	This cable-stayed, new bridge will span the Mackenzie River near Fort Providence & is intended to replace the operations of the Merv Hardie Ferry & the Mackenzie Ice Crossing, available to link for all seasons.
Farglory H68 Project	TAIWAN, Taipei	Taylor Viscous Dampers Total: 48 50 MT DAMPER ± 75mm stroke	2011	Seismic	New RC residential project uses dampers to dissipate earthquake energy.
Farglory H72 Project	TAIWAN, Taipei	Taylor Viscous Dampers Total: 65 600 kN ± 75mm stroke	2011	Seismic	New SRC residential project uses dampers to dissipate earthquake energy.

(Copyright © 2012 Taylor Devices All Rights Reserved)

Xinjiang Guozili Bridge	China/Xinjiang	Taylor Fluid Dampers Total: 8 1100 kN ± 400mm stroke 1200 kN ± 500mm stroke	2009	Seismic	Cable-stayed bridge uses dampers between bridge deck and piers to control movements caused by earthquakes.
Nihonbashi Nomura Project	Japan/Tokyo	Taylor Fluid Dampers Total: 52 1100 kN ± 50mm stroke 1500 kN ± 50mm stroke 2000 kN ± 50mm stroke	2009	Seismic	New construction, 21-story steel frame office/commerce facility/parking uses dampers to dissipate earthquake energy.
Hydra Waves	Mexico/Mazatlan	Taylor Fluid Dampers Total: 18 680 kN ± 50mm stroke	2009	Seismic	New structure use dampers to absorb earthquake energy and reduce deflection and stress.
Tauranga Harbour Link Bridge	New Zealand/Tauranga	Taylor Fluid Dampers Total: 21 980 kN ± 175mm stroke 1470 kN ± 175mm stroke 1750 kN ± 225mm stroke	2009	Seismic	New four lane highway bridge use Lock-Up Devices with force limiting devices to control bridge deck movement during seismic events.
ASE I – Mihai Eminescu Project	Romania/Bucharest	Taylor Fluid Dampers Total: 142 1000 kN ± 100mm stroke 100 kN ± 100mm stroke	2009	Seismic	Retrofit of a historic building with dampers in diagonal braces to provide seismic energy dissipation.
TSMC Fab #12 P5	Taiwan/Hsin Chu City	Taylor Fluid Dampers Total: 6 2000 kN ± 75mm stroke	2009	Seismic	Retrofit of a semiconductor processing plant uses dampers to dissipate seismic energy and micro-vibrations.
Uni-President B8 Project	Taiwan/Taipei	Taylor Fluid Dampers Total: 336 600 kN ± 75mm stroke	2009	Seismic	Known as Taipei Hsin-Yi Project, this new 22-story reinforced concrete building uses dampers in chevron braces to dissipate seismic energy.
FDS Project	Taiwan/Taipei	Taylor Fluid Dampers Total: 6 500 kN ± 75mm stroke	2009	Seismic	Dampers installed in RC supporting wall in a new reinforced concrete building.
Farglory H61 Project	Taiwan/Taipei	Taylor Fluid Dampers Total: 12 500 kN ± 75mm stroke	2009	Seismic	Dampers installed in RC supporting wall in a new reinforced concrete building.
Farglory H63 Project	Taiwan/Taipei	Taylor Fluid Dampers Total: 52 500kN ± 75mm stroke	2009	Seismic	Dampers used in chevron bracing elements in a new 15-story reinforced concrete building.
Farglory H65 Project	Taiwan/Taipei	Taylor Fluid Dampers Total: 46 500kN ± 75mm stroke	2009	Seismic	Dampers used in chevron bracing elements in a new 14-story reinforced concrete building.
Farglory H69	Taiwan/Taipei	Taylor Fluid Dampers Total: 54 500 kN ± 75mm stroke	2009	Seismic	Dampers installed in RC supporting wall in a new 14-story reinforced concrete building.
Farglory H70 Project	Taiwan/Taipei	Taylor Fluid Dampers Total: 20 500 kN ± 75mm stroke	2009	Seismic	New 13-story steel reinforced concrete residential building use dampers in chevron braces to dissipate seismic energy.
Kyung Ho 2nd Bridge	Korea/Sancheong	Taylor Fluid Dampers Total: 4 750 kN ± 250mm stroke	2008	Seismic	Seismic retrofit of a 340 meter multi-span PSC Box bridge with dampers for the Korea Expressway Corporation.
Kyung Ho 6th Bridge	Korea/Sancheong	Taylor Fluid Dampers Total: 8 1500 kN ± 200mm stroke	2008	Seismic	Seismic retrofit of a 630 meter multi-span PSC Box bridge with dampers for the Korea Expressway Corporation.
Hang Jyung Bridge	Korea/Suncheon	Taylor Fluid Dampers Total: 10 1500 kN ± 250mm stroke	2008	Seismic	Seismic retrofit of a 630 meter multi-span PSC Box bridge with dampers for the Korea Expressway Corporation.
Marena Project	Mexico/Acapulco	Taylor Fluid Dampers Total: 52 600 kN ± 50mm stroke 570 kN ± 50mm stroke	2008	Seismic	New resort/hotel/condominium complex uses dampers to dissipate seismic energy.
Academy for Economical Studies II Project	Romania/Bucharest	Taylor Fluid Dampers Total: 18 1500 kN ± 500mm stroke	2008	Seismic	Retrofit of a building with 80 isolation bearings and 18 dampers.
Academy for Economical Studies - Sports Complex	Romania/Bucharest	Taylor Fluid Dampers Total: 6 300 kN ± 75mm stroke	2008	Seismic	Retrofit of a building with dampers located at the roof to dissipate earthquake energy.
TSMC Fab #12 P4	Taiwan/Hsin Chu City	Taylor Fluid Dampers Total: 18 2000 kN ± 75mm stroke	2008	Seismic	Retrofit of a semiconductor processing plant uses dampers to dissipate seismic energy and micro-vibrations.
Criminal Investigation Bureau Taichung	Taiwan/Taichung	Taylor Fluid Dampers Total: 4 392 kN ± 50mm stroke 784 kN ± 75mm stroke	2008	Seismic	15-story steel braced frame building uses a combination of BRBs and dampers in diagonal braces for seismic energy dissipation.
Hung-Feng Nei-Hu Residence	Taiwan/Taipei	Taylor Fluid Dampers Total: 12 500 kN ± 75mm stroke	2008	Seismic	New 5-story residential building uses dampers in reinforced concrete supporting walls to dissipate seismic energy.
Fu-Shi Tu-Cheng Project	Taiwan/Taipei	Taylor Fluid Dampers Total: 24 500 kN ± 75mm stroke	2008	Seismic	New 12-story residential building uses dampers in reinforced concrete supporting walls to dissipate seismic energy.
Ya-Ting Chung-Ho Project	Taiwan/Taipei	Taylor Fluid Dampers Total: 16 500 kN ± 75mm stroke	2008	Seismic	New 14-story residential building uses dampers in reinforced concrete supporting walls to dissipate seismic energy.
Mei-Feng Residential Building	Taiwan/Taipei	Taylor Fluid Dampers Total: 32 1000 kN ± 60mm stroke	2008	Seismic	New 16-story steel residential building uses dampers in double A-shape frames to dissipate seismic energy.
Farglory Fortuna H62	Taiwan/Taipei	Taylor Fluid Dampers Total: 80 500 kN ± 75mm stroke	2008	Seismic	Two new 16-story steel reinforced concrete residential building use dampers in double A-shape frames to dissipate seismic energy.
Farglory Twin-Towers H40	Taiwan/Taipei	Taylor Fluid Dampers Total: 162 500 kN ± 60mm stroke 800 kN ± 75mm stroke	2008	Seismic	Two new 25-story steel reinforced concrete residential building use dampers in double A-shape frames to dissipate seismic energy.

(Copyright © 2012 Taylor Devices All Rights Reserved)

Hung Poo Construction/ KIMZO New Trump	Taiwan/Taipei	Taylor Fluid Dampers Total: 24 1000 kN ± 100mm stroke	2008	Seismic	New 19-story residential building uses dampers in reinforced concrete supporting walls to dissipate seismic energy.
Kindom Kui-Lin Project	Taiwan/Taipei	Taylor Fluid Dampers Total: 24 1000 kN ± 100mm stroke	2008	Seismic	New 19-story steel reinforced concrete residential building with dampers to dissipation seismic energy.
Uni-President Taipei Transfer Post (A3)	Taiwan/Taipei	Taylor Fluid Dampers Total: 124 600 kN ± 75mm stroke 600 kN ± 100mm stroke	2008	Seismic	New 31-story steel structure with dampers to improve structural performances. Dampers are installed in diagonal braces and A-shape supporting frames.
Kelti Hsin-Yi Building	Taiwan/Taipei	Taylor Fluid Dampers Total: 80 1400 kN ± 100mm stroke 1500 kN ± 100mm stroke	2008	Seismic	New 14-story steel office building in Taipei Project. Viscous dampers are used for energy dissipation. Dampers are installed in diagonal braces.
Chiyoda Project	Taiwan/Taipei	Taylor Fluid Dampers Total: 16 980 kN ± 60mm stroke	2008	Seismic	16-story reinforced concrete moment frame building uses dampers in double A-shape frames to dissipate seismic energy.
Twin Oak Garden Project	Taiwan/Taipei	Taylor Fluid Dampers Total: 32 980 kN ± 60mm stroke	2008	Seismic	16-story reinforced concrete moment frame building uses dampers in double A-shape frames to dissipate seismic energy.
Far Glory Twin Towers	Taiwan/Taipei	Taylor Fluid Dampers Total: 162 490 kN ± 60mm stroke 785 kN ± 75mm stroke	2008	Seismic	Two 24-story residential buildings use dampers in double A-shape frames to dissipate seismic energy.
Mei-Feng Residential Building	Taiwan/Taipei	Taylor Fluid Dampers Total: 32 980 kN ± 60mm stroke	2008	Seismic	19-story residential building uses dampers in A-shape frames to dissipate seismic energy.
Mills Peninsula Hospital	USA/Burlingame, CA	Taylor Fluid Dampers Total: 32 1225 kN ± 762mm stroke	2007-2008	Seismic	450,000 square foot replacement hospital for Peninsula Medical Center with 243 beds. Dampers used with base isolation system.
Cumberland River Pedestrian Bridge	USA/Nashville, TN	Taylor Fluid Dampers Total: 5 TMD Systems	2007	Pedestrian	Five TMD Systems used to control lateral and vertical vibrations caused by pedestrian traffic.
KDDI Tama Fourth Network Center 1st Station	Japan/Tokyo	Taylor Fluid Dampers Total: 28 1450 kN ± 610mm stroke	2007	Seismic	6-story, 24,000 square meter telephone network center is base isolated with dampers to reduce seismic movement and provide energy dissipation.
Tres Mares Residences	Mexico/Puerto Vallarta	Taylor Fluid Dampers Total: 30 900 kN ± 100mm stroke 1450 kN ± 100mm stroke	2007	Seismic	27-story, 40,200 square meter condominium building with concrete columns and steel beams. Dampers used in diagonal braces for seismic energy dissipation.
TSMC Fab #14	Taiwan/Taipei	Taylor Fluid Dampers Total: 20 2000 kN ± 75mm stroke	2007	Seismic	Retrofit of a semiconductor processing plant uses damper to dissipate seismic energy and micro-vibrations.
Pont de Vatine Bridge	France/Le Havre	Taylor Fluid Dampers Total: 6 67 kN ± 102mm stroke 67 kN ± 152mm stroke 50 kN ± 152mm stroke	2005	Kinetic Energy	New movable pedestrian bridge uses a combination of lift, oscillation and rotational energy absorbers.
Shinjuku 3-Chome East Building	Japan/Tokyo-Shinjyuku	Taylor Fluid Dampers Total: 2 2452 kN ± 150mm stroke	2005	Seismic	New 14-story 26,400 square meter entertainment complex uses dampers to dissipate seismic energy.
Daebuk Gyo Bridge	South Korea/Wulsan City	Taylor Fluid Dampers Total: 4 868 kN ± 100mm stroke	2005	Seismic	Seismic retrofit of a three span steel girder highway bridge.
Alameda	Mexico/Mexico City	Taylor Fluid Dampers Total: 34 645 kN ± 75mm stroke	2005	Seismic	Conversion of a 1950's vintage parking garage to small apartments. Dampers used in diagonal bracing elements to dissipate seismic energy.
Fubon/China Insurance Building	Taiwan/Taipei	Taylor Fluid Dampers Total: 124 490 kN ± 75mm stroke 785 kN ± 75mm stroke 1079 kN ± 75mm stroke 1275 kN ± 75mm stroke 1471 kN ± 75mm stroke	2005	Seismic	New 16-story residential building uses dampers in diagonal braces to dissipate seismic energy.
Kindom 101 Leadership	Taiwan/Taipei	Taylor Fluid Dampers Total: 23 980 kN ± 50mm stroke	2005	Seismic	New 18-story 13,000 square meter residential building uses dampers in diagonal bracing elements.
National Palace Museum	Taiwan/Taipei	Taylor Fluid Dampers Total: 172 500 kN ± 75mm stroke 1000 kN ± 75mm stroke	2005	Seismic	Retrofit of a well-known museum. Dampers used to dissipate seismic energy in this seven building complex.
Shin Keio Plaza	Taiwan/Taipei	Taylor Fluid Dampers Total: 24 980 kN ± 152mm stroke	2005	Seismic	New 22-story SRC residential building uses dampers in A-shape supporting frame for earthquake energy dissipation.
Touch the Heart of Hawaii	Taiwan/Taipei	Taylor Fluid Dampers Total: 30 980 kN ± 50mm stroke 1225 kN ± 75mm stroke	2005	Seismic	New 35,000 square meter 14-story reinforced concrete residential building uses a combination of dampers in diagonal and chevron braces.
Nordstrom South Coast Plaza	USA/Costa Mesa, CA	Taylor Fluid Dampers Total: 40 667 kN ± 100mm stroke 890 kN ± 100mm stroke	2004	Seismic	Retrofit of 23,000 square meter, 4-story steel moment frame retail building. Dampers used in chevron braces to dissipate seismic energy.
Monroe Middle School	USA/Campbell, CA	Taylor Fluid Dampers Total: 8 107 kN ± 75mm stroke	2004	Seismic	New school athletic complex uses dampers in chevron braces to dissipate seismic energy.
Rolling Hills Middle School	USA/Los Gatos, CA	Taylor Fluid Dampers Total: 8 107 kN ± 75mm stroke	2004	Seismic	New school athletic complex uses dampers in chevron braces to dissipate seismic energy.

(Copyright © 2012 Taylor Devices All Rights Reserved)

Route 364 Page Avenue Extension Bridge	USA/St. Louis, MO	Taylor Fluid Dampers Total: 178 1050 kN ± 50mm stroke 756 kN ± 70mm stroke 1824 kN ± 50mm stroke 2225 kN ± 92mm stroke 556 kN ± 127mm stroke 867 kN ± 127mm stroke	2002-2003	Seismic	New tied arch/plate girder bridge uses dampers to control longitudinal earthquake movement while allowing free thermal movement.
Atatürk Airport Expansion	Turkey/Istanbul	Taylor Fluid Dampers Total: 68 45 kN ± 25mm stroke	2002	Seismic	Extension of International Terminal required additional damping devices to control deflection and minimize thermal restrictions of roof structure supported on FPS isolators.
BCBC Pandora Wing	Canada/Victoria, BC	Taylor Fluid Dampers Total: 76 220 kN ± 57mm stroke 130 kN ± 57mm stroke	2002	Seismic	Retrofit of a 7-story concrete frame/shear wall building built in 1974. Dampers used in chevron braces.
Boise Airport	USA/Boise, ID	Taylor Fluid Dampers Total: 8 445 kN ± 57mm stroke 756 kN ± 84mm stroke 979 kN ± 127mm stroke	2002	Seismic & Wind	New construction, airport terminal building uses dampers to dissipate earthquake energy to reduce demands on the structure.
Buddhist Headquarters	Taiwan/Taipei	Taylor Fluid Dampers Total: 60 981 kN ± 75mm stroke	2002	Seismic	New construction, 17-story building uses dampers to dissipate earthquake energy.
Gillette (Foxboro) Stadium	USA/Foxboro, MA	Taylor Fluid Dampers Total: 18 222 kN ± 178mm stroke	2002	Seismic	Dampers installed across expansion joints of a new open-air football stadium to control motion caused by seismic events.
Bill Emerson Memorial Bridge (Cape Girardeau)	USA/Cape Girardeau, MO	Taylor Fluid Dampers Total: 16 6700 kN ± 180mm stroke	2002	Seismic	New construction of a cable-stayed bridge. Dampers used to control longitudinal earthquake movement while allowing free thermal movement.
Torre Mayor (Chapultepec Tower)	Mexico/Mexico City	Taylor Fluid Dampers Total: 98 5600 kN ± 52mm stroke 2770 kN ± 52mm stroke	2002	Seismic	New 55-story high-rise office/hotel tower uses dampers in mega-braces to dissipate earthquake energy.
Discovery Bay Gymnasium	USA/Discovery Bay, CA	Taylor Fluid Dampers Total: 8 107 kN ± 75mm stroke	2002	Seismic	New school athletic complex uses dampers in chevron braces to dissipate seismic energy.
Genentech FRC II	USA/San Francisco, CA	Taylor Fluid Dampers Total: 192 667 kN ± 102mm stroke 890 kN ± 102mm stroke 1334 kN ± 102mm stroke	2002	Seismic	New construction, 3-story multi-building complex uses dampers to dissipate earthquake energy.

(Copyright © 2012 Taylor Devices All Rights Reserved)