

INFLUENCIA DE LA POSICIÓN, NÚMERO Y DISTRIBUCIÓN DE AMORTIGUADORES SOBRE LA RESPUESTA SÍSMICA EN EDIFICACIONES DE BAJA ALTURA

CAROLINA TOVAR¹ Y OSCAR A. LÓPEZ²

¹Sector Tecnología. Facultad de Arquitectura y Urbanismo. UCV, Caracas. catovar20@yahoo.es

²Instituto de Materiales y Modelos Estructurales. Facultad de Ingeniería. UCV, Caracas. oslopez@reacciun.ve

Recibido: agosto de 2006

Recibido en forma final revisado: mayo de 2007

RESUMEN

El presente estudio evalúa el efecto que tiene la posición, número y distribución de amortiguadores en la respuesta sísmica y propiedades dinámicas de estructuras tipo pórtico y tipo muro, considerando edificios regulares de cinco niveles con períodos de vibración de 0.20 y 2.00 segundos sometidos a una familia de sismos. Se plantean varias posiciones para uno, tres y cinco amortiguadores, con igual cantidad de amortiguamiento en cada caso. La respuesta se obtiene por integración de la ecuación de movimiento del sistema considerando que éste tiene amortiguamiento no-clásico. Se concluye que la posición, número y distribución de los amortiguadores tiene gran influencia en la respuesta estructural. Pero este efecto es sensible al período fundamental y al tipo estructural. Al usar un solo amortiguador, conviene colocarlo en el primer entrepiso ya que conduce al mayor beneficio para la estructura. Al usar varios amortiguadores en las estructuras de muros, la distribución que produce un mayor beneficio es cuando se concentran en los dos primeros entrepisos. En las estructuras aperticadas con período largo conviene distribuirlos uniformemente en todos los entrepisos, mientras que si tienen período corto conviene concentrarlos hacia los tres primeros entrepisos.

Palabras clave: amortiguamiento no-clásico, amortiguadores, edificaciones de baja altura, distribución de amortiguadores, posición y número de amortiguadores.

INFLUENCE OF THE POSITION, NUMBER AND DAMPERS ARRANGEMENT ON THE SEISMIC RESPONSE OF LOW RISE STRUCTURES

ABSTRACT

The goal of this paper is to assess how the position, number and arrangement of dampers affect the seismic response and the dynamic properties of low rise structures. To fulfill this objective, five-story frame and wall structures with two values of the fundamental period, 0.20s and 2.00s, and subjected to five earthquake ground motions were considered. Several distributions of dampers of varying number and location were considered, while maintaining the same amount of damping in each case. The results showed that the damper placement influences significantly the structural response. A large number of dampers does not always lead to the best benefit in terms of drift reduction. If one damper is placed, this should be located on the first story in order to obtain the best overall drift reduction. The best damper placement is one damper per story; if the number of dampers is less than the number of stories, one damper per story beginning at the lowest story is the best choice. In wall structures, increasing the number of dampers leads to less drift reduction than in frame structures. A uniform damper distribution is the best damper placement for the frame structures; however placing the dampers in the lower stories is the best arrangement for the wall structure.

Keywords: non-classical damping, damping devices, low rise structures, dampers arrangement, dampers position.

INTRODUCCIÓN

En décadas recientes se han desarrollado dispositivos especiales cuyo objetivo es enfocar o concentrar la disipación de energía durante un terremoto en un sistema especialmente diseñado para ello, y así reducir sustancialmente o eliminar el daño que se produce en las estructuras.

Aunque existe una gran cantidad de estudios a nivel mundial sobre la aplicabilidad y ventajas de estos sistemas de amortiguamiento, la mayoría de las investigaciones no han abordado con detenimiento las variables que afectan la selección de su posición y número. Por otro lado, los estudios en general están asociados a la colocación de amortiguadores en edificios altos, dejando prácticamente

fuera la alternativa de utilizar estos dispositivos en edificios de baja altura.

Este problema en sus inicios se estudió para una estructura de configuración ideal, es decir, un pórtico regular de corte donde la localización óptima se logra conforme al incremento del amortiguamiento en el modo fundamental (Ashour y Hanson, 1987). Otros estudios utilizaron la teoría de control estructural para encontrar el índice de controlabilidad asociado a cada entrepiso de un edificio, el cual permite conseguir la ubicación óptima del amortiguador (Cheng y Pantelides, 1988); más tarde se empleó este índice para proponer un proceso iterativo asociado a las derivadas de entrepiso, que permita obtener la respuesta deseada con el menor número posible de amortiguadores ubicados en el lugar preciso (Zhang y Soong, 1992); más recientemente se simplificó el proceso de optimización, permitiendo que con ecuaciones más sencillas se pueda obtener la misma efectividad en la respuesta de sistemas elásticos (López-García, 2001).

En este sentido este trabajo tiene como propósito evaluar analíticamente el efecto de la posición, número y distribución de amortiguadores en la respuesta sísmica y propiedades dinámicas de estructuras tipo pórtico y tipo muro.

Al respecto es importante destacar que dicho estudio que constituye parte de la tesis doctoral del primer autor, forma parte de una línea de investigación cuyos primeros resultados han sido divulgados en eventos de carácter nacional e internacional, lo cual se reseña a continuación. En Tovar *et al.* (2003) se estudió el efecto de la posición y número de amortiguadores en la respuesta de estructuras aporticadas para tres períodos distintos, sometidas a dos excitaciones sísmicas y se concluyó que la mejor ubicación es cuando el amortiguador se coloca en los entrepisos inferiores, especialmente el primero, ya que se obtiene mayor reducción en la respuesta; esto se cumple para todos los sistemas estudiados. En Tovar *et al.* (2004a) se evaluó el error que introduce el método simplificado de superposición modal en la respuesta de una estructura aporticada regular con distintas distribuciones y cantidades de amortiguamiento. La posición y el número de amortiguadores tienen gran influencia en el error cometido por el método simplificado al calcular las respuestas del sistema estudiado con amortiguamiento no-clásico. En Tovar y López (2004b) se evalúa la influencia que tiene la cantidad y distribución de amortiguadores en la respuesta de una estructura aporticada regular con distintas distribuciones de amortiguamiento, sometida a dos excitaciones sísmicas.

Se concluye que un aumento en el número de amortiguadores no necesariamente conduce al mayor beneficio para la estructura en términos de la reducción de la respuesta.

SISTEMAS Y MOVIMIENTOS SÍSMICOS

Se definen dos sistemas estructurales, el primero es un pórtico idealizado por vigas de rigidez infinita de cinco pisos, donde se han restringido las deformaciones axiales y por corte. El segundo es una estructura de muros, sin vigas, también de cinco pisos, con restricción de las deformaciones axiales. En la figura 1 se aprecian gráficamente los sistemas estudiados. Estas estructuras representan el comportamiento de edificios aporticados y de muros, de baja altura.

Ambos sistemas tienen masas y rigideces iguales en todos los niveles y se estudian para dos valores de período fundamental (T), uno corto de 0.20 segundos y uno largo de 2.00 segundos. En total se analizan cuatro edificios cuyas propiedades se muestran en la tabla 1. Se adopta un amortiguamiento propio de la estructura sin amortiguadores en cada modo de vibración, igual a 5%.

Todas las estructuras se someten a una familia de cinco acelerogramas. En la tabla 2 se muestran las características más relevantes de los sismos escogidos y en la figura 2 se puede observar el espectro de aceleraciones de cada uno de ellos.

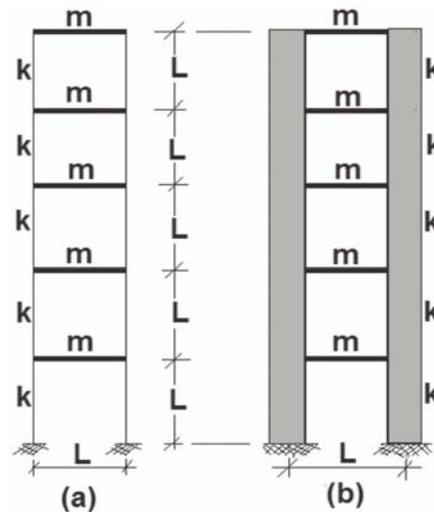


Figura 1. Sistemas estudiados, a) Sistema aporticado, b) Sistema de muros.

Tabla 1. Propiedades dinámicas de los sistemas estudiados.

Sistema Estructural	T (seg.)	m (Kgfseg ² /cm)	k (Kgf/cm)	ξ (%)
Pórtico	0.20	16	195080	5.00
	2.00	1601	195080	5.00
Muro	0.20	53.82	655500	5.00
	2.00	5382	655500	5.00

Tabla 2. Movimientos Sísmicos: propiedades.

Nombre	Fecha	Componente	Aceleración Máxima (g)	Fuente	Medio
El Centro		N-S	0.300	Cercana	Suelo
Taft	21/07/1952	N21E	0.156	Lejana	Suelo
Chile	03/03/1985	Principal mayor	0.191	Lejana	Suelo
Northridge	17/01/1994	Principal mayor	0.261	Lejana	Suelo
Miyagi-Oki	12/06/1978	Principal mayor	0.212	Lejana	Suelo

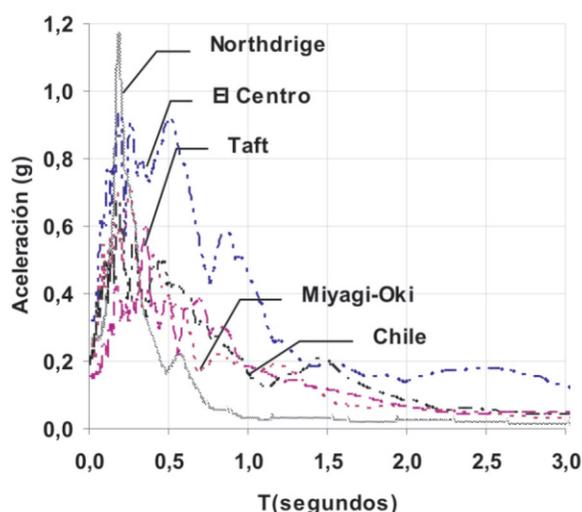


Figura 2. Espectro de aceleraciones para la familia de sismos utilizada.

CÁLCULO DE LAS PROPIEDADES DINÁMICAS Y DE LA RESPUESTA SÍSMICA

La ecuación del movimiento del sistema de N grados de libertad está dada por:

$$\mathbf{M} \cdot \ddot{\mathbf{u}}(t) + \mathbf{C} \cdot \dot{\mathbf{u}}(t) + \mathbf{K} \cdot \mathbf{u}(t) = -\mathbf{M} \cdot \mathbf{r} \cdot \ddot{\mathbf{u}}_g(t) \quad (1)$$

donde:

M, C y K representan las matrices de masa, amortiguamiento y rigidez, respectivamente, de dimensión NxN, u(t) es el vector de desplazamientos relativos a la base, r es un vector unitario de dimensión Nx1 y $\ddot{\mathbf{u}}_g(t)$ es la aceleración del terreno. La matriz de amortiguamiento para cada sistema se obtiene al sumar las contribuciones de la estructura y de los amortiguadores:

$$\mathbf{C} = \mathbf{C}_E + \mathbf{C}_A \quad (2a)$$

$$\mathbf{C}_E = \mathbf{M} \left[\sum_{n=1}^N \frac{2\xi_n \omega_n}{M_n} \phi_n \phi_n^t \right] \mathbf{M} \quad (2b)$$

donde:

\mathbf{C}_E es la matriz de amortiguamiento de la estructura sin amortiguamiento adicional, definida por la ecuación (2b) (Chopra, 2001), donde ξ_n , ω_n y ϕ_n representan el amortiguamiento, la frecuencia natural de vibración, y el vector de desplazamientos en el modo n, respectivamente, todos referidos a la estructura sin amortiguamiento adicional. \mathbf{C}_A es la matriz de amortiguamiento adicional debida a la presencia de los amortiguadores viscosos, la cual depende de las propiedades y de la localización de los mismos. La matriz de rigidez se calculó sin tomar en cuenta la rigidez de los amortiguadores.

Cuando se tienen sistemas con amortiguamiento no-clásico la ecuación (1) suele resolverse reduciéndola a un sistema

de ecuaciones de primer orden (Goel, 2001; Veletsos y Ventura, 1986):

$$\mathbf{A} \cdot \dot{\mathbf{z}}(t) + \mathbf{B} \cdot \mathbf{z}(t) = \mathbf{Y}(t) \quad (3)$$

donde $\mathbf{z}(t)$ y $\mathbf{Y}(t)$ son vectores de dimensión $2N \times 1$ y \mathbf{A} y \mathbf{B} son matrices de dimensión $2N \times 2N$

$$\mathbf{z}(t) = \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{u}}(t) \\ \mathbf{u}(t) \end{bmatrix} \quad \mathbf{Y}(t) = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ -\mathbf{M} \mathbf{r} \ddot{\mathbf{u}}_g(t) \end{bmatrix} \quad (4 \text{ a, b})$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{M} \\ \mathbf{M} & \mathbf{C} \end{bmatrix} \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} -\mathbf{M} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{K} \end{bmatrix} \quad (4 \text{ c, d})$$

$\mathbf{0}$ es la matriz nula de orden $N \times N$. Los autovalores y autovectores son obtenidos al resolver el sistema de $2N$ ecuaciones homogéneas:

$$(\mathbf{B} + \lambda^* \mathbf{A}) \cdot \Phi^* = \mathbf{0} \quad (5)$$

De lo que resultan N autovalores λ_n^* y N autovectores ϕ_n^* complejos, donde el asterisco denota que las propiedades pertenecen al sistema amortiguado. Los autovalores se presentan en pares complejos conjugados de la forma:

$$\lambda_n^* = -\xi_n^* \omega_n^* - i \omega_n^* \sqrt{1 - (\xi_n^*)^2} \quad (6a)$$

$$\tilde{\lambda}_n^* = -\xi_n^* \omega_n^* + i \omega_n^* \sqrt{1 - (\xi_n^*)^2} \quad (6b)$$

ω_n^* y ξ_n^* representan la pseudo-frecuencia natural de vibración y el amortiguamiento aparente del modo n , respectivamente, dados por:

$$\omega_n^* = \sqrt{\mathbf{Re}^2(\lambda_n^*) + \mathbf{Im}^2(\lambda_n^*)} \quad (7a)$$

$$\xi_n^* = \frac{-\mathbf{Re}(\lambda_n^*)}{\omega_n^*} \quad (7b)$$

Adicionalmente se tiene que la frecuencia natural, los pseudo-períodos y períodos de la estructura están dados por:

$$\omega_n = \omega_n^* \sqrt{1 - (\xi_n^*)^2} \quad (8a)$$

$$\mathbf{T}_n^* = \frac{2\pi}{\omega_n^*} \quad (8b)$$

$$\mathbf{T}_n = \frac{2\pi}{\omega_n} \quad (8c)$$

La respuesta de la estructura considerando amortiguamiento no-clásico se obtiene a través de la integración de la ecuación (1). Los períodos y amortiguamientos de las estructuras con amortiguadores, se obtienen de las ecuaciones (8) y (7), respectivamente. La respuesta es calculada en términos de las derivas máximas por entrepiso, obtenidas durante toda la duración de cada sismo. La deriva es la diferencia de los desplazamientos laterales de los pisos adyacentes al entrepiso en consideración.

CONFIGURACIONES, CASOS DE ESTUDIO Y CONSTANTES DE AMORTIGUAMIENTO

Para evaluar el efecto que tiene la distribución de los amortiguadores en la respuesta de las estructuras precisadas anteriormente, se definen varios casos de estudio para los sistemas con amortiguadores. Las distribuciones adoptadas son exactamente iguales tanto para las estructuras aporticadas como para las estructuras de muros y varían entre uno y cinco amortiguadores.

El Caso 0 corresponde a la estructura sin amortiguadores. Para evaluar el efecto que tiene la posición de un amortiguador se han definido cinco casos de estudio, que se pueden apreciar en la figura 3. Cada amortiguador forma un ángulo de 45° con la horizontal. La constante C de cada amortiguador es la misma en cada caso y se determina mediante un proceso iterativo de cálculo usando las ecuaciones 5 a 7, hasta alcanzar el mayor valor posible de amortiguamiento ξ_n^* en el modo fundamental de la estructura aporticada para el Caso 1. Para esta configuración se encuentra que no se pueden conseguir valores superiores al 13% en las estructuras consideradas. En las estructuras de muros se decidió colocar la misma cantidad de amortiguamiento adicional que en las estructuras aporticadas, con la finalidad de facilitar el estudio comparativo de ambos sistemas. Los casos definidos para estudiar el efecto del número de amortiguadores se muestran en la figura 4; como se observa, la configuración adoptada para cada caso incluye sólo un amortiguador por entrepiso, esto con el objeto de mantener constante la distribución del amortiguamiento en los mismos.

Igualmente se presentan en las figuras 5 y 6 otras configuraciones adoptadas para las estructuras con la finalidad de evaluar el efecto que tiene la distribución de los dispositivos. Para ello varios de los casos presentados resultan ser una combinación entre varios amortiguadores por entrepiso. Estos arreglos son propuestos para las estructuras conteniendo tres y cinco amortiguadores.

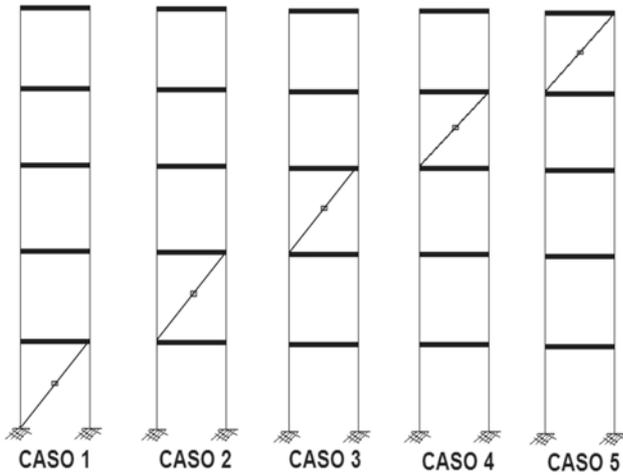


Figura 3. Casos de estudio para evaluar el efecto de la posición de un amortiguador.

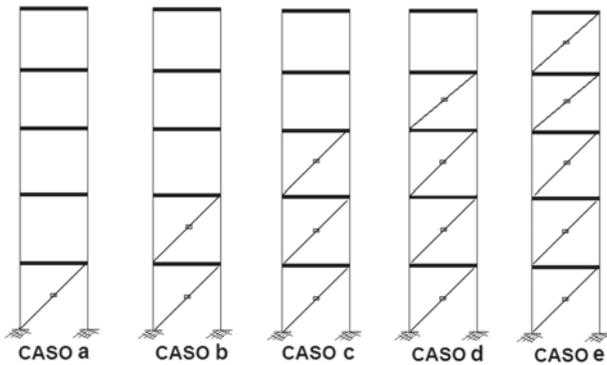


Figura 4. Casos de estudio para evaluar el efecto del número de amortiguadores.

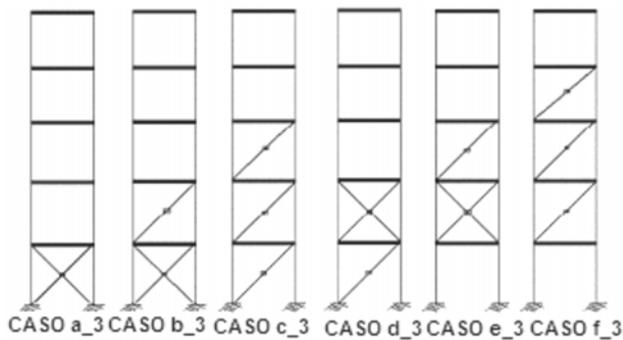


Figura 5. Casos de estudio para evaluar el efecto de la distribución de tres amortiguadores.

Es importante aclarar que la suma de las constantes C de los amortiguadores presentes en cada estructura, es la misma en cada caso y además resulta ser igual a la cantidad de amortiguamiento total introducida en los casos con un a amortiguador. En la tabla 3 se pueden observar las constantes C utilizadas para este estudio.

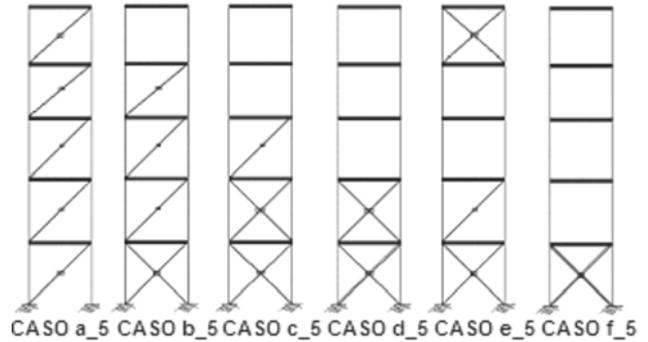


Figura 6. Casos de estudio para evaluar el efecto de la distribución de cinco amortiguadores.

Tabla 3. Constantes de Amortiguamiento.

Nº de amortiguadores	C (Kgf-s/cm) Para T = 0.20 seg.	C (Kgf-s/cm) Para T = 2.00 seg.
1	24838.40	248384.00
2	12419.20	124192.00
3	8279.47	82794.70
4	6209.60	62096.00
5	4967.68	49676.80

RESPUESTA SÍSMICA EN TÉRMINOS DE DERIVAS NORMALIZADAS

Se definen dos parámetros adimensionales para caracterizar el efecto de los amortiguadores:

$$\beta_i = \frac{\Delta_i^k}{\Delta_i^0} \quad (9a)$$

$$\beta_p = \left(\sum_1^n \beta_i \right) * \frac{1}{n} \quad (9b)$$

donde n es el número de pisos, Δ_i^k es la deriva del entrepiso i para el caso de estudio k y Δ_i^0 es la deriva del entrepiso i para el Caso 0 (estructura sin amortiguadores).

El parámetro β_i evalúa el beneficio que producen los amortiguadores en el entrepiso i, para determinada distribución y número de los mismos. Puede decirse que es una medida local del beneficio que logran los dispositivos en la estructura. El parámetro β_p mide el beneficio global de los amortiguadores sobre la estructura, se trata pues del valor promedio de los valores de β_i para todo el edificio.

Nótese que β_i y β_p están comprendidos entre 0 y 1. Un valor de β_i o de β_p cercano a 1 indica poco efecto de los amortiguadores, lo cual se traduce en poca reducción de la respuesta. Mientras más pequeño sea el valor de β_i o de β_p , mayor será el efecto de los amortiguadores y por ende se obtendrá mayor reducción en la respuesta de la estructura.

EFFECTO DE LA POSICIÓN DE UN AMORTIGUADOR

Efecto en la respuesta máxima

En las figuras 7a y 7b se grafican los valores de β_p para la estructura aporticada con un solo amortiguador, para cada sismo. Se muestra también en el gráfico la curva promedio para todos los sismos estudiados. Nótese que para el sistema con $T = 0.20$ seg., ver figura 7a, el mayor beneficio se logra cuando el amortiguador se ubica en el primer entrepiso, obteniéndose un valor promedio de β_p alrededor de 0.60. Por otro lado se aprecia como al colocar el amortiguador en los entrepisos superiores se consigue un menor beneficio y en el último entrepiso el amortiguador prácticamente no tiene efecto sobre el sistema; el valor de β_p está alrededor de 0.90.

Al observar la figura 7b, se nota que para la estructura aporticada con $T = 2.00$ seg. en promedio se obtiene el mayor beneficio cuando el amortiguador se coloca en el primer y tercer entrepiso, β_p es igual a 0.82 y 0.80, respectivamente. También se aprecia que el beneficio obtenido para este sistema es menor que el observado para la estructura con período corto, por lo cual se puede inferir que el efecto del amortiguador se muestra sensible al período de la estructura.

En las figuras 8a y 8b se muestran las gráficas con los valores de β_p para la estructura de muros con un solo amortiguador. Obsérvese que para el sistema con $T = 0.20$ seg. (figura 8a), la estructura se ve más favorecida ($\beta_p = 0.65$) cuando el amortiguador se ubica en el primer entrepiso, igualmente se aprecia que al colocar el amortiguador en los entrepisos

superiores se obtiene un mayor valor de β_p y en el último entrepiso tiene muy poco efecto sobre el sistema, β_p está alrededor de 0.93. Para el sistema con $T = 2.00$ seg. (figura 8b), en promedio se consigue el mayor beneficio cuando el amortiguador se coloca en el primer y tercer entrepiso, donde β_p oscila entre 0.75 y 0.80.

Si se confrontan los resultados obtenidos para la estructura aporticada con los de la estructura de muros se puede inferir que en término medio la posición de un amortiguador tiene un efecto similar para ambos sistemas estructurales.

Es importante destacar que la variación introducida por cada sismo es muy pequeña, con un coeficiente de variación menor que 8%. El patrón de comportamiento es similar para todos los sismos estudiados.

A continuación se presentan algunos casos individuales considerados de más relevancia, para estudiar el efecto del amortiguador en cada entrepiso. Solo se muestran los valores promedio de β_i para todos los sismos, en cada entrepiso i de la estructura; estos se denotan como β_{ip} .

En la figura 9 se muestran las gráficas correspondientes al Caso 1. Se puede observar que para los sistemas con $T = 0.20$ seg. la colocación de un amortiguador en la estructura produce en término medio beneficios muy similares a partir del segundo entrepiso. En los sistemas con $T = 2.00$ seg. se aprecia que para la estructura aporticada el amortiguador produce una gran reducción en la deriva del primer entrepiso ($\beta_{ip} = 0.31$) y tiene poco efecto en los demás entrepisos, sobretodo en los últimos, ya que se observan valores de β_{ip} alrededor de 0.90. En la estructura de muros también se ve más favorecido el primer entrepiso ($\beta_{ip} = 0.60$), sin embargo en los entrepisos restantes el amortiguador tiene un efecto importante, incluso en los últimos, observándose reducciones en la deriva alrededor del 20% (β_{ip} alrededor de 0.80).

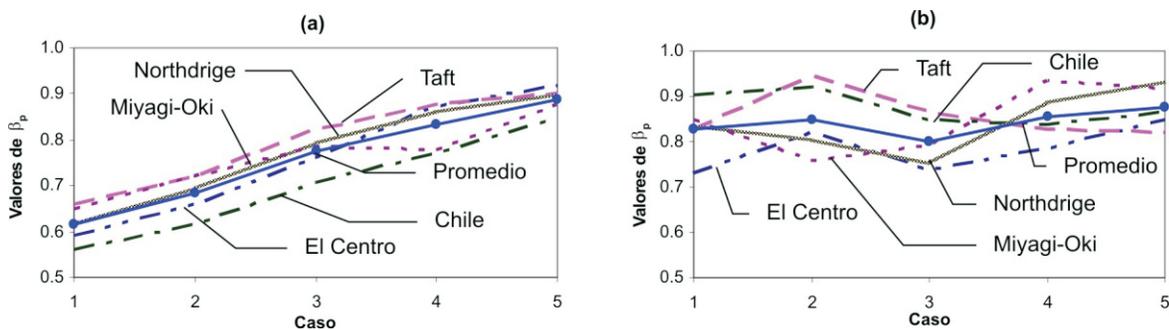


Figura 7. Efecto de la posición de un amortiguador en el sistema aporticado,
a) Sistema con $T = 0.20$ seg., b) Sistema con $T = 2.00$ seg.

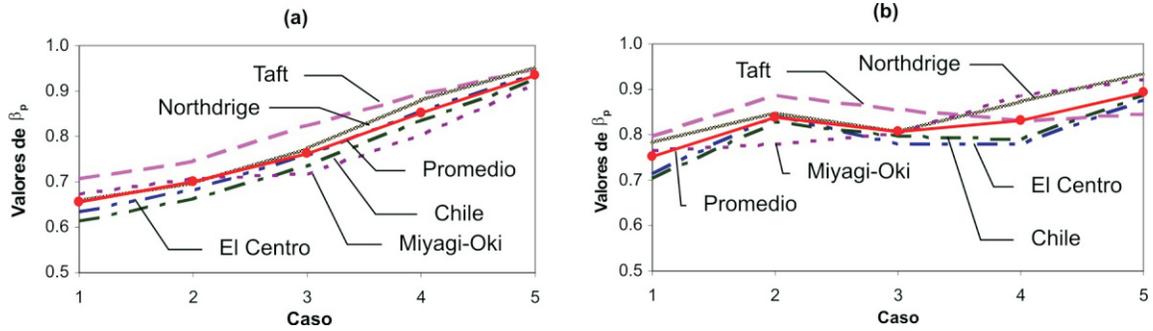


Figura 8. Efecto de la posición de un amortiguador en el sistema de muros, a) Sistema con $T = 0.20$ seg., b) Sistema con $T = 2.00$ seg.

La figura 10 presenta las gráficas para el Caso 3. Para las estructuras de período corto se aprecia que en el sistema aporticado el amortiguador tiene un efecto muy marcado en el entrepiso donde está ubicado ($\beta_{ip} = 0.40$), en los demás entrepisos el efecto es reducido, apenas se logran valores de β_{ip} alrededor de 0.90. En el sistema de muros el entrepiso que presenta mayor reducción en la deriva ($\beta_{ip} = 0.68$) es el tercero, sin embargo en los demás entrepisos se consigue también una reducción significativa (β_{ip} alrededor de 0.88).

Para las estructuras con período largo se obtienen resultados similares, esto permite inferir que en las estructuras aporticadas el amortiguador sólo favorece de forma significativa al entrepiso donde esté ubicado, mientras que en las estructuras de muros el amortiguador tiende a favorecer a todos los niveles aunque se encuentre en los entrepisos inferiores.

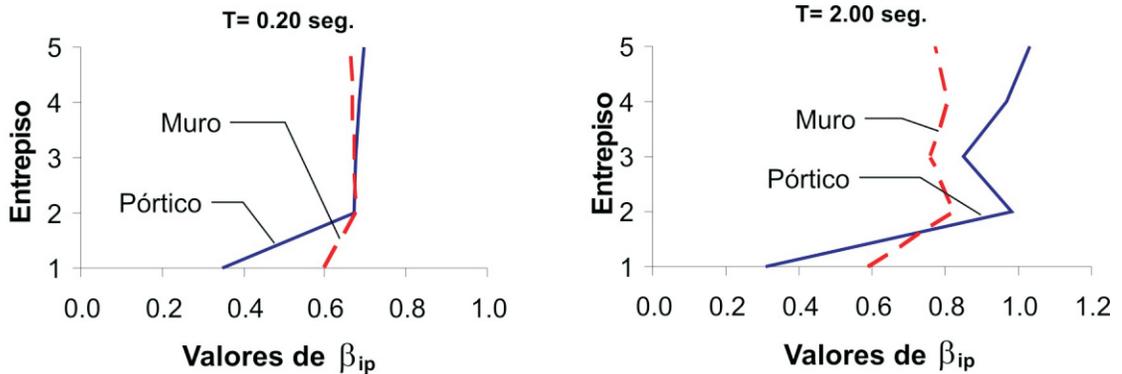


Figura 9: Efecto de la posición de un amortiguador. Caso 1.

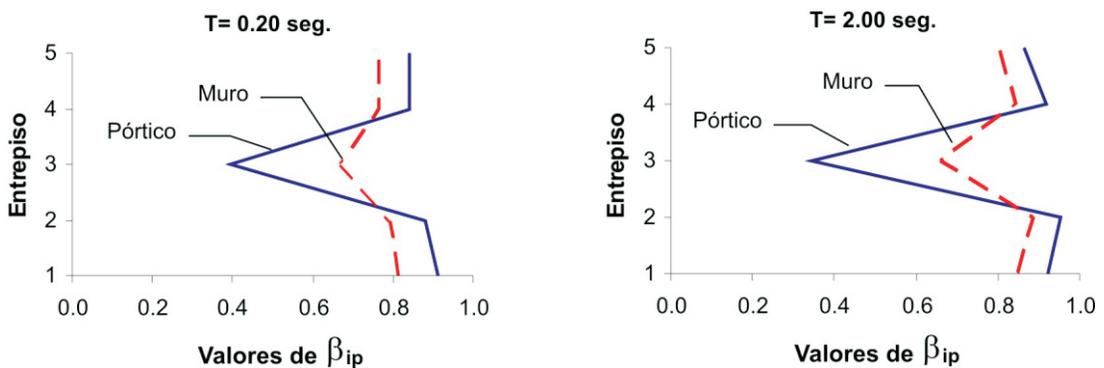


Figura 10. Efecto de la posición de un amortiguador. Caso 3.

Efecto en las propiedades dinámicas

En la figura 11 se presentan los valores de amortiguamiento de los modos 1 y 2 para las distintas posiciones del amortiguador. En primer lugar se observa que el mayor amortiguamiento se obtiene para el primer modo en los tres primeros casos, siendo levemente mayor en la estructura de muros. El amortiguamiento en el primer modo disminuye a medida que el amortiguador se ubica en los niveles más altos de la estructura, pero obviamente este valor es siempre superior al amortiguamiento propio de la estructura (5%). El mayor valor (13% para la estructura aporticada y 14% para la estructura de muros) se alcanza con el amortiguador en el primer entrepiso. El mayor amortiguamiento en el modo 2 se alcanza con el amortiguador colocado en el primer y cuarto entrepisos, sin embargo es importante destacar que en la estructura de muros los valores obtenidos son superiores a los de la estructura de pórticos, incluso en el último entrepiso, lo cual se corresponde con lo observado al estudiar la respuesta de ambos sistemas.

En definitiva se observa que la inclusión del amortiguador en la estructura siempre aumenta el amortiguamiento en los primeros dos modos, pero este incremento depende de la posición en la que se le haya colocado. Aunque los modos superiores (3, 4 y 5) no se muestran en la figura, es importante destacar que en cada caso de estudio se obtuvieron valores de amortiguamiento superior al valor crítico ($\xi=100\%$) en alguno de esos modos; esto indica que no existe vibración de la estructura para esa forma modal.

La figura 12 muestra la variación del período fundamental de las estructuras con la posición de un amortiguador. Se observa que el período siempre muestra una ligera disminución, siendo este efecto más manifiesto en el sistema aporticado, y que puede establecerse correspondencia con el patrón observado para los amortiguamientos modales. La mayor reducción en el período fundamental ocurre cuando el amortiguador se coloca en el primer entrepiso (Caso 1). El amortiguador colocado en el último entrepiso (Caso 5) tiene muy poca influencia en el período fundamental.

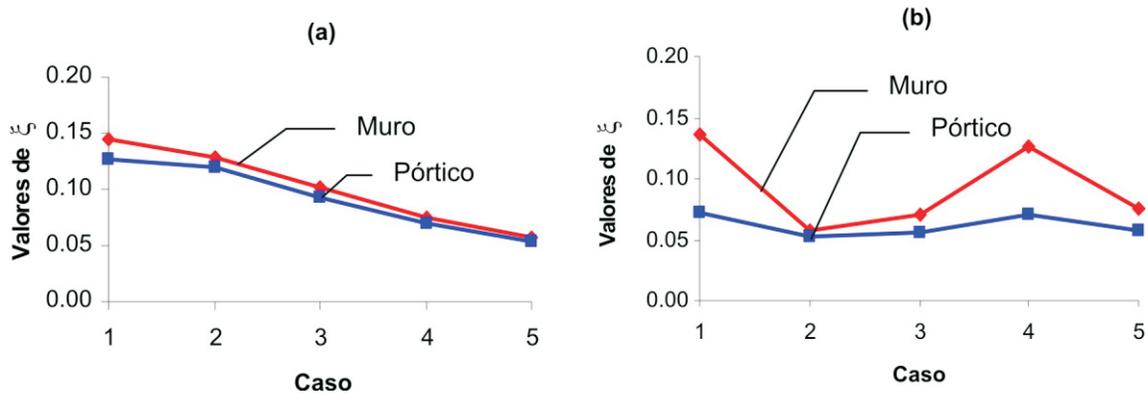


Figura 11. Variación del amortiguamiento modal con la posición de un amortiguador, a) Primer modo, b) Segundo modo.

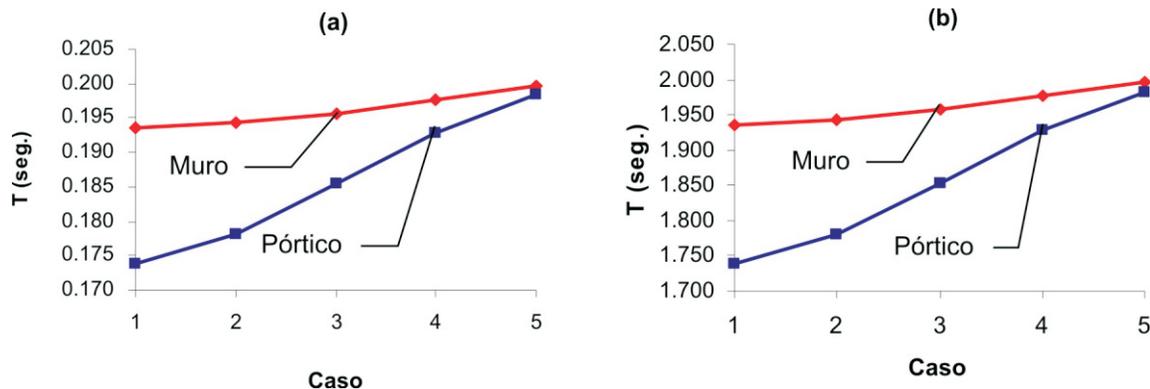


Figura 12. Variación del período fundamental con la posición de un amortiguador, a) $T=0.20$ seg., b) $T=2.00$ seg.

EFFECTO DEL NÚMERO DE AMORTIGUADORES

Efecto en la respuesta máxima

La figura 13 muestra los valores promedio de β_p para cada uno de los casos definidos (figura 4) para evaluar el efecto del número de amortiguadores en las estructuras aporticadas. En la Figura 13a se pone de manifiesto que colocar un mayor número de amortiguadores en las estructuras con $T = 0.20$ seg., no necesariamente conduce a un mayor beneficio para todos los entrepisos. Así, se observa que al colocar 4 ó 5 amortiguadores (Casos d y e, respectivamente) se produce prácticamente el mismo efecto que al colocar 2 ó 3 (Casos b y c, respectivamente) donde el valor de β_p está alrededor de 0.45. Sin embargo, es importante destacar que colocar al menos más de un amortiguador en la estructura resulta totalmente favorable para todos los entrepisos, siendo el número óptimo 3 amortiguadores.

En la figura 13b se aprecia como en las estructuras aporticadas con $T = 2.00$ seg., si resulta completamente favorable colocar un mayor número de dispositivos,

observándose que el número que reporta mayor beneficio para la estructura corresponde al Caso e (5 amortiguadores, uno en cada entrepiso), donde el valor de β_p está alrededor de 0.45. El caso menos favorable es el Caso a (un solo amortiguador en el primer entrepiso) donde β_p está alrededor de 0.83.

En la figura 14 se pueden apreciar los valores de β_p promedio obtenidos para las estructuras de muros. Para las estructuras de período corto, $T = 0.20$ seg., se observa que los casos más favorables para la estructura resultan ser el Caso a y el Caso b, donde β_p está alrededor de 0.63 (figura 14a). Igualmente se deduce que el colocar un número mayor de amortiguadores (3, 4 ó 5) en las estructuras de muros con período corto no implica que habrá un mayor beneficio, el número óptimo de amortiguadores para estas estructuras resulta ser 2.

En la figura 14b se puede observar el comportamiento de las estructuras de muros con período largo, $T = 2.00$ seg., es notorio como al colocar dos amortiguadores (Caso b) en la estructura el beneficio promedio obtenido es mayor que al

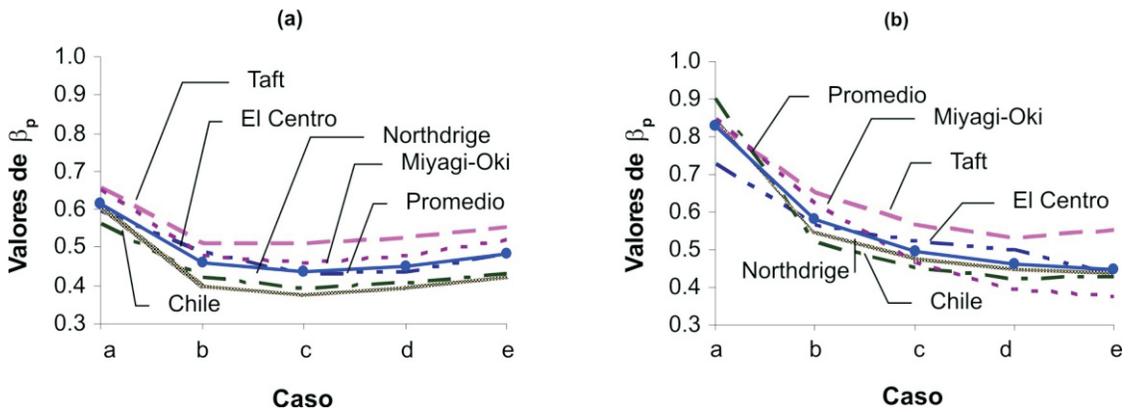


Figura 13. Efecto del número de amortiguadores en el sistema aporticado, a) Sistema con $T = 0.20$ seg., b) Sistema con $T = 2.00$ seg.

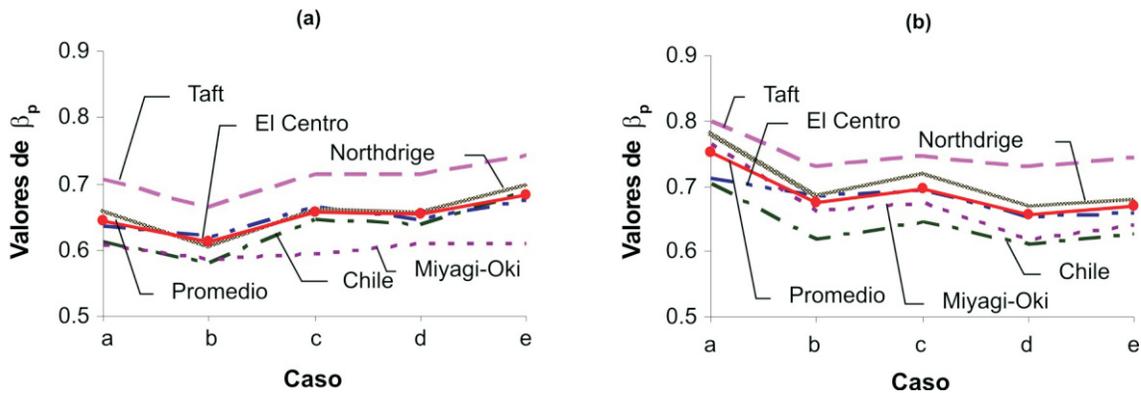


Figura 14. Efecto del número de amortiguadores en el sistema de muros, a) Sistema con $T = 0.20$ seg., b) Sistema con $T = 2.00$ seg.

colocar un solo amortiguador, $\beta_p = 0.68$, sin embargo sí se aumenta el número de amortiguadores (3, 4 ó 5) el beneficio logrado dista muy poco del conseguido para la configuración con dos amortiguadores. Esto permite inferir que usar un número mayor a dos amortiguadores dispuestos como se muestra en la figura 4 no implica una mayor reducción de la respuesta global de la estructura.

Efecto en las propiedades dinámicas

En la figura 15a se puede apreciar que al colocar más de un amortiguador en la estructura de pórticos aumenta el amortiguamiento en los dos primeros modos. Pueden notarse valores de ξ iguales al 34% en el primer modo para los Casos b y c, mientras que para los Casos d y e se obtienen valores de ξ alrededor del 25%. En el segundo modo (figura 15b) se observa un incremento significativo del valor de amortiguamiento, especialmente en los Casos b, d y e, donde se alcanzan valores alrededor del 65%.

En la estructura de muros se observa un patrón de comportamiento estable para el primer modo (figura 15a), obteniéndose los valores máximos de ξ para los Casos a y b (14% y 15%, respectivamente), para los Casos c, d y e el amortiguamiento más bien disminuye ligeramente, resultando en valores de ξ alrededor del 12%. En el segundo modo los valores de ξ son ligeramente mayores cuando se coloca más de un amortiguador, estos oscilan alrededor del 20% (figura 15b).

Resulta importante acotar que para la estructura de muros el amortiguamiento se ve favorecido si se colocan uno o dos amortiguadores en el sistema, el colocar un mayor número de dispositivos no garantiza un mayor beneficio para la estructura. Igualmente se debe resaltar que en esta etapa del estudio también se obtuvo en algunos de los modos superiores valores de amortiguamiento por encima del valor crítico ($\xi=100\%$); esto indica que no existe vibración de la estructura en ese modo.

La figura 16 muestra la variación del período fundamental; se advierte que el período disminuye en los dos primeros casos del sistema aporticado. La configuración adoptada según los Casos c, d y e tiene muy poca influencia en el período fundamental, donde los dispositivos ocupan la mayoría de los entrepisos de la estructura, esto garantiza una distribución más uniforme del amortiguamiento

acercando al sistema a un comportamiento clásico. En la estructura de muros la configuración que tiene mayor efecto sobre el período fundamental es la correspondiente al Caso a, donde el amortiguador se coloca en el primer piso, el resto de las configuraciones tienen muy poco efecto sobre el mismo. De aquí se infiere que en las estructuras de muros al colocar más de un amortiguador no se afecta de forma significativa el valor del período fundamental.

EFECTO DE LA DISTRIBUCIÓN DE TRES AMORTIGUADORES

Efecto en la respuesta máxima

La figura 17a muestra los valores promedio de β_p para las distribuciones propuestas cuando tres amortiguadores están presentes en la estructura aporticada con $T = 0.20$ seg. Se observa que las distribuciones que aportan mayor beneficio a la estructura corresponden al caso c_3 con un valor de β_p igual a 0.43, y a los Casos b_3 y d_3, con un valor de β_p alrededor 0.47. El Caso f_3 también se puede decir que favorece al sistema, ya que presenta un valor de β_p de 0.50. El Caso en el cual la estructura se ve menos beneficiada es el a_3 donde todo el amortiguamiento se concentra únicamente en el primer entrepiso. Esto indica que resulta más favorable para la estructura distribuir el amortiguamiento y no concentrarlo en un solo piso. Asimismo se observa que para el sistema con $T = 2.00$ seg. (figura 17b) los casos que reportan mayor beneficio para la estructura son el c_3 y el f_3, con valores promedio de β_p alrededor de 0.50 y 0.57, respectivamente. El Caso donde se obtiene la menor reducción de la respuesta es el a_3, en el que β_p está alrededor de 0.83, esto coincide con lo anteriormente descrito para el sistema con $T = 0.20$ seg.

Para la estructura de muros con $T = 0.20$ seg. (figura 18a), se obtiene la mayor reducción en la respuesta para el Caso b_3, la cual se corresponde con un valor de β_p alrededor de 0.62. También se obtienen beneficios significativos en los Casos a_3 y d_3, cuyos valores de β_p oscilan en torno a 0.65. Los Casos más desfavorables para este sistema son el c_3 y el f_3, donde se aprecian los mayores valores de β_p .

En el sistema de muros con período largo (figura 18b), el caso que aporta mayor beneficio a la estructura es el b_3, con β_p igual a 0.68. La configuración que produce la menor reducción en la respuesta es la que corresponde al Caso e_3.

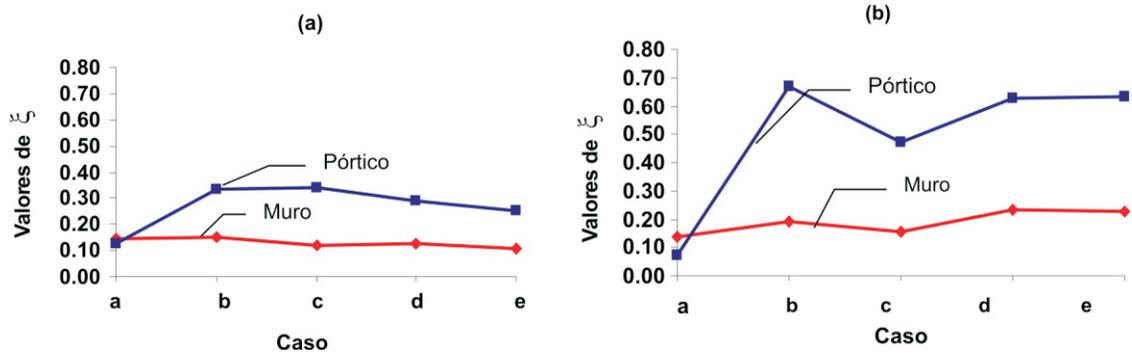


Figura 15. Variación del amortiguamiento modal con el número de amortiguadores, a) Primer modo, b) Segundo modo.

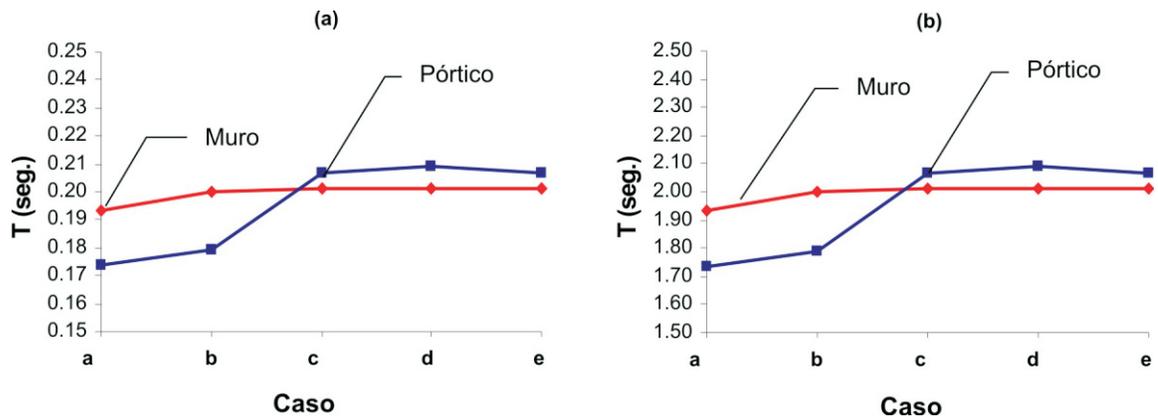


Figura 16. Variación del período fundamental con el número de amortiguadores, a) $T=0.20$ seg., b) $T=2.00$ seg.

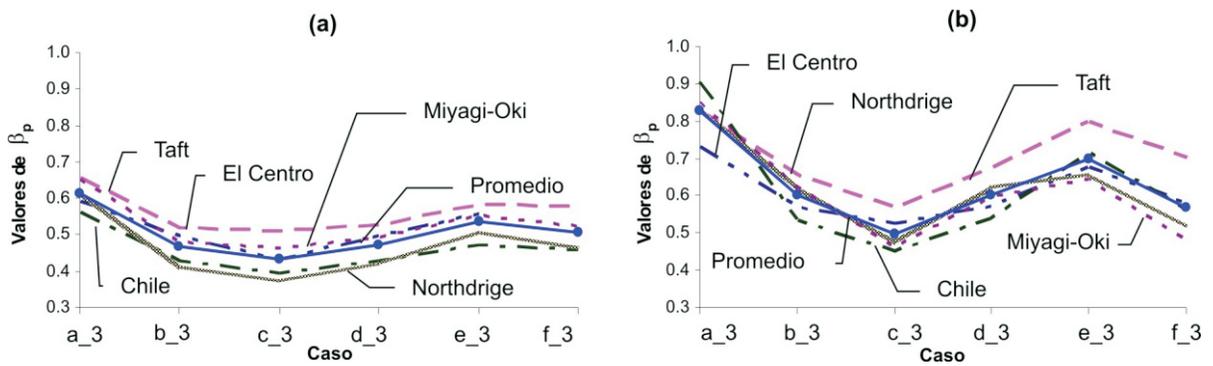


Figura 17. Efecto de la distribución de tres amortiguadores para la estructura apórticada, a) $T=0.20$ seg., b) $T=2.00$ seg.

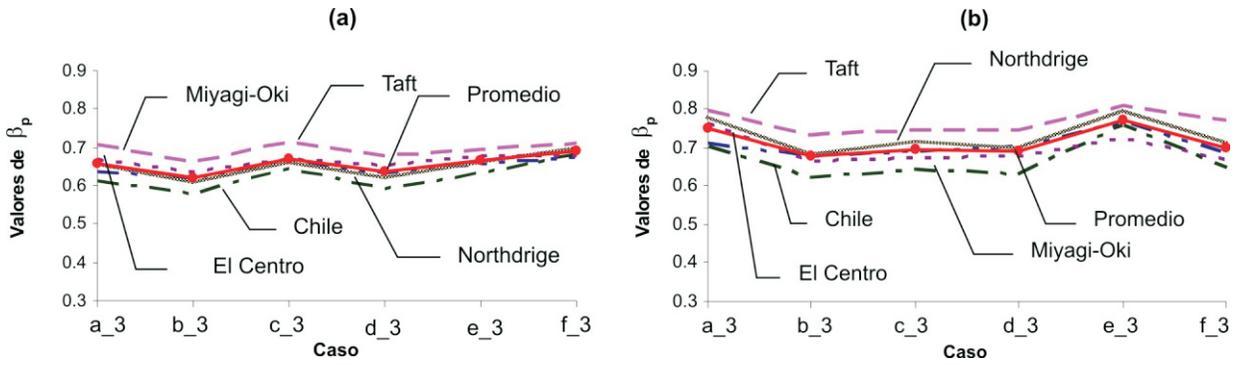


Figura 18. Efecto de la distribución de tres amortiguadores para la estructura de muros,
a) $T = 0.20$ seg.
b) $T = 2.00$ seg.

Efecto en las propiedades dinámicas

En la figura 19 se puede observar que la colocación de más de un amortiguador en la estructura aumenta el amortiguamiento en los dos primeros modos, para cualquier distribución que se haya adoptado. Esto es especialmente cierto para la estructura de pórticos, donde se aprecia un incremento hasta del 35% en el primer modo, sobretodo para el Caso c_3 en el que se distribuye el amortiguamiento de manera uniforme en los tres primeros entrepisos.

Igualmente en el segundo modo se observa un incremento notable del valor de amortiguamiento, especialmente en los Casos a_3 y b_3, alcanzándose valores en el orden del 70%. En la estructura de muros se observa una tendencia muy estable para ambos modos, obteniéndose un máximo de 15% en el primer modo en el Caso b_3, y 20% para el segundo modo para el mismo Caso. Resulta importante acotar luego de analizar estos resultados, lo favorable que resulta para la estructura aportificada el colocar más de un amortiguador y sobretodo lograr una distribución de manera uniforme a lo

largo del edificio. Mientras que para la estructura de muros el efecto prácticamente es el mismo si el amortiguamiento se concentra en un solo nivel o si se distribuye. Igualmente se debe resaltar que en esta etapa del estudio también se obtuvo en algunos de los modos superiores valores de amortiguamiento mayores al valor crítico ($\xi=100\%$); esto indica que no existe vibración de la estructura en ese modo.

La figura 20 muestra la variación del período fundamental; se advierte que el período disminuye en la mayoría de los casos del sistema aportificado. La mayor reducción en el período fundamental ocurre cuando los tres amortiguadores se colocan en el primer entrepiso (Caso a_3). La distribución adoptada según el Caso c_3 tiene muy poca influencia en el período fundamental, esto puede ser causado porque la distribución del amortiguamiento es más uniforme con respecto a la estructura, lo cual acerca más al sistema a un comportamiento clásico. En la estructura de muros la configuración que tiene mayor efecto sobre el período de vibración es la correspondiente al Caso a_3, donde el amortiguamiento se concentra en el primer piso.

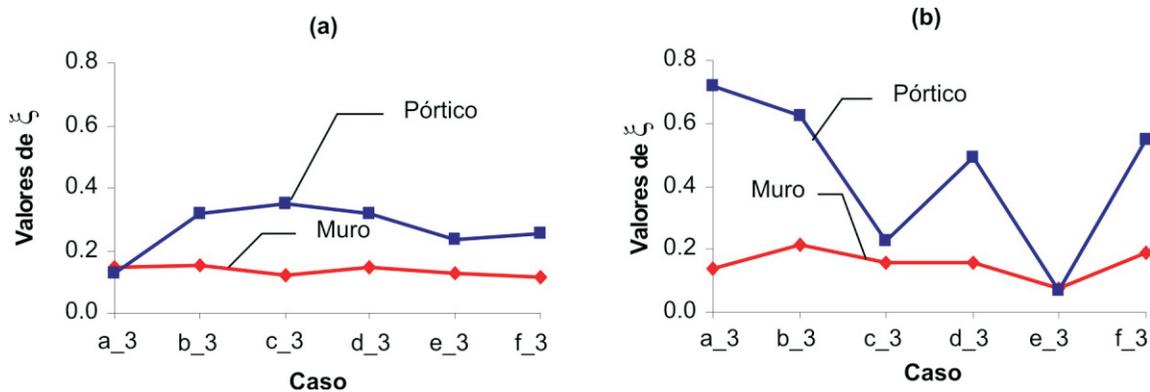


Figura 19. Variación del amortiguamiento modal con la distribución de tres amortiguadores,
a) Primer modo,
b) Segundo modo.

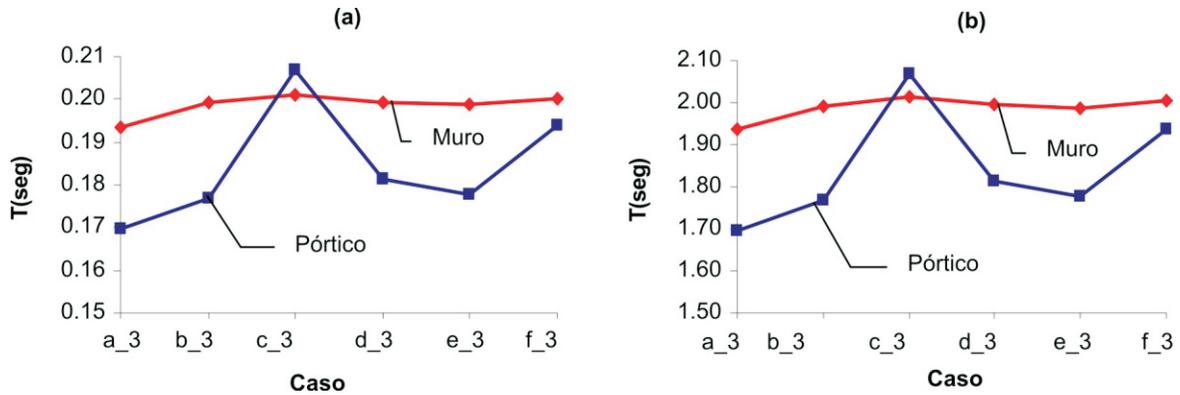


Figura 20. Variación del período fundamental con la distribución de tres amortiguadores,
a) $T = 0.20$ seg.,
b) $T = 2.00$ seg.

EFFECTO DE LA DISTRIBUCIÓN DE CINCO AMORTIGUADORES

Efecto en la respuesta máxima

Los resultados correspondientes a la distribución de cinco amortiguadores para la estructura aporticada se presentan en la figura 21. El mayor beneficio para la estructura con $T = 0.20$ seg. (figura 21a), se obtiene para el caso c_5 donde se aprecia un valor de β_p alrededor de 0.43. Esto indica que para esta estructura es favorable que el amortiguamiento se distribuya hacia los niveles inferiores, siendo redundantes las distribuciones en las que se coloquen amortiguadores en todos los entrepisos como en el Caso a_5, en el cual se obtuvo un valor de β_p igual a 0.62. Para la estructura con $T = 2.00$ seg. (figura 21b) los resultados muestran un efecto contrario al descrito anteriormente, es decir, el mayor beneficio ($\beta_p = 0.45$) se obtiene para el Caso a_5 y el menor ($\beta_p = 0.83$) corresponde al Caso f_5. Esto permite inferir que para la estructura aporticada de período largo resulta conveniente adoptar distribuciones que impliquen colocar amortiguadores en todos los entrepisos, distribuyendo la cantidad de amortiguamiento uniformemente, como en el Caso a_5.

Los resultados correspondientes a la distribución de cinco amortiguadores para la estructura de muros se presentan en la figura 22. El Caso más favorable para la estructura con $T = 0.20$ seg. (figura 22a) es el caso d_5 donde se aprecia un valor de β_p de 0.62. La menor reducción de la deriva se consigue con el Caso a_5, siendo β_p igual a 0.70. Esto indica que para esta estructura resulta conveniente que el amortiguamiento se concentre hacia los niveles inferiores, más que aquellas distribuciones que impliquen colocar amortiguadores en todos y cada uno de los entrepisos. Para

la estructura con $T = 2.00$ seg. (figura 22b) los resultados muestran una tendencia muy estable, prácticamente cualquier distribución produce un efecto favorable, es decir, el valor de β_p en general se mantiene alrededor de 0.65 y 0.75. Esto permite inferir que para la estructura de muros de período largo colocar una gran cantidad de amortiguadores resulta igual a colocar un solo amortiguador equivalente, obteniéndose mayor ventaja si se destina la mayor cantidad de amortiguamiento a los entrepisos inferiores, como en el Caso b_5.

Efecto en las propiedades dinámicas

Los amortiguamientos modales se ven influenciados con la distribución de los amortiguadores, esto se puede observar en la figura 23a, en el primer modo para el sistema aporticado el menor valor de amortiguamiento (13%) se produce para el Caso f_5, en el que todos los dispositivos se concentran en el primer entrepiso. Los valores más elevados, que están alrededor del 35%, se obtienen cuando los amortiguadores se distribuyen entre los tres primeros entrepisos. En el segundo modo los valores de amortiguamiento son significativamente mayores que en el primer modo, alcanzando su máximo (80%) para el Caso b_5. En las estructuras de muros el amortiguamiento presenta una tendencia muy estable para ambos modos, los valores oscilan entre el 15% para el primer modo y el 20% para el segundo. Los Casos que exhiben los valores máximos son el f_5 y el d_5, en los cuales parte del amortiguamiento se concentra en el primer entrepiso. Se debe resaltar que en esta etapa del estudio también se obtuvo en algunos modos superiores valores de amortiguamiento mayores al valor crítico ($\xi = 100\%$), esto ocurre en todos los casos con excepción del a_5, ya que su comportamiento corresponde al de un sistema con amortiguamiento clásico.

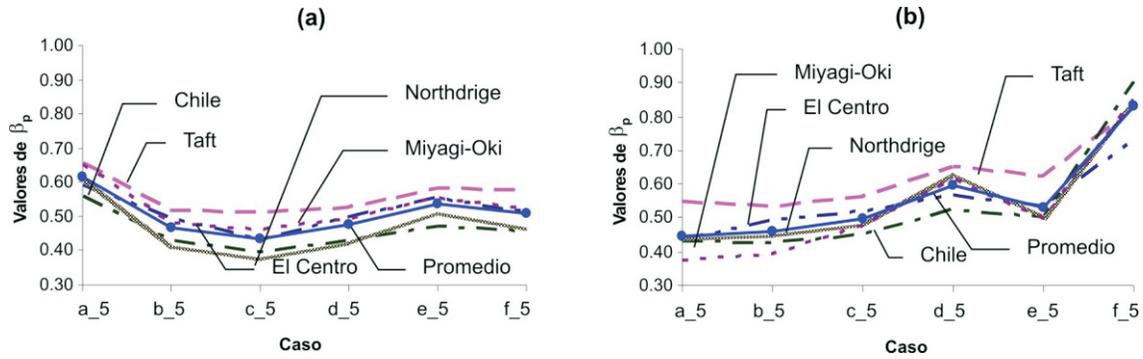


Figura 21. Efecto de la distribución de cinco amortiguadores de la estructura aporticada,
a) $T = 0.20$ seg.,
b) $T = 2.00$ seg.

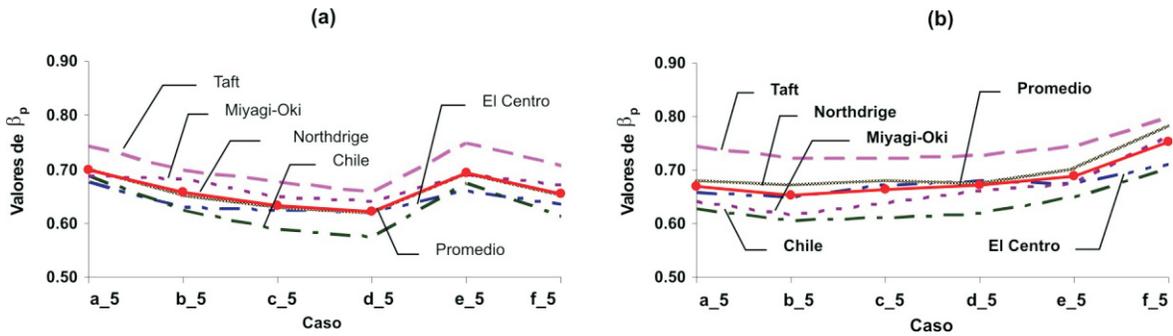


Figura 22: Efecto de la distribución de cinco amortiguadores de la estructura de muros,
a) $T = 0.20$ seg.,
b) $T = 2.00$ seg.

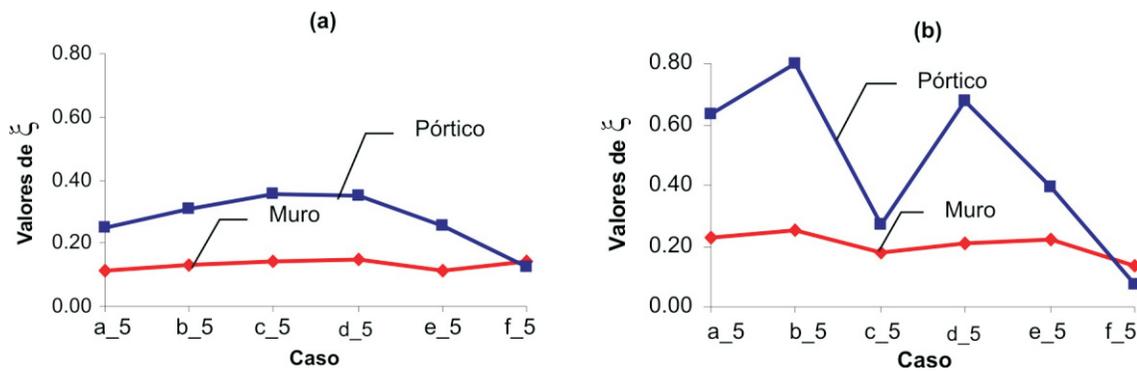


Figura 23. Variación del amortiguamiento modal con la distribución de cinco amortiguadores,
a) Primer modo,
b) Segundo modo.

En la figura 24 se muestran los resultados correspondientes a la variación del período fundamental, nótese que en las estructuras de muros la variación es apenas notable, sin embargo puede establecerse cierta correspondencia con la distribución de los amortiguadores, ya que al igual que en la estructura aporticada el período disminuye a medida que

los dispositivos se concentran en los entrepisos inferiores.

En las estructuras aporticadas la variación del período es mucho más notable y se constituye de forma clara la correspondencia antes discutida entre los períodos y la distribución de los amortiguadores.

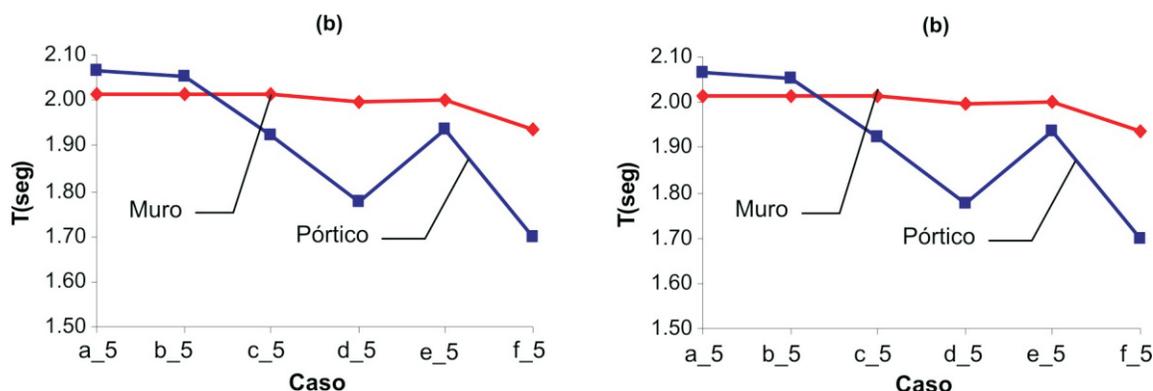


Figura 24. Variación del período fundamental con la distribución de cinco amortiguadores,
a) $T = 0.20$ seg.,
b) $T = 2.00$ seg.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los resultados obtenidos conducen a las siguientes conclusiones:

La posición, número y distribución de los amortiguadores tienen gran influencia en la respuesta estructural. Pero este efecto es sensible al valor del período fundamental y al tipo de sistema estructural del edificio.

Cuando se utiliza un solo amortiguador en la estructura, el mayor valor de amortiguamiento del modo fundamental se obtiene cuando el dispositivo se ubica en el primer entrepiso. La utilización de un mayor número de amortiguadores, colocando un dispositivo por entrepiso y manteniendo constante la suma de las constantes «C» de amortiguamiento viscoso, incrementa notablemente el amortiguamiento del modo fundamental en las estructuras aporticadas, principalmente cuando la distribución adoptada es aquella donde los amortiguadores se concentran en los tres primeros entrepisos. Para las estructuras de muros el usar más de un amortiguador introduce muy poca variación en el amortiguamiento.

El período fundamental de las estructuras se ve influenciado por la posición y distribución de los amortiguadores, pero

en una proporción bastante menor que la observada para los amortiguamientos modales. La mayor reducción en el período fundamental se obtiene cuando gran parte del amortiguamiento se concentra en el primer entrepiso.

Si se incorpora un solo amortiguador a la estructura la mejor ubicación es en el primer entrepiso, ya que se obtiene la mayor reducción en término medio de la respuesta. Esta reducción promedio de derivas oscila entre 18% y 40% para todos los sistemas y los sismos estudiados.

Si el número de amortiguadores es menor al número de entrepisos, la mejor distribución resulta ser un amortiguador por entrepiso, comenzando desde el primero. Esto se cumple para todas las estructuras aporticadas estudiadas.

Cuando el número de amortiguadores iguala al número de entrepisos, lo mejor es concentrar el amortiguamiento en los primeros tres entrepisos, especialmente en el primero. Esto se cumple para todas las estructuras de período corto estudiadas. Para las estructuras aporticadas de período largo conviene distribuir el amortiguamiento uniformemente en todos los entrepisos, mientras que para las estructuras de muros se obtiene mayor beneficio si el amortiguamiento se concentra en el primer entrepiso.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer el respaldo brindado por el Consejo de Desarrollo Científico y Humanístico (CDCH-UCV) y la contribución del Instituto de Materiales y Modelos Estructurales (IMME) y de la Facultad de Arquitectura y Urbanismo (FAU-UCV).

REFERENCIAS

ASHOUR S. AND HANSON, R. (1987). Elastic Response of buildings with supplemental damping. *Report UMCE 87-01*, Dept. of Civ. Engrg. University of Michigan, Ann. Arbor, Mich.

CHENG F. AND PANTELIDES, C. (1988). Optimal placement of actuators for structural control. *Tech. Rep. NCCER-88-0037*. Nat. Ctr. For Earthquake Engrg. Res. State University of New York, Buffalo. N.Y.

CHOPRA, A. (2002). *Dynamics of Structures. Theory and Applications to Earthquake Engineering*. Prentice Hall, U. S. A, p. 727.

GOEL, R. (2001). Simplified analysis of asymmetric structures with supplemental damping. *Earthquake Eng. Struct. Dyn.*; 30:1399-1416.

HANSON, R.D. AND SOONG, T. S. (2001). Seismic Design with Supplemental Energy Dissipation Devices. *Monograph n° 8*. Earthquake Engineering Research Institute, Oakland, pp. 135.

LÓPEZ, D. (2001). A Simple Method for the Design of Optimal Damper Configurations in MDOF Structures. *Earthquake Spectra*, 17(3):387-398.

TOVAR, C., LÓPEZ, O. A. Y TOVAR, A. G. (2003). Efecto de la posición y número de amortiguadores en la respuesta sísmica de estructuras aporticadas. *Memorias del VII Congreso Nacional de Sismología e Ingeniería Sísmica*. Barquisimeto-Venezuela.

TOVAR, C, LÓPEZ, O. A. Y TOVAR, A. G. (2004a). Error en el cálculo de la respuesta sísmica y propiedades dinámicas de estructuras aporticadas con amortiguamiento adicional. *Memorias del VII Congreso Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería y Ciencias Aplicadas*. San Cristóbal- Venezuela.

TOVAR, C AND LÓPEZ, O. A. (2004b). Effect of the position and number of dampers on the Seismic response of frame structures, *Memories of 13th World Conference on Earthquake Engineering*, Vancouver-Canada.

VELETOS, A. AND VENTURA, C. (1986). Modal analysis of non-classically damped linear systems, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 14: 217-243.

ZHANG, R. AND SOONG, T. (1992). Seismic Design of viscoelastics dampers for structural applications. *Journal of Structural Engineering*. 118(5):1375-1392.