

CRITERIO UNIFICADO PARA DISTRIBUCION EN PLANTA Y ALTURA DE DISIPADORES DE ENERGÍA EN ESTRUCTURAS ASIMÉTRICAS LINEALES SOMETIDAS A SISMO

José Luis Almazán^{a,b}, Diego López-García^a, Juan C. De la Llera^a

^a Pontificia Universidad Católica de Chile, Vicuña Mackenna 4860, Macul, Casilla 306, Correo 22, Santiago de Chile, <http://www.ing.puc.cl/ice>

^b email: jlalmaza@ing.puc.cl

Keywords: disipadores de energía, control pasivo, torsión sísmica, optimización estructural.

Resumen. La asimetría en planta es considerada por las normas de diseño sísmico y por la profesión en general como una propiedad no deseada de una estructura. De hecho, algunas normas limitan y castigan severamente la construcción de edificios fuertemente asimétricos. Sin embargo, y debido principalmente a razones arquitectónicas, estas estructuras se construyen muy frecuentemente en la práctica, haciendo indispensable el desarrollo de procedimientos para controlar su respuesta torsional. El uso de disipadores pasivos de energía es, en muchos casos, la solución práctica más aconsejable en la actualidad. Para atenuar los efectos torsionales y hacer un uso eficiente de estos disipadores, se requiere estudiar cuidadosamente tanto su distribución en altura como en planta. En los últimos 15 años se han propuesto numerosos métodos para optimizar la distribución en altura. Algunos de ellos proponen minimizar un cierto funcional definido en forma más o menos heurística, mientras que otros son aplicaciones de la teoría de control. En base a estudios sobre modelos planos de múltiples pisos, los resultados indican claramente que la reducción de la respuesta es muy sensible a la distribución en altura. Un poco más recientemente, se han propuesto también criterios para la distribución en planta de los disipadores, aunque la mayoría de ellos sólo son aplicables a modelos de un piso. Por lo tanto, no existe claridad respecto a cómo este conocimiento puede aplicarse a estructuras reales. Para ayudar a resolver este problema, se presenta en este trabajo un método que permite encontrar la distribución en planta y en altura en forma simultánea. El método consiste en minimizar un funcional calculado a partir de las deformaciones de entrepiso en los bordes del edificio, y en cada una de las dos direcciones principales. Los resultados encontrados indican que este procedimiento logra uniformar las deformaciones de entrepiso tanto en planta como en altura. Aunque en este caso se han usado modelos lineales sometidos a excitación sísmica probabilística, es posible aplicar el concepto a modelos no-lineales sometidos a cualquier tipo excitación.

1 INTRODUCCION

El diseño basado en desempeño se ha consolidado en los últimos 10 años como el nuevo paradigma de la ingeniería sísmica. Este enfoque facilita al ingeniero el diseño de estructuras que cumplan con un cierto nivel de desempeño sísmico compatible con los códigos vigentes. Sin embargo, para movimientos sísmicos de gran intensidad es prácticamente imposible o bien antieconómico diseñar estructuras convencionales con altos niveles de desempeño (daño menor). El uso de disipadores de energía como sistema secundario capaz de absorber buena parte de la energía proveniente del movimiento del suelo, es sin dudas la alternativa más atractiva que existe en la actualidad para mejorar sustancialmente el desempeño estructural.

Sin embargo el costo de fabricación e instalación de estos dispositivos, hace necesario optimizar su cantidad y ubicación dentro de la estructura. Basados en diferentes algoritmos de optimización, las primeras investigaciones estudiaron el problema de distribución en altura de dispositivos lineales (disipadores viscosos y visco-elásticos) en estructuras de marcos planos en rango lineal (Gluck et al, 1996; Takewaki, 1997; Singh and Moreschi, 2001). Aunque estos métodos proporcionan altos grados de eficiencia, su aplicación práctica no resulta simple. Zhang and Soong (1992) propusieron un procedimiento denominado Sequential Search Algorithm (SSA), cuya aplicación práctica es relativamente simple, entregando resultados comparables con los más sofisticados algoritmos de optimización. El procedimiento SSA se ha aplicado también a estructuras asimétricas (Wu et al, 1997) y su eficiencia ha sido posteriormente validada (Shukla and Datta, 1999). Una versión simplificada denominada Simplified Sequential Search Algorithm (SSSA), fue propuesta por López-García (1997) y su eficiencia posteriormente validada (López-García and Soong, 2002).

El uso de disipadores de energía para corregir problemas torsionales en estructuras asimétricas ha sido estudiado más recientemente. A través de estudios paramétricos de modelos asimétricos de un piso Goel (2001) y Lin and Chopra (2001) proporcionaron las primeras claves para el entendimiento de este problema. En estos trabajos se sugiere que, en relación al centro de masa, el denominado centro de amortiguamiento suplementario debería ubicarse en la posición opuesta al centro de rigidez (mirror criteria). Se concluye también que los disipadores de energía deben situarse en los planos resistentes periféricos. En una serie de trabajos más recientes (ver De la Llera et al, 2005; Vial et al, 2006; García et al, 2007) se propuso el concepto de balance torsional, que consiste en distribuir los disipadores de energía de manera de minimizar la correlación estadística entre los movimientos traslacionales y rotacionales (correlación torsional) en el centro geométrico de la planta, definido como el punto medio entre los bordes. Según este criterio, la ubicación óptima del centro de amortiguamiento suplementario depende principalmente de la cantidad de amortiguamiento y de la rigidez torsional de la estructura primaria. Cuando la cantidad de amortiguamiento es suficientemente grande, es posible anular la correlación torsional, lo cual conduce a iguales demandas de desplazamiento en los bordes. Esta idea ha sido validada experimentalmente en mesa vibradora a través de estudios de modelos asimétricos a escala de uno y seis pisos (ver Vial et al, 2006; García et al, 2007).

Sólo muy recientemente, Lavan and Levy (2005, 2006a, 2006b, 2006c) han publicado una serie de cuatro artículos donde desarrollan algoritmos de optimización que introducen explícitamente índices de desempeño como funciones objetivo, tanto para estructuras lineales como no lineales con disipadores de energía. Sólo en el último artículo de esta serie, se analizan estructuras de marcos tridimensionales lineales con irregularidades en planta y en altura. Utilizando una base de registros reales de gran intensidad, los resultados obtenidos indican que los disipadores de energía permiten alcanzar efectivamente los niveles de

desempeño establecidos.

A pesar de la abundante investigación realizada en temas relacionados con el diseño y el análisis de estructuras con disipadores de energía, parte de la cual se ha resumido en esta breve introducción, parece necesario definir más claramente un criterio unificado para distribuir eficientemente disipadores de energía tanto en planta como en altura, como también proponer procedimientos simples y eficaces para el uso profesional.

2 CRITERIO DE OPTIMIZACION PROPUESTO: MIN-MAX ALGORITHM

Para un cierto nivel de riesgo, la ingeniería sísmica moderna reconoce que un buen diseño estructural debe lograr dos objetivos fundamentales: (1) limitar el daño a rangos aceptables de acuerdo al destino, los materiales y la tipología estructural; y (2) distribuir dicho daño con la mayor uniformidad posible (distribuir el riesgo).

Los códigos de diseño sísmico se han encargado principalmente de garantizar el primer objetivo. Por ejemplo, para estructuras destinadas a uso habitacional, la Norma Chilena NCh433 limita las deformaciones inelásticas de entrepiso al 1.5% de la altura de piso. Sin embargo, el segundo objetivo aparece sólo en forma implícita a través de ciertas prescripciones que castigan irregularidades tanto en planta como en altura. A pesar de ello, razones prácticas hacen que la relación entre demanda y capacidad en los diferentes elementos estructurales no sea uniforme, siendo inevitable que en mayor o menor medida el daño se localice. Por lo tanto, podemos afirmar que los disipadores de energía no sólo deben reducir la demanda sobre la estructura principal, sino también uniformarla. Este concepto puede formularse como un problema de optimización, tal como lo han propuesto recientemente Lavan and Levy (2005, 2006a, 2006b, 2006c).

Considerando por ahora solamente sistemas lineales, el algoritmo de optimización propuesto en esta investigación, que en adelante denominaremos Min-Max Algorithm (MMA), se puede expresar como:

$$\text{Minimize: } J = \max(\|\Delta(t)\|) \quad (1)$$

Sujeto a:

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta(t) = \mathbf{L}\mathbf{q}(t) \\ \mathbf{M}\ddot{\mathbf{q}}(t) + (\mathbf{C} + \mathbf{L}^T \hat{\mathbf{C}} \mathbf{L}) \dot{\mathbf{q}}(t) + \mathbf{K}\mathbf{q}(t) = -\mathbf{M}\mathbf{R}\ddot{\mathbf{u}}_g(t) \\ \hat{\mathbf{C}} = \text{diag}(c_1, c_2, \dots, c_p) \\ \sum_{i=1}^p c_i = c_{tot} \\ c_i \geq 0 \end{array} \right.$$

donde el funcional de optimización J es el máximo en valor absoluto del vector de deformaciones de entrepiso $\Delta(p \times 1)$ medido en los planos resistentes periféricos; $\mathbf{q}(n \times 1)$ es el vector de GDL de la estructura; $\mathbf{L}(p \times n)$ es una matriz de transformación cinemática; \mathbf{M} , \mathbf{C} y \mathbf{K} son las matrices (de orden n) de masa, amortiguamiento y rigidez de la estructura primaria; $\hat{\mathbf{C}}(p \times p)$ es una matriz diagonal que contiene los amortiguamientos de los p disipadores de energía (DE); c_{tot} es la cantidad total de amortiguamiento a distribuir en toda la estructura; y $\ddot{\mathbf{u}}_g(t)$ es el vector de aceleración del suelo, siendo \mathbf{R} su matriz de incidencia sobre los GDL \mathbf{q} .

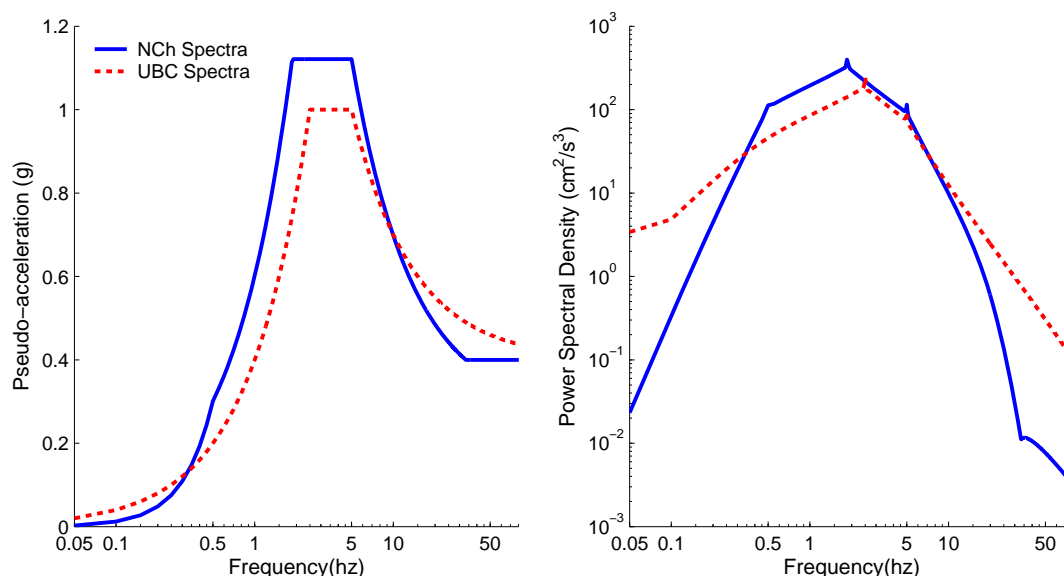


Figura 1. Espectros de diseño y curvas de DPE compatibles usadas en esta investigación.

Para obtener resultados más generales a los que pueden esperarse con el uso registro sísmicos, las componentes de la aceleración del suelo $\ddot{\mathbf{u}}_g(t)$ se han modelado como procesos aleatorios estacionarios, independientes y de ancho de banda limitado, definidos por una función de Densidad de Potencia Espectral (DPE) compatible con un espectro de diseño. Se muestran en la Figura 1 los dos espectros empleados en este estudio, el primero corresponde a la norma chilena de aislamiento sísmico (Nch2745, 2003) y el segundo al código norteamericano (Uniform Building Code, 1997), ambos para suelo firme. Desde ahora estos espectros serán referidos como NCh y UBC respectivamente.

De esta manera, empleando las conocidas herramientas del análisis espectral para procesos aleatorios estacionarios, el MMA se puede reescribir como:

$$\text{Minimize: } J = \max\left(\left(\text{diag}(\mathbf{V}_\Delta)\right)^{1/2}\right) \quad (2)$$

Sujeto a:

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta(t) = \mathbf{L}\mathbf{q}(t) \\ \mathbf{V}_\Delta = E\{\Delta(t)\Delta^T(t-\tau)\} = \int_{-\infty}^{\infty} \mathbf{H}_\Delta(j\omega)\mathbf{S}_g(\omega)\mathbf{H}_\Delta^*(j\omega)d\omega \\ \mathbf{H}_\Delta(j\omega) = \mathbf{L}\left[\mathbf{K} - \omega^2\mathbf{M} + j\omega(\mathbf{C} + \hat{\mathbf{C}})\right]^{-1}\mathbf{MR} \\ \hat{\mathbf{C}} = \text{diag}(c_1, c_2, \dots, c_p) \\ \sum_{i=1}^p c_i = c_{tot} \\ c_i \geq 0 \end{array} \right.$$

donde el funcional de optimización J es la máxima desviación estándar de las deformaciones de entrespiso; $\mathbf{V}_\Delta = E\{\Delta(t)\Delta^T(t-\tau)\}$ es la matriz de covarianza asociada al vector $\Delta(t)$, siendo $E\{\cdot\}$ el valor esperado del proceso; $\mathbf{H}_\Delta(j\omega)$ es la matriz de respuesta en frecuencia asociada

al vector $\Delta(t)$, siendo $\mathbf{H}_{\Delta}^*(j\omega)$ su correspondiente matriz transpuesta-conjugada; y $\mathbf{S}_g(\omega)$ es la matriz (diagonal) de densidad de potencia espectral del movimiento del suelo. Para resolver el problema de optimización representado anteriormente se ha utilizado la rutina *fmincon.m* (Matlab, Reference Guide).

3 RESULTADOS OBTENIDOS CON MMA

Tres modelos estructurales lineales se han analizado en este estudio. El primero de ellos, denominado M1, se muestra en la Figura 2a. Consiste es un marco plano de 2 pisos modelado como un edificio de corte, con masas $m_1=1$ y $m_2=0.8$; y rigideces de piso $k_1=16.2\pi^2$ y $k_2=0.7k_1$.

El segundo modelo analizado, denominado M2, se muestra en la Figura 2b. Consiste en una estructura mono-simétrica de un piso, con planta rectangular de lados a y $b=3a$, excentricidad estática $e_s=0.25\rho$, siendo $\rho=((a^2+b^2)/12)^{1/2}$ el radio de giro de la planta, y frecuencia natural desacoplada $\omega_y=2\pi$. Se han estudiado dos casos: (i) un modelo torsionalmente rígido (M2a) con $\Omega_s=\omega_\theta/\omega_y=1.2$, siendo ω_θ la frecuencia torsional desacoplada; y (ii) un modelo torsionalmente flexible (M2b) con $\Omega_s=0.8$.

Finalmente, el tercer modelo considerado se denomina M3, y es una estructura asimétrica tridimensional de H°A°, con 6 pisos de igual altura, cuya planta estructural se muestra esquemáticamente en la Figura 2c. Las excentricidades promedio en las direcciones X e Y son aproximadamente $e_{sx}=0.05\rho$ y $e_{sy}=0.12\rho$, respectivamente, mientras que las relaciones de rigidez torsional en ambas direcciones son $\Omega_{sx} \approx \Omega_{sy} \approx 1.25$. La frecuencia fundamental del sistema es $\omega_1=1.25\pi$. Al igual que en los restantes modelos, se ha supuesto amortiguamiento modal constante $\xi_s=0.05$ para la estructura original.

La Figura 3 presenta resultados obtenidos para el modelo M1 sometido al espectro UBC. A la izquierda se muestran las curvas de nivel correspondientes a la máxima desviación estándar de las deformaciones de entrepiso, como función de las cantidades de amortiguamiento c_1 y c_2 colocadas en cada piso. Las deformaciones se han normalizado respecto a la máxima desviación estándar de las deformaciones de entrepiso de la estructura sin DE (que corresponde en este caso al primer piso). A su vez, las cantidades c_1 y c_2 se han normalizado con respecto a una cantidad de referencia c_{ref} , la cual introduce un amortiguamiento adicional $\xi_{ad}=0.15$ en el primer modo de vibración, asumiendo una distribución uniforme en altura ($c_1 = c_2 = c_{ref}/2$). La línea AB mostrada en la figura corresponde a las soluciones en las que $c_1 = c_{tot}$ y $c_2 = 0$, donde la deformación del primer piso es mayor que en el segundo, debido a que c_{tot} no es suficiente para igualarlas. Esto ocurre, por ejemplo, para $c_{tot} = c_{ref}/2$ (punto S₁ de la figura). En cambio, la línea BC corresponde a las combinaciones (c_1, c_2) que consiguen igualar las deformaciones en ambos pisos. Los puntos S₂ y S₃ representan la distribución óptima para $c_{tot} = c_{ref}$ y $c_{tot} = 1.5c_{ref}$, respectivamente. Gráficamente, estos puntos se obtienen intersectando la línea BC con las rectas a 135° mostradas en la figura con línea segmentada. En la parte derecha, se han representado las curvas de desviación estándar en ambos pisos como función de c_1 para $c_{tot} = c_{ref}$ y $c_{tot}=1.5c_{ref}$, donde se aprecia que el punto óptimo es precisamente la intersección de las curvas.

La Figura 4a presenta un análisis análogo al mostrado en la Figura 3, pero aplicado en esta caso al modelo M2a. Nuevamente se ha empleado una cantidad de amortiguamiento c_{ref} que representa un amortiguamiento adicional $\xi_{ad}=0.15$, asumiendo una distribución uniforme en planta ($c_1 = c_2 = c_{ref}/2$). La línea BC, que llamaremos ahora línea de balance torsional (De la Llera et al, 2005) corresponde a las combinaciones (c_1, c_2) que consiguen igualar las demandas de deformación en ambos bordes, donde c_1 es el amortiguamiento adicional

colocado en el borde flexible, y c_2 en el borde rígido. Por tratarse de un modelo torsionalmente rígido, donde la máxima deformación de entrepiso de la estructura original se produce en el borde flexible, el MMA entrega valores de c_1 mayores que c_2 . La Figura 4b muestra los resultados obtenidos en el modelo torsionalmente flexible M2b. En este caso, las máximas deformaciones de entrepiso de la estructura original se producen en el borde rígido (De la Llera et al, 2005), lo cual explica que el MMA entregue valores de c_1 menores que c_2 en este caso.

Los resultados anteriores indican que el MMA puede resolver indistintamente problemas de distribución en altura y en planta. A que a medida que aumenta la cantidad de amortiguamiento adicional se logra no sólo disminuir la demanda de deformación máxima, sino también aumentar el grado de uniformidad.

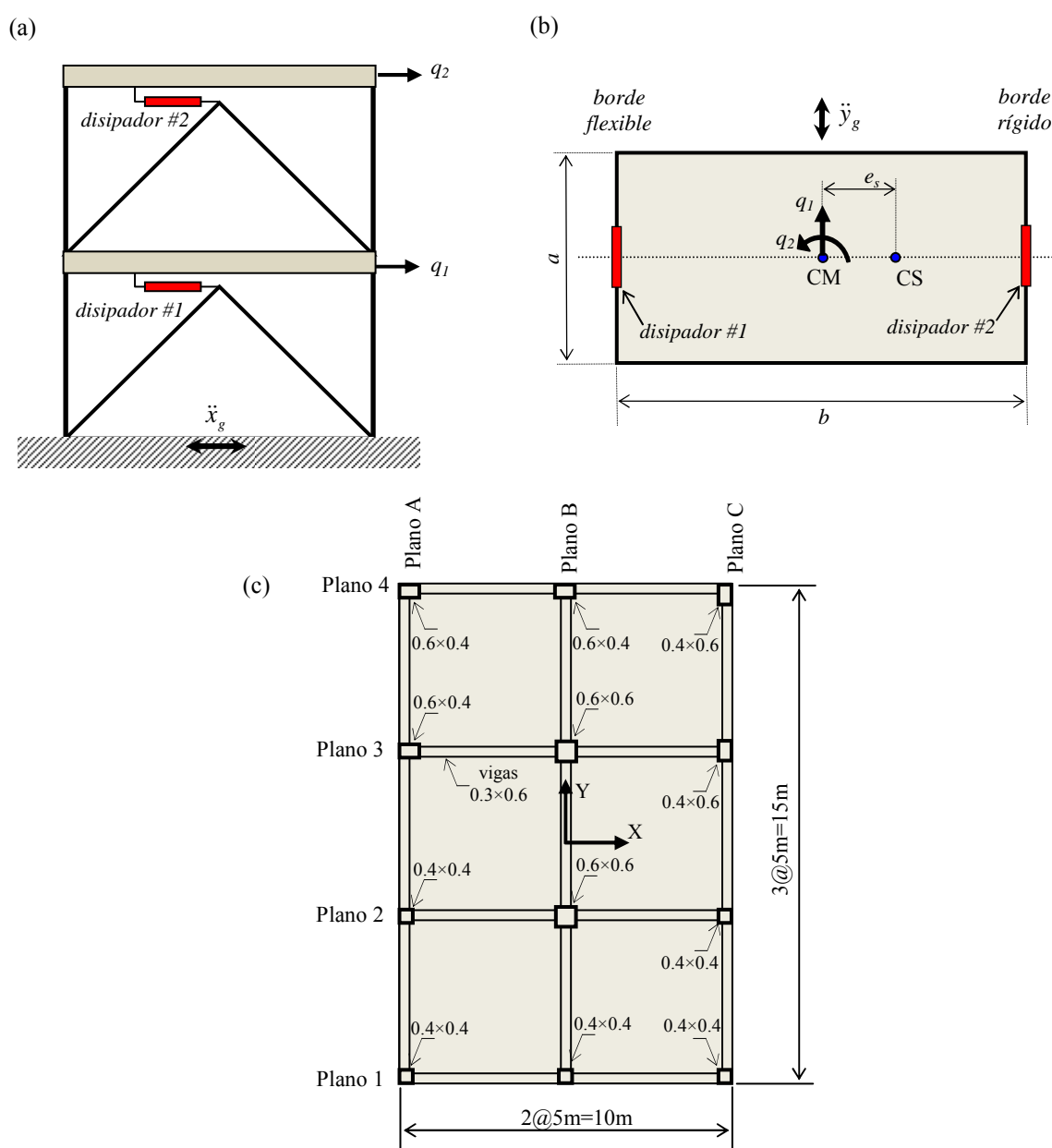


Figura 2. Modelos estructurales empleados en esta investigación: (a) marco plano de 2 pisos (M1); (b) edificio mono-simétrico de un piso (M2); y (c) edificio asimétrico de seis pisos (M3).

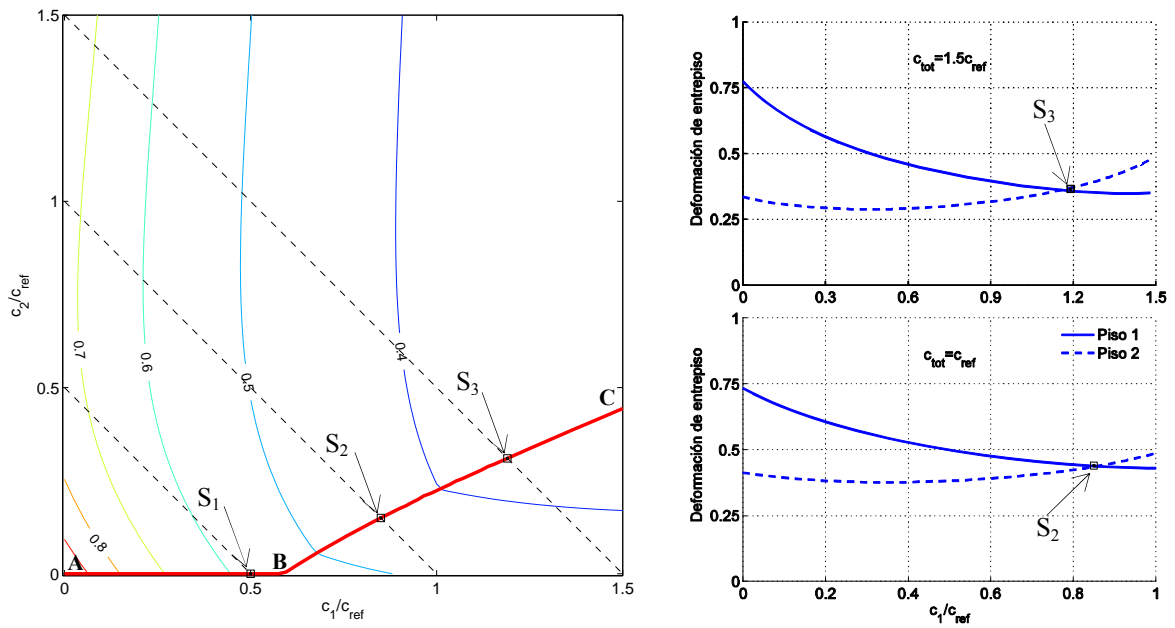
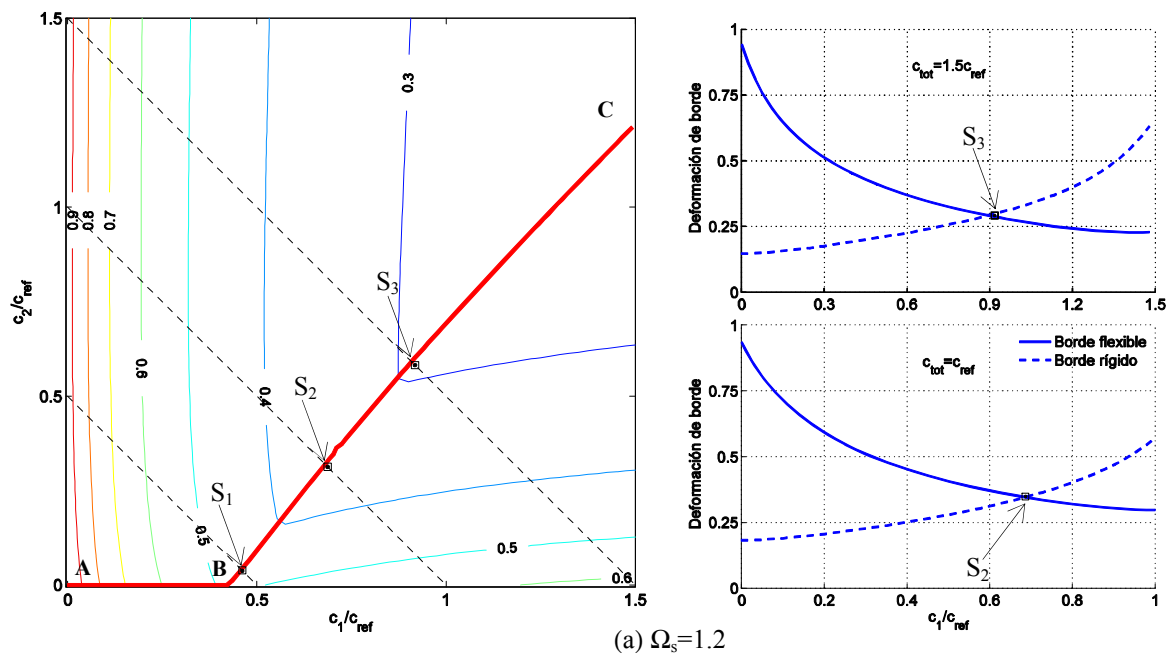


Figura 3. Curvas de nivel de la deformación estándar máxima normalizada (izquierda) y soluciones óptimas para $c_{tot}=c_{ref}$ y $1.5c_{ref}$ (derecha). Modelo M1 sometido a espectro UBC.



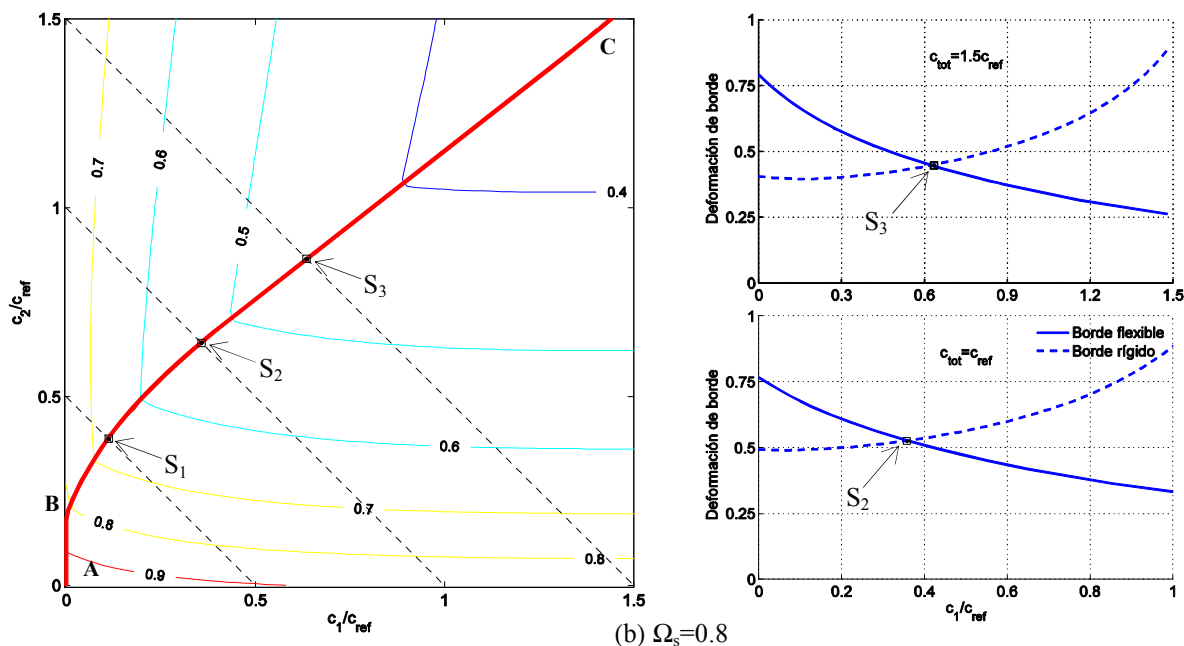


Figura 4. Curvas de nivel del funcional de minimización (izquierda) y solución óptima para $c_{tot} = c_{ref}$ y $1.5c_{ref}$ (derecha): (a) Modelo M2a ($\Omega_s=1.2$) y (b) Modelo M2b ($\Omega_s=0.8$). Resultados para espectro NCh.

Se analizan a continuación los resultados obtenidos en el modelo asimétrico tridimensional M3. La Tabla 1 presenta las desviaciones estándar de las deformaciones de entrepiso calculadas en los 6 pisos y en los 4 planos resistentes periféricos, para los espectros NCh y UBC. Se indican las deformaciones correspondientes a la estructura con y sin DE. Puede apreciarse que las deformaciones de la estructura original se concentran en los pisos 2 y 3, y en los planos resistentes 1 y A.

Piso	Desviación estándar de las deformaciones de entrepiso (cm) (*)									
	NCh					UBC				
	Plano resistente					Plano resistente				
	1	4	A	C	Prom.	1	4	A	C	Prom.
1	0.395 (1.10)	0.266 (0.44)	0.351 (0.86)	0.306 (0.68)	0.329 (0.77)	0.276 (0.74)	0.180 (0.29)	0.243 (0.58)	0.210 (0.46)	0.227 (0.52)
2	0.511 (1.74)	0.511 (0.79)	0.511 (1.39)	0.511 (1.17)	0.511 (1.27)	0.345 (1.16)	0.345 (0.52)	0.345 (0.92)	0.345 (0.78)	0.345 (0.84)
3	0.511 (1.70)	0.511 (0.82)	0.511 (1.36)	0.511 (1.17)	0.511 (1.26)	0.345 (1.13)	0.345 (0.54)	0.345 (0.90)	0.345 (0.78)	0.345 (0.84)
4	0.511 (1.46)	0.447 (0.72)	0.496 (1.16)	0.468 (1.02)	0.481 (1.09)	0.345 (0.98)	0.309 (0.48)	0.341 (0.78)	0.322 (0.68)	0.329 (0.73)
5	0.446 (1.11)	0.351 (0.56)	0.411 (0.88)	0.379 (0.78)	0.397 (0.81)	0.341 (0.76)	0.247 (0.38)	0.291 (0.60)	0.266 (0.53)	0.286 (0.57)
6	0.316 (0.72)	0.241 (0.38)	0.275 (0.57)	0.256 (0.51)	0.272 (0.54)	0.228 (0.51)	0.172 (0.27)	0.200 (0.40)	0.184 (0.35)	0.196 (0.38)
Prom.	0.45 (1.30)	0.39 (0.62)	0.43 (1.04)	0.40 (0.89)	0.42 (0.96)	0.31 (0.88)	0.30 (0.41)	0.29 (0.70)	0.28 (0.60)	0.30 (0.65)

Tabla 1. Desviación estándar de las deformaciones de entrepiso para el modelo M3 con y sin DE. (*) los valores entre paréntesis corresponden a la estructura sin DE.

Por su parte la Tabla 2 muestra la distribución de amortiguamiento adicional que entrega el MMA. Es muy interesante notar que justamente en las posiciones donde el amortiguamiento adicional es mayor que cero, las deformaciones alcanzadas son máximas y exactamente iguales entre sí (dichas posiciones se muestran destacadas en ambas tablas). En las ubicaciones donde el amortiguamiento adicional es nulo, las deformaciones resultan menores. Estos resultados son una generalización de los ya presentados para los modelos M1 y M2 (Figuras 3 y 4). Nótese también que la distribución de amortiguamiento adicional es muy poco sensible al espectro considerado.

Piso	Amortiguamiento suplementario (% de c_{tot})									
	NCh					UBC				
	Plano resistente					Plano resistente				
	1	4	A	C	Σ	1	4	A	C	Σ
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	13.9	5.6	15.3	10.2	45.0	14.1	5.8	15.3	10.2	45.4
3	11.2	12.9	12.3	12.4	48.8	10.9	12.7	12.2	12.3	48.1
4	6.2	0.1	0	0	6.2	6.5	0	0	0	6.5
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Σ	31.3	18.6	27.6	22.6	100	31.5	18.5	27.5	22.5	100

Tabla 2. Distribución en planta y en altura del amortiguamiento suplementario para el modelo M3 obtenida con MMA.

4 LOS MÉTODOS SECUENCIALES Y EL MMA

Los resultados mostrados en la sección anterior indican que el MMA es una herramienta muy promisoría para obtener una distribución de DE que satisfaga los objetivos fundamentales del diseño estructural. Sin embargo, y aún en el caso de sistemas lineales, su aplicación requiere de un poderoso algoritmo de optimización, que en general no está disponible en los programas más usados en la profesión.

Posiblemente el método más apropiado para salvar este inconveniente es el denominado Simplified Sequential Search Algorithm (SSSA) (López-García, 2001; López-García and Soong, 2002). Este algoritmo puede resumirse de la siguiente manera: (1) decidir a priori las ubicaciones donde potencialmente se colocarán los DE; (2) en base al cálculo de ciertos índices de respuesta, colocar secuencialmente cantidades fijas de amortiguamiento adicional sólo en la ubicación donde dicho índice es máximo; y (3) repetir el paso anterior hasta alcanzar un cierto desempeño. Por su propia lógica, es posible pensar que este algoritmo secuencial entregue resultados similares al MMA. Así lo confirman los resultados mostrados en la Figura 5, donde se comparan las soluciones obtenidas con MMA y SSSA para los modelos M2 y M3b. En el primer caso el incremento secuencial es igual a $c_{ref}/10$, mientras que en el segundo es igual a $c_{ref}/20$. Es evidente que a medida que este incremento disminuye, ambos métodos convergen a la misma solución. Esta coincidencia no es sorprendente si reconocemos que cada paso del SSSA es en realidad una solución aproximada del MMA, donde el amortiguamiento adicional no se reparte en la estructura, sino que se asigna completamente al piso donde la demanda es máxima. En otras palabras, todos los recursos se asignan a la variable que más afecta al funcional de minimización.

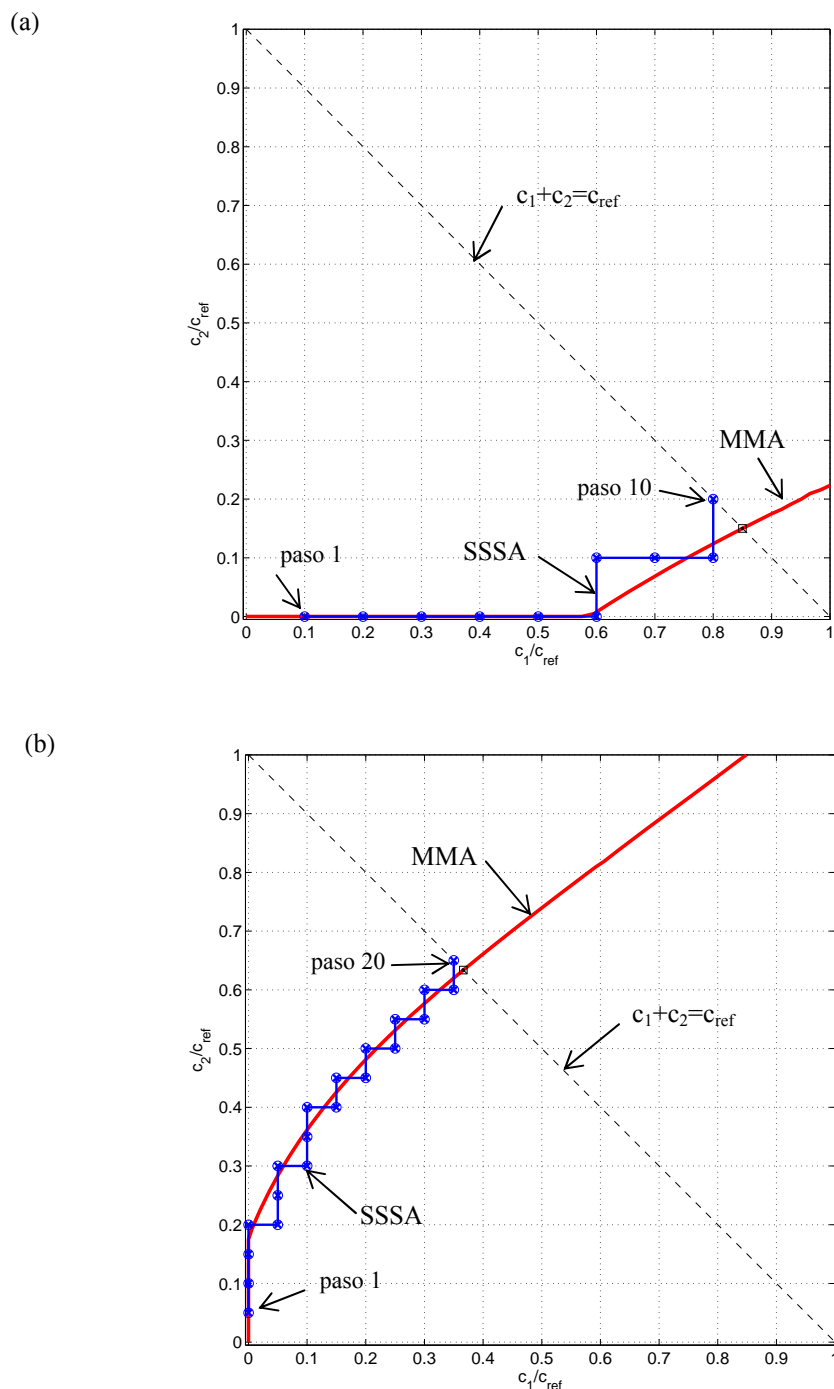


Figura 5. Comparación entre MMA y SSSA para $c_{tot}=c_{ref}$: (a) modelo M1; y (b) modelo M2b.

La Tabla 3 presenta la distribución de amortiguamiento adicional obtenida con el SSSA aplicado al modelo M3, para un incremento secuencial igual a $c_{tot}/48$. Es interesante destacar que el resultado mostrado en esta tabla es exactamente el mismo para ambos espectros, y a su vez muy similar al presentado en la Tabla 2, donde el efecto de la excitación considerada era prácticamente despreciable.

Finalmente, es muy importante destacar que por tratarse de un algoritmo directo que no requiere iteración, el costo computacional del SSSA es mucho menor al MMA.

Piso	Amortiguamiento suplementario (% de c_{tot})				
	Planos resistentes				Σ
	1	4	A	C	
1	0	0	0	0	0
2	14.6(7/48)	6.2(3/48)	14.6(7/48)	10.4(5/48)	45.8(22/48)
3	10.4(5/48)	12.5(6/48)	12.5(6/48)	12.5(6/48)	47.9(23/48)
4	6.2(3/48)	0	0	0	6.2(3/48)
5	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0
Σ	31.2(15/48)	18.8(9/48)	27.1(13/48)	22.9(11/48)	100(48/48)

Tabla 3. Distribución en planta y en altura del amortiguamiento suplementario para el modelo M3 obtenida con SSSA

5 CONCLUSIONES

Se propone en este artículo un algoritmo de optimización para distribuir disipadores de energía en estructuras sometidas a movimientos sísmicos. Este algoritmo, denominado Min-Max Criteria (MMA), utiliza como funcional de optimización la deformación de entrepiso máxima medida en los planos resistentes periféricos. Aunque en este caso se han analizado solamente modelos lineales sometidos a excitación sísmica probabilística, es posible aplicar la misma idea a modelos no-lineales sometidos a cualquier tipo excitación.

Los resultados encontrados indican que a medida que se aumenta la cantidad total de amortiguamiento suplementario, con la aplicación del MMA se consigue no sólo reducir la demanda sino también uniformarla. De hecho se observa que en todas las posiciones periféricas donde el algoritmo introduce amortiguamiento adicional, las demandas de deformación son máximas y prácticamente iguales entre si. En el resto de las posiciones tanto periféricas como interiores de la estructura, donde no es necesario colocar amortiguamiento adicional, la demanda de deformación resulta siempre menor.

Se ha demostrado también que el MMA puede aplicarse en forma aproximada a través del conocido procedimiento secuencial denominado Simplified Sequential Search Algorithm (SSSA), cuya implementación práctica resulta muy simple e intuitiva para los diseñadores.

REFERENCIAS

- Gluck N, Reinhorn AM, Gluck J, Levy R. Design of supplemental dampers for control of structures. *Journal of Structural Engineering (ASCE)*. 122(12):1394–1399, 1996.
- Takewaki I. Optimal damper placement for minimum transfer functions. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 26(11):1113–1124, 1997.
- Singh MP, Moreschi LM. Optimal seismic response control with dampers. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 30(4):553–572, 2001..
- Zhang RH, Soong TT. Seismic design of viscoelastic dampers for structural applications. *Journal of Structural Engineering (ASCE)*, 118(5):1375–1392, 1992.
- Wu B, Ou JP, Soong TT. Optimal placement of energy dissipation devices for three-dimensional structures. *Engineering Structures*, 19(2):113–125, 1997.

- Shukla AK, Datta TK. Optimal use of viscoelastic dampers in building frames for seismic force. *Journal of Structural Engineering (ASCE)*, 125(4):401–409, 1999.
- Lopez Garcia D. A simple method for the design of optimal damper configurations in MDOF structures. *Earthquake Spectra*, 17(3):387–398, 2001.
- Lopez Garcia D. and Soong TT. Efficiency of a simple approach to damper allocation in MDOF structures. *Journal of Structural Control*, 9: 19–30, 2002.
- Goel, RK. Simplified analysis of asymmetric structures with supplemental damping. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 30(9): 1399–1416, 2001.
- Lin, WH and Chopra, AK. Understanding and predicting effects of supplemental viscous damping on seismic response of asymmetric one-storey systems. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 30(9), 1475–1494, 2001.
- De la Llera JC, Almazán JL, Vial IJ. Torsional balance of plan-asymmetric structures with frictional dampers: analytical results. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 34: 1089-1108, 2005.
- Vial IJ, de la Llera JC, Almazán JL, Ceballos V. Torsional balance of plan-asymmetric structures with frictional dampers: experimental results. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 35: 1875-1898, 2006.
- García M, De la Llera JC, Almazán JL. Torsional balance of plan asymmetric structures with viscoelastic dampers. *Engineering Structures*, 29: 914-932, 2007.
- Lavan O. and Levy R. Optimal design of supplemental viscous dampers for irregular shear-frames in the presence of yielding. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 34:889–907, 2005.
- Lavan O. and Levy R. Optimal design of supplemental viscous dampers for linear framed structures. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 35:337–356, 2006.
- Levy R. and Lavan O. Fully stressed design of passive controllers in framed structures for seismic loadings. *Struct. Multidisc. Optim.*, 32: 485–498, 2006.
- Lavan O. and Levy R. Optimal Peripheral Drift Control of 3D Irregular Framed Structures Using Supplemental Viscous Dampers. *Journal of Earthquake Engineering*, 10(6):903–923, 2006.
- Nch2745.c2003. Análisis y diseño de edificios con aislación sísmica. *Instituto Nacional de Normalización*. Santiago, Chile.
- Uniform Building Code. Earthquake regulations for seismic isolated structures. Whittier (CA); 1997.
- Matlab, Reference Guide, The Mathworks Inc: Natick, MA.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación ha sido financiada por la Comisión Nacional de Investigación Científica y Tecnológica (CONICYT), a través del Proyecto Fondecyt N°1085282. La participación en este congreso ha sido financiada por la Dirección de Investigación y Postgrado de la Pontificia Universidad Católica de Chile. Los autores agradecen el apoyo recibido.