

DISMINUCIÓN DE EFECTOS TORSIONALES DE ESTRUCTURAS SISMORRESISTENTES CON EL USO DE MÚLTIPLES AMORTIGUADORES DE MASA SINTONIZADOS

Ricardo Bassotti^a y Daniel Ambrosini^b

^aFacultad Regional San Rafael, Universidad Tecnológica Nacional
Gral. Paz y Urquiza (5600) San Rafael, Mendoza. Fax: 54 2627 421078
e-mail: rbassotti@frsr.utn.edu.ar, <http://www.frsr.utn.edu.ar>

^bFacultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Cuyo. Centro Universitario - Parque Gral. San
Martín - (5500) Mendoza. Fax 54 0261 4380120. dambrosini@uncu.edu.ar,
<http://leonardo.uncu.edu.ar:9673/fing/posgrados/estructural>

Palabras Clave: Disipación de energía, acciones sísmicas, amortiguadores de masa.

Resumen. Una de las soluciones alternativas para los problemas de seguridad estructural e incomodidad ante las vibraciones en edificios altos, es la utilización del concepto de control pasivo de vibraciones (sin energía externa), en particular los amortiguadores de masa sintonizados (AMS).

En edificios asimétricos en los cuales el centro de masa no coincide con el centro de torsión, se produce un acoplamiento entre las vibraciones flexionales y torsionales que puede llevar a un incremento de solicitaciones en secciones críticas conduciendo al colapso estructural. En este caso, la instalación de Amortiguadores de Masa Sintonizados en posiciones apropiadas tiene un doble beneficio: Por un lado disipa la energía ingresada por el sismo a la estructura y por otro disminuye los esfuerzos torsionales al aplicar un momento torsor fuera de fase con la excitación.

En este trabajo, se utiliza un modelo físico de la estructura basado en un modelo general de vigas. La formulación inicial, basada en las hipótesis de Vlasov, fue modificada permitiendo la inclusión de deformaciones angulares inducidas por el esfuerzo de corte, sección variable en la dirección longitudinal e inercias rotacionales en las ecuaciones de movimiento. Se utiliza un método de integración numérica conjuntamente con el algoritmo de la transformada rápida de Fourier (FFT) para trabajar en el dominio de la frecuencia.

En trabajos anteriores se presentó la formulación acoplada, se realizó la validación de la herramienta numérica y se realizaron ejemplos numéricos con edificios asimétricos para tener una cuantificación preliminar de la importancia de la reducción alcanzada, utilizando un solo dispositivo AMS. En este trabajo se incorpora la influencia del giro torsional en la cinemática del modelo y se realiza un estudio numérico de la eficiencia de utilización de varios AMS en la disminución de esfuerzos torsionales en edificios asimétricos, solicitados por la acción de sismos en la base.

Se determinó que cuando se utilizan varios AMS al adoptar la disposición más distribuida se obtienen los mejores resultados en la disminución de los valores del momento torsor en la base, por la participación en la respuesta de los dispositivos orientados según las dos direcciones.

1 INTRODUCCIÓN

Los edificios modernos y las torres tienden a ser muy livianos y delgados, por lo tanto poseen un amortiguamiento natural muy pequeño, lo que las hace más propensos a las oscilaciones del viento y los sismos. Dichas oscilaciones pueden causar daño a la estructura, afectar su funcionalidad y/o causar incomodidad. Los amortiguadores de masa sintonizados (AMS) son una clase de amortiguadores pasivos que se utilizan en torres y edificios para la reducción de vibraciones.

Den Hartog (1985) demostró que para sistemas de un grado de libertad no amortiguados, la amplitud de vibración del sistema excitado es nula cuando la frecuencia de excitación es igual a la frecuencia del AMS, indicando que toda la energía del sistema fue transferida al AMS.

La frecuencia natural del dispositivo se sintoniza cerca de la frecuencia natural del sistema principal provocando que el AMS vibre en resonancia, disipando la energía absorbida a través de los mecanismos de amortiguamiento del mismo.

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), relación de amortiguamiento y la relación de masa.

Una de las principales ventajas de los AMS es que pueden ser colocados en estructuras existentes con problemas de vibraciones excesivas que son perceptibles por las personas o para el mejoramiento de la seguridad sísmica en estructuras levemente dañadas o sanas.

Sadek et al. (1997) proponen un método para estimar los parámetros óptimos de AMS para su aplicación ante sollicitaciones sísmicas. Chang (1999) propone para tres tipos de amortiguadores de masa fórmulas de diseño de sus parámetros para los casos de viento y sismo. Pinkaew et al. (2003) estudian la efectividad del uso de AMS en estructuras bajo acción sísmica. Almazán et al. (2007) proponen un nuevo dispositivo al que denominan AMS bidireccional y homogéneo (BH-TMD) el cual ofrece respuestas similares a los dispositivos lineales viscosos ante excitación sísmica uni-direccional y bi-direccional.

El uso de múltiples AMS para el control de la respuesta estructural bajo acción sísmica ha sido estudiado por muchos investigadores. Park y Reed (2001) realizan un análisis para sistemas con AMS uniforme y linealmente distribuidos bajo excitación armónica y sísmica. Li y Liu (2003) analizan estructuras con múltiples AMS con excitación sísmica basado en la distribución uniforme de los parámetros del sistema. Li y Qu (2006) usando múltiples AMS analizan las propiedades óptimas de los mismos para reducir la respuesta traslacional y torsional de estructuras sometidas a aceleración de la base. Almazán et al. (2007) proponen aplicar el concepto del denominado balance torsional que consiste en anular la correlación entre la rotación y el desplazamiento medido en el centro geométrico de cada nivel

En este trabajo se incorpora la influencia del giro torsional en la cinemática del modelo y se realiza un estudio numérico de la eficiencia de utilización de múltiples AMS en la respuesta de un edificio ante acción sísmica en la base, localizando los mismos en el extremo superior y utilizando distintas distribuciones en plantas.

2 MODELOS DESARROLLADOS

2.1 Modelo de estructura

Para modelar la estructura se utilizó una formulación de continuo partiendo de un esquema de análisis de estructuras de pared delgada y sección abierta en el dominio de la frecuencia Ambrosini (1991) (ver Figura 1).

El modelo físico de la estructura está constituido por las ecuaciones de la teoría de *Vlasov* modificadas con la incorporación de las deformaciones angulares inducidas por el esfuerzo de corte, sección variable en la dirección longitudinal e inercias rotacionales en los esfuerzos internos (Ambrosini et al., 1995). Se adopta una ley constitutiva viscoelástica lineal general, la cual permite introducir amortiguamiento a la estructura. Con estos elementos se llega a un conjunto de tres ecuaciones diferenciales parciales de cuarto orden con tres incógnitas o, luego de realizar la transformada de Fourier para trabajar en el dominio de la frecuencia, un sistema equivalente en variables de estado de doce ecuaciones diferenciales parciales de primer orden con 12 incógnitas.

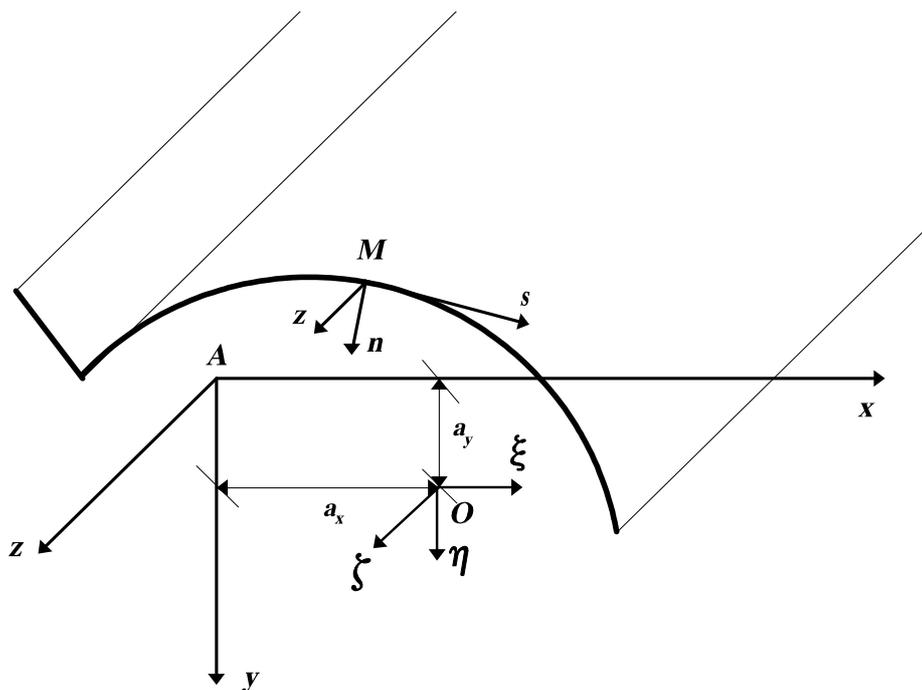


Figura 1: Modelo general de viga. Definición de variables

Si se adoptan como variables de estado los desplazamientos según los ejes x e y , ξ y η , los giros de flexión respecto de esos ejes, ϕ_x y ϕ_y ; los esfuerzos de corte Q_x y Q_y ; los momentos flectores M_x y M_y ; el giro de torsión y su derivada espacial θ y θ' , el momento torsor total M_T y el bimomento B ; se tiene:

$$\mathbf{v}(z, \omega) = \{\eta, \phi_y, Q_y, M_x, \xi, \phi_x, Q_x, M_y, \theta, \theta', M_T, B\}^T \quad (1)$$

Con \mathbf{v} = vector de estado. El sistema es:

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial z} = \mathbf{A} \mathbf{v} + \mathbf{q} \quad (2)$$

Donde \mathbf{A} es la matriz del sistema y \mathbf{q} el vector de carga externa:

$$\mathbf{q}(z, \omega) = \{0, 0, -q_x, 0, 0, 0, -q_y, 0, 0, 0, -m_A, 0\}^T \quad (3)$$

q_x y q_y son cargas externas por unidad de longitud y m_A el momento torsor externo por unidad de longitud. Debe aclararse que, por comodidad, se ha mantenido la notación de las deformaciones y esfuerzos generalizados en el dominio de la frecuencia, aunque estas funciones son dependientes de z y ω y no de z y t como las variables originales. Si, para facilitar la solución numérica, se separan la parte real e imaginaria de todas las funciones y se incorpora la ley constitutiva viscoelástica, el sistema será de 24 ecuaciones con 24 incógnitas.

Obviamente, en aplicaciones numéricas se utiliza el algoritmo de la transformada rápida de Fourier (FFT). Entonces, para cada frecuencia ω , puede resolverse el problema definido por las ecuaciones (2) más las condiciones de contorno usando métodos de integración numérica estándares como así también técnicas para transformar un problema de valores de borde en dos puntos en un problema de valores iniciales. Si se repite este procedimiento para todo el conjunto de frecuencias ω , se puede obtener la FFT de las componentes del vector de estado. Por último, puede realizarse la transformada inversa de las variables de interés para obtener las mismas en el dominio del tiempo.

2.2 Modelo de AMS

Con el objetivo de resaltar la notación utilizada, se disponen dos AMS, cada uno orientado según las direcciones principales del piso superior (ver Figuras 2 y 3).

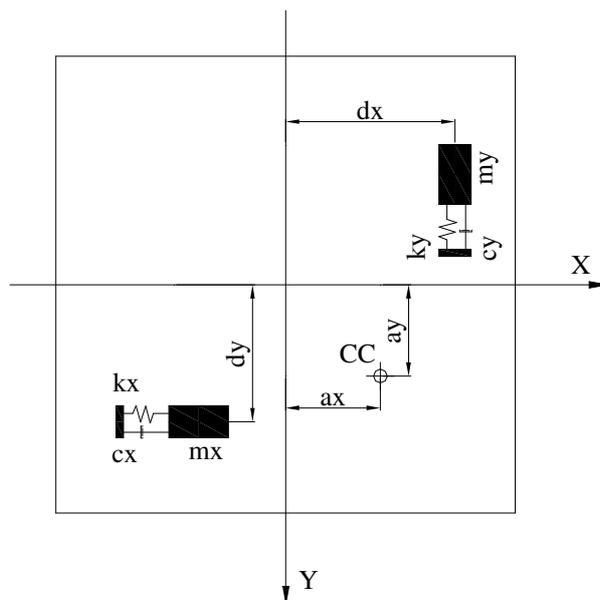


Figura 2: Localización de los AMS en planta

Se formulan las ecuaciones de movimiento para carga sísmica teniendo en cuenta el giro θ del piso superior, en el dominio del tiempo, y se tiene

$$\begin{aligned}
 m_x \ddot{x}(t) + c_x \dot{x}(t) + k_x x(t) &= -m_x \ddot{\xi}(t) - m_x \ddot{\xi}_G(t) + m_x \ddot{\theta}(d_y - a_y) \\
 m_y \ddot{y}(t) + c_y \dot{y}(t) + k_y y(t) &= -m_y \ddot{\eta}(t) - m_y \ddot{\eta}_G(t) - m_y \ddot{\theta}(d_x - a_x)
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

Donde x e y son los desplazamientos relativo del AMS respecto a la estructura, m_x, c_x, k_x : m_y, c_y, k_y : masa, amortiguamiento y rigidez del amortiguador en la direcciones x e y respectivamente. $\ddot{\xi}_g$ y $\ddot{\eta}_g$ son las aceleraciones del terreno en la direcciones x e y respecto a un eje de referencia fijo. $\ddot{\xi}$ y $\ddot{\eta}$ son las aceleraciones relativas del último piso de la estructura respecto del terreno, en la direcciones x e y . θ el giro en el último piso de la estructura, d_x, d_y las coordenadas de ubicación del disipador en la planta de la estructura y a_x, a_y las coordenadas del centro de corte.

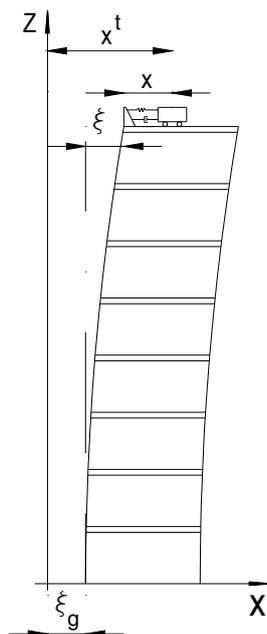


Figura 3: Coordenadas del modelo Estructura-AMS (Plano X-Z)

Se trabaja en el dominio de la frecuencia, por lo que se realiza la transformada de Fourier de (4) obteniendo:

$$\begin{aligned}
 -m_x \omega^2 x + ic_x \omega x + k_x x &= \omega^2 m_x \xi - m_x g_1 - \omega^2 m_x \theta (d_y - a_y) \\
 -m_y \omega^2 y + ic_y \omega y + k_y y &= \omega^2 m_y \eta - m_y g_2 + \omega^2 m_y \theta (d_x - a_x)
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

Donde se llama: $\ddot{\xi}_g = g_1(\omega)$ y $\ddot{\eta}_g = g_2(\omega)$. Entonces:

$$x = \frac{m_x(\omega^2 \xi - g_1 - \omega^2 \theta(d_y - a_y))}{-m_x \omega^2 + ic_x \omega + k_x}$$

$$y = \frac{m_y(\omega^2 \eta - g_2 + \omega^2 m_y \theta(d_x - a_x))}{-m_y \omega^2 + ic_y \omega + k_y}$$
(6)

Separando la parte real de la imaginaria de las ecuaciones (6) se obtiene:

$$x_r = \omega^2 r_{2x} \xi_i + \omega^2 r_{3x} \xi_r - r_{3x} g_{1r} - r_{2x} g_{1i} - \omega^2 r_{3x} (d_y - a_y) \theta_r - \omega^2 r_{2x} (d_y - a_y) \theta_i$$

$$x_i = \omega^2 r_{3x} \xi_i - \omega^2 r_{2x} \xi_r + r_{2x} g_{1r} - r_{3x} g_{1i} + \omega^2 r_{2x} (d_y - a_y) \theta_r - \omega^2 r_{3x} (d_y - a_y) \theta_i$$
(7)

$$y_r = \omega^2 r_{2y} \eta_i + \omega^2 r_{3y} \eta_r - r_{3y} g_{2r} - r_{2y} g_{2i} + \omega^2 r_{3y} (d_x - a_x) \theta_r + \omega^2 r_{2y} (d_x - a_x) \theta_i$$

$$y_i = \omega^2 r_{3y} \eta_i - \omega^2 r_{2y} \eta_r + r_{2y} g_{2r} - r_{3y} g_{2i} - \omega^2 r_{2y} (d_x - a_x) \theta_r + \omega^2 r_{3y} (d_x - a_x) \theta_i$$
(8)

Donde se denomina:

$$r_{1x} = k_x - \omega^2 m_x \quad r_{1y} = k_y - \omega^2 m_y$$

$$r_{2x} = \frac{\omega c_x m_x}{(r_{1x}^2 + \omega^2 c_x^2)} \quad r_{2y} = \frac{\omega c_y m_y}{(r_{1y}^2 + \omega^2 c_y^2)}$$

$$r_{3x} = \frac{r_{1x} m_x}{(r_{1x}^2 + \omega^2 c_x^2)} \quad r_{3y} = \frac{r_{1y} m_y}{(r_{1y}^2 + \omega^2 c_y^2)}$$

Las fuerzas en la dirección x e y y el momento torsor provocados por los amortiguadores de masa sintonizados en el extremo superior de la estructura son:

$$f_x = k_x x + c_x \dot{x}$$

$$f_y = k_y y + c_y \dot{y}$$

$$M_t = (d_x - a_x)(k_y y + c_y \dot{y}) - (d_y - a_y)(k_x x + c_x \dot{x})$$
(9)

En el dominio de la frecuencia se obtiene:

$$f_x = k_x x + ic_x \omega x$$

$$f_y = k_y y + ic_y \omega y$$

$$M_t = (d_x - a_x)(k_y y + ic_y \omega y) - (d_y - a_y)(k_x x + ic_x \omega x)$$
(10)

Separando las partes real e imaginaria:

$$\begin{aligned}
 f_{xr} &= k_x x_r - c_x \omega x_i \\
 f_{xi} &= k_x x_i + c_x \omega x_r \\
 f_{yr} &= k_y y_r - c_y \omega y_i \\
 f_{yi} &= k_y y_i + c_y \omega y_r \\
 M_{tr} &= (d_x - a_x)(k_y y_r - c_y \omega y_i) - (d_y - a_y)(k_x x_r - c_x \omega x_i) \\
 M_{ti} &= (d_x - a_x)(k_y y_i + c_y \omega y_r) - (d_y - a_y)(k_x x_i + c_x \omega x_r)
 \end{aligned} \tag{11}$$

Combinando las ecuaciones (7), (8) y (11) se obtienen los valores, en el dominio de la frecuencia, de las fuerzas y momento torsor adicionados en la parte superior de la estructura como consecuencia de la incorporación de los AMS en las dos direcciones. Estas fuerzas y momento torsor son incorporadas a la formulación presentada en 2.1 como condiciones de contorno en la parte superior.

3 RESULTADOS NUMÉRICOS

Los modelos presentados en la sección 2 se incorporaron en un programa computacional, y en este punto se presentan los resultados numéricos obtenidos con el mismo, sobre una estructura asimétrica.

3.1 Edificio con Núcleo y Tabiques

Con el objetivo de estudiar la influencia de los Múltiples Amortiguadores de Masa Sintonizados (MAMS) en la respuesta ante la excitación sísmica en la base, se analiza un edificio con Núcleo y Tabiques (Coull, 1973). Se presenta la planta tipo en Figura 4 y sus características en la Tabla 1.

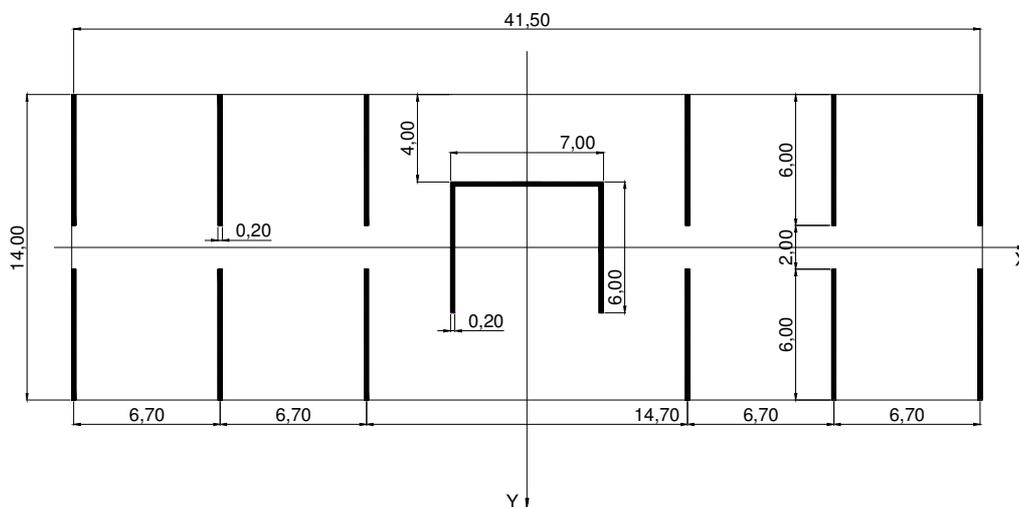


Figura 4: Planta tipo del edificio con Núcleo y Tabiques

Tabla 1: Características del edificio con Núcleo y Tabiques

Altura total del edificio	48 m
Número de pisos	20 pisos
Altura de piso	2.40 m
Espesor de losas	0.25 m
Masa total del edificio	11.663.119 kg

La estructura es de hormigón armado y las propiedades geométricas y mecánicas usadas para aplicar la teoría presentada en este trabajo son:

$$\begin{array}{ll}
 l = 48.00 \text{ m} & F_T = 18.1 \text{ m}^2 \\
 J_x = 291.0 \text{ m}^4 & J_y = 3300.0 \text{ m}^4 \\
 J_\varphi = 14385.4 \text{ m}^6 & J_d = 0.242 \text{ m}^4 \\
 a_x = 0 \text{ m} & a_y = -3.0 \text{ m} \\
 k'_x = 0,10 & k'_y = 0,35 \\
 E = 2,352 \cdot 10^{10} \text{ N/m}^2 & \rho = 2400 \text{ kg/m}^3 \\
 \nu = 0.2 &
 \end{array}$$

Donde

$$\begin{array}{ll}
 l = \text{altura total de la estructura} & F_T = \text{sección transversal} \\
 J_x = \text{momento inercia según } x & J_y = \text{momento inercia según } y \\
 J_\varphi = \text{momento sectorial de inercia} & J_d = \text{módulo de torsión} \\
 a_x ; a_y = \text{coordenadas del centro de corte} & \nu = \text{módulo de Poisson} \\
 E = \text{módulo de elasticidad del material} & \rho_H = \text{densidad del hormigón} \\
 k'_x ; k'_y = \text{Coeficientes de corte de Cowper} &
 \end{array}$$

En primer lugar, en Tabla 2 se presentan las frecuencias naturales de la estructura, las cuales fueron determinadas con un programa computacional especialmente desarrollado según la teoría descrita en 2.1. Se observa que la flexión según el eje Y está desacoplada de la torsión y la flexión según el eje X está acoplada. También es importante destacar que la primera frecuencia es predominantemente torsional.

Tabla 2: Frecuencias de vibración. Edificio con Núcleo y Tabiques

Frecuencia	Modo	Frecuencias naturales	Períodos naturales
		Hz	seg
1	1 Torsional-Flexional X	0.586	1.706
2	1 Flexional Y	1.152	0.868
3	1 Flexotorsión X	1.376	0.727
4	2 Torsional-Flexional X	3.607	0.277
5	2 Flexotorsión X	4.320	0.231

Para realizar el análisis se utiliza un acelerograma obtenido del sismo de Viña del Mar del año 1985, cuyo espectro de respuesta se presenta en Figura 5.

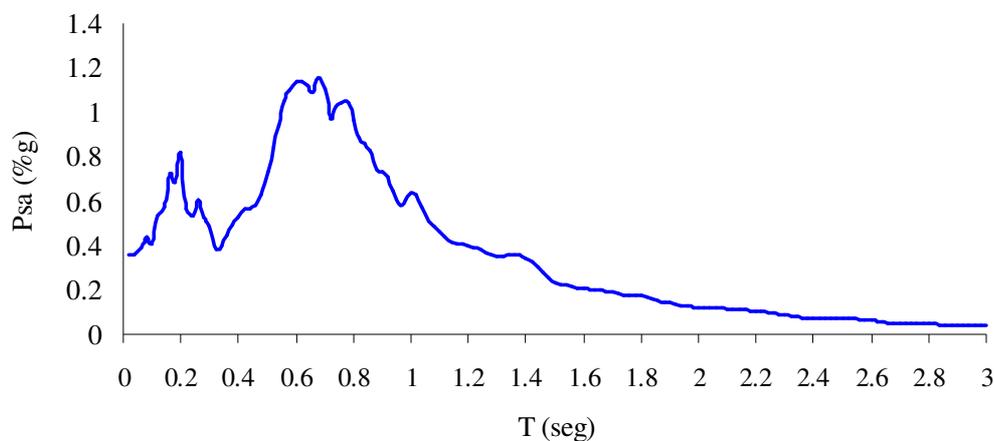


Figura 5: Espectro de respuesta del acelerograma de Viña del Mar

Para analizar la influencia de los MAMS en la respuesta del momento torsor en la base de la estructura se analizan cuatro casos distintos cuyas características se detallan a continuación:

CASO 1: Se utiliza un solo AMS orientado según la dirección X y posicionado a una distancia de 6 m desde los ejes de referencia (Figura 6).

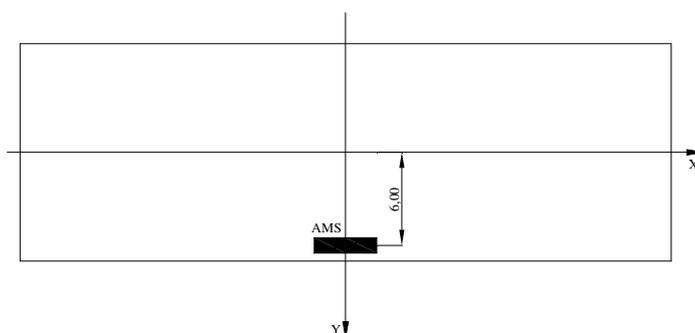


Figura 6: Edificio con Núcleo y Tabiques – Ubicación en planta de un AMS orientado según X

CASO 2: Se utiliza un solo AMS orientado según la dirección Y y posicionado a una distancia de 20 m desde los ejes de referencia (Figura 7).

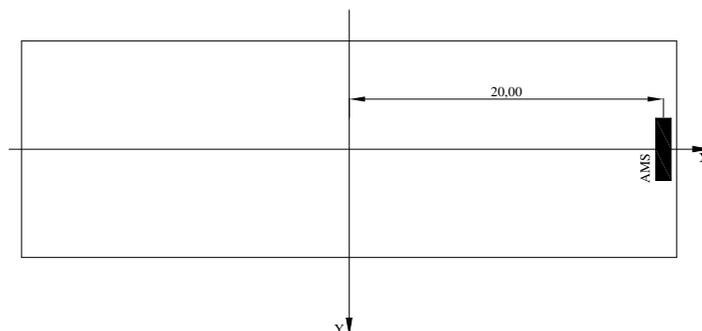


Figura 7: Edificio con Núcleo y Tabiques – Ubicación en planta de un AMS orientado según Y

CASO 3: Se utilizan cuatro AMS orientados según la dirección Y y posicionado dos de ellos a una distancia de 20 m y otros dos a una distancia de -20 m, desde los ejes de referencia (Figura 8).

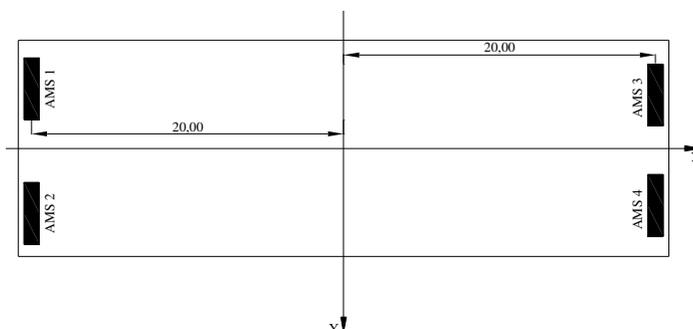


Figura 8: Edificio con Núcleo y Tabiques – Ubicación en planta de 4 AMS orientados según Y

CASO 4: Se utilizan cuatro AMS orientados según la dirección Y y posicionado dos de ellos a una distancia de 20 m y otros dos a una distancia de -20 m, y dos AMS orientados según la dirección X y posicionados ambos a una distancia de 6 m, desde los ejes de referencia (Figura 9).

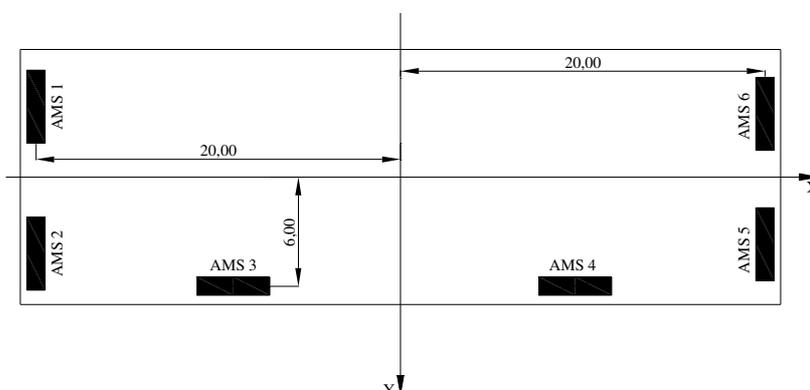


Figura 9: Edificio con Núcleo y Tabiques – Ubicación en planta de 4 AMS orientados según Y

En todos los casos que se analizan se sintoniza el AMS con la primera frecuencia, $\omega_1 = 0,586 Hz$, adoptando una relación de sintonización igual a 1 ($f = \omega_s / \omega_{ams} = 0,988$), una masa del AMS igual al 1% de la masa total de la estructura y un valor del coeficiente de amortiguamiento del 5%.

Bajo estas condiciones para los dos primeros casos en donde se considera la localización de un solo AMS, ya sea ubicado en dirección X o Y, los valores de los parámetros del AMS son los siguientes

Masa	$m_{1\%} = 116.630 kg$
Resorte	$k = 1.530.000 \text{ N / m}$
Amortiguador	$c = 42.400 \text{ kg / s}$

Para los Casos 3 y 4 se utiliza, según las recomendaciones establecidas por Li y Qu (2006), un espaciado de frecuencias $\beta = 0,1$ y los valores de rigidez y amortiguamiento constantes, variando la masa de cada uno de los AMS.

Para el Caso 3 los parámetros de los AMS se indican en la Tabla 3

Tabla 3: Parámetros de los AMS – Edificio con Núcleo y Tabiques

	AMS1	AMS2	AMS3	AMS4
ω	3,455	3,577	3,698	3,819
m	32.173	30.029	28.092	26.337
k	384.151	384.151	384.151	384.151
c	10.561	10.561	10.561	10.561
ξ	0,048	0,049	0,051	0,052

Para el Caso 4 los parámetros de los AMS se indican en la Tabla 4

Tabla 4: Parámetros de los AMS – Edificio con Núcleo y Tabiques

	AMS1	AMS2	AMS3	AMS4	AMS5	AMS6
ω	3,455	3,528	3,601	3,674	3,746	3,819
m	21.463	20.587	19.764	18.989	18.258	17.569
k	256.272	256.272	256.272	256.272	256.272	256.272
c	7.046	7.046	7.046	7.046	7.046	7.046
ξ	0,048	0,049	0,050	0,051	0,052	0,053

En la Tabla 5 se presentan los resultados obtenidos para cada uno de los casos en relación a la respuesta de la estructura sin AMS. Se considera la acción del sismo en la base actuando en la dirección X y la variable que se cuantifica es el valor máximo del momento torsor en la base

Tabla 5: Resultados – Edificio con Núcleo y Tabiques – Sismo en dirección X

	Sin AMS	Resultados				Diferencias (%)			
		Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4
$M_{Tmáx}$ (MNm)	107,05	91,60	87,43	86,30	85,19	- 14,43	- 18,33	- 19,38	- 20,42

Se observa en la tabla anterior una reducción en el valor del momento torsor para todos los casos analizados, con un valor máximo de reducción para el Caso 4. Respecto de los Casos 1 y 2 donde se ha utilizado un solo AMS se aprecia que el Caso 2 presenta una mayor reducción debido a la posición que ocupa el AMS, mucho más alejado del centro de torsión que en el Caso 1. Con respecto a los Casos 3 y 4, donde se han utilizado MAMS los resultados son prácticamente iguales entre si porque la influencia en la respuesta de los AMS orientados según la dirección X no es significativa respecto de los orientados según la dirección Y, pero mejores a los casos en que se utilizó un solo dispositivo.

Hay que notar que la frecuencia de sintonización (0,586 Hz o 1,706 seg) está muy alejada de los máximos contenidos de frecuencia que pueden apreciarse en la Figura 5, por lo tanto

podrían esperarse aún mejores resultados cuando los máximos contenidos de frecuencia de la excitación fueran similares al de sintonización.

En la Figura 10 se observa la representación gráfica de la respuesta del momento torsor en la base de la estructura, sin AMS y con los AMS dispuestos según el Caso 4, para el acelerograma de Viña del Mar, actuando según la dirección X.

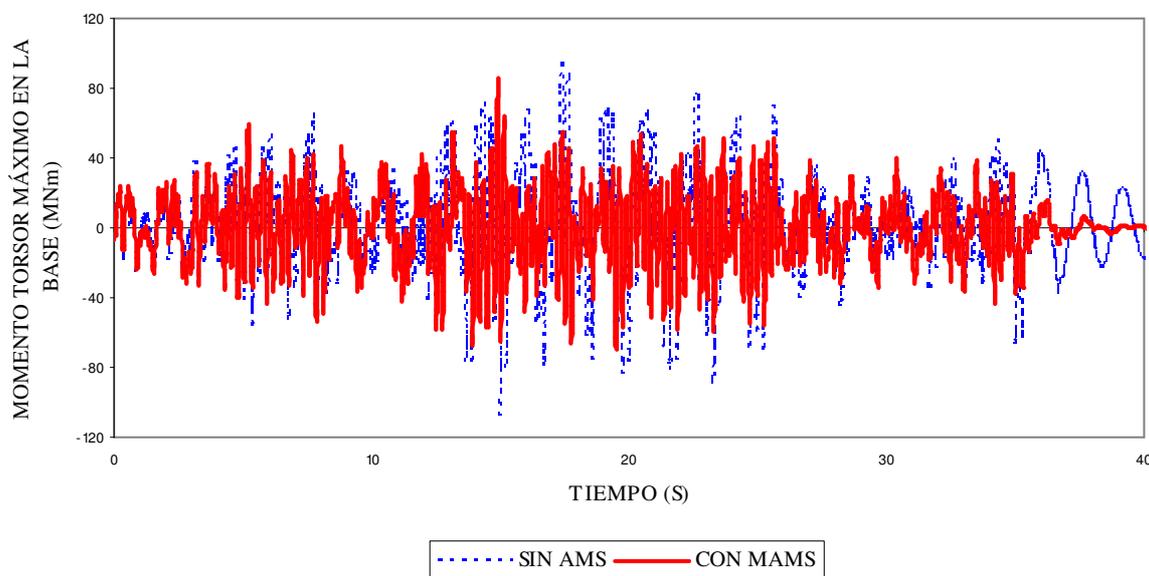


Figura 10: Edificio con Núcleo y Tabiques – Momento torsor en la base.

Debido a que se han incorporado dispositivos en el extremo superior de la estructura con el propósito de reducir los efectos de la acción torsora producto de la excentricidad, se analiza para cada uno de los casos la respuesta de la estructura considerando que la acción del sismo se produce en este caso según la dirección Y. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 6 en la cual se cuantifican los valores del desplazamiento máximo en el extremo superior, el esfuerzo de corte máximo en la base y el momento torsor máximo en la base.

Tabla 6: Resultados – Edificio con Núcleo y Tabiques – Sismo en dirección Y

	Resultados					Diferencias (%)			
	Sin AMS	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4
$d_{máx}$ (cm)	21,74	23,17	22,98	22,81	22,94	+6,60	+5,70	+4,92	+5,52
$Q_{máx}$ (MN)	59,73	68,99	68,41	68,50	68,74	+15,50	+14,53	+14,68	+15,08
$MT_{máx}$ (MNm)	0,00	0,00	28,71	2,78	4,02	0,00	-----	-----	-----

Se aprecia en los resultados que la localización de los AMS produce un aumento en el desplazamiento en el nivel superior que no es significativo y el aumento en el esfuerzo de corte en la base con un valor que debe considerarse significativo (aproximadamente 15% en promedio). Respecto del momento torsor en la base para el Caso 2 se produce un aumento importante (27% del momento torsor máximo que se alcanza considerando al sismo en la

dirección X) ya que se ha localizado un solo AMS en forma excéntrica mientras que en los Casos 3 y 4 al estar distribuidos uniformemente el valor no es significativo.

4 CONCLUSIONES

En este trabajo se presenta un esquema de análisis para estructuras sismorresistentes con la incorporación del sistema de control pasivo de vibraciones denominado en la literatura amortiguador de masa sintonizado (AMS), utilizando varios de estos dispositivos con distintas distribuciones en el extremo superior de la estructura.

En cuanto al modelo físico de la estructura se utiliza un modelo general de vigas. La formulación inicial, basada en las hipótesis de Vlasov, fue modificada permitiendo la inclusión de deformaciones angulares inducidas por el esfuerzo de corte, sección variable en la dirección longitudinal e inercias rotacionales en las ecuaciones de movimiento. Se utiliza un método de integración numérica conjuntamente con el algoritmo de la transformada rápida de Fourier (FFT) para trabajar en el dominio de la frecuencia. Además se formulan las ecuaciones de movimiento para los AMS teniendo en cuenta el giro en el extremo superior de la estructura y se describe su interacción con la estructura.

Con este esquema y teniendo en cuenta el objetivo fundamental del trabajo que es el control de los esfuerzos torsionales, se estudió numéricamente la respuesta de una estructura bajo la acción de un acelerograma registrado en la ciudad de Viña del Mar en el año 1985.

Los resultados obtenidos permiten obtener las siguientes conclusiones.

- Cuando se utiliza un solo dispositivo AMS se obtienen mejores resultados al disponer el mismo más alejado del centro de torsión de la estructura.
- Cuando se utilizan varios AMS al adoptar la disposición más distribuida se obtienen los mejores resultados en la disminución de los valores del momento torsor en la base, por la participación en la respuesta de los dispositivos orientados según las dos direcciones.
- Aunque las reducciones obtenidas en el momento torsor son muy importantes, en el caso de combinaciones de estructura-sismo en condiciones de resonancia, deben esperarse resultados aún mejores.
- La presencia de los dispositivos en el extremo superior de la estructura produce un aumento en el esfuerzo de corte en la base cuando se considera la acción del sismo actuando en la dirección en que la estructura no presenta asimetría. La localización de un solo AMS en forma excéntrica produce resultados no deseados respecto de las solicitaciones de torsión en la base.
- El problema del aumento del esfuerzo de corte en la dirección perpendicular se solucionará al incorporar AMS sintonizados con la frecuencia flexional en la mencionada dirección. En rigor, debe estudiarse la combinación óptima de MAMS para obtener la máxima reducción posible de los esfuerzos en las dos direcciones flexionales y la torsión.

Estas observaciones preliminares deben ser confirmadas por la realización de un conjunto de ejemplos adicionales, utilizando otros esquemas estructurales y otros registros con contenidos de frecuencia diferentes

REFERENCIAS

- Almazán, J.L., De la Llera, J.C., Inaudi, J.A., López-García, D., Izquierdo, L.E., A bidireccional and homogeneous tuned mass damper: A new device for passive control of vibrations. *Engineering Structures*, 29: 1548-1560, 2007.
- Almazán, J.L., Seguín, C.E., De la Llera, J.C., Recomendaciones para el control torsional de estructuras asimétricas por medio de disipadores de energía y aisladores sísmicos. *EIPAC 2007*.
- Ambrosini, R.D., Análisis Dinámico de Estructuras de Pared Delgada y Sección Abierta en el Dominio de la Frecuencia. *Tesis de Magister en Ingeniería Estructural, Universidad Nacional de Tucumán*, 1991.
- Ambrosini, R.D., Riera J.D. y Danesi R.F., Dynamic Analysis of Thin-Walled and Variable Open Section Beams with Shear Flexibility. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 38(17):2867-2885, 1995.
- Chang, C.C., Mass dampers and their optimal designs for building vibration control, *Engineering Structures*, 21:454-463, 1999.
- Coull, A., Interactions Between Coupled Shear Walls and Cantilever Cores in Three-Dimensional Regular Symmetrical Cross-Wall Structures, *Proc. ICE*, 2(55), 827-840, 1973.
- Den Hartog, J.P., *Mechanical Vibrations*, Dover, New York, 1985.
- Li, C. y Liu, Y., Optimum multiple tuned mass dampers for structures under the ground acceleration based on the uniform distribution of system parameters. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 32:671-690, 2003.
- Li, C. y Qu, W., Optimum properties of multiple tuned mass dampers for reduction of translational and torsional response of structures subject to ground acceleration. *Engineering Structures*, 28:472-494, 2006.
- Pinkaew, T., Lukkunaprasit, P., Chatupote, P., Seismic effectiveness of tuned mass dampers for damage reduction of structures. *Engineering Structures*, 25:39-46, 2003.
- Park, J. y Reed, D., Analysis of uniformly and linearly distributed mass dampers under harmonic and earthquake excitation. *Engineering Structures*, 23:802-814, 2001.
- Sadek, F., Mohraz, B., Taylor, A.W., Chung, R.M., A method of estimating the parameters of tuned mass dampers for seismic applications, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 26:617-635, 1997.
- SAP 2000., Integrated Finite Element Analysis and Design of Structures, V 10. *Computers and Structures Inc.*, 2006.