

## INFLUENCIA DE LA VARIACIÓN DE LA MASA DE AMORTIGUADORES DE MASA SINTONIZADA EN LA RESPUESTA ESTRUCTURAL ANTE ACCIÓN SÍSMICA

Cristian O. Bay<sup>a</sup>, Ricardo D. Bassotti<sup>b</sup>

<sup>a</sup> *Facultad Regional San Rafael, Universidad Tecnológica Nacional, Gral. Paz y Urquiza (5600) San Rafael, Mendoza. [cbay@frsr.utn.edu.ar](mailto:cbay@frsr.utn.edu.ar), <http://www.frsr.utn.edu.ar>*

<sup>b</sup> *Facultad Regional San Rafael, Universidad Tecnológica Nacional, Gral. Paz y Urquiza (5600) San Rafael, Mendoza. [rbassotti@frsr.utn.edu.ar](mailto:rbassotti@frsr.utn.edu.ar), <http://www.frsr.utn.edu.ar>*

**Palabras clave:** Amortiguadores de masa, acción sísmica, sismos impulsivos.

**Resumen.** Una solución para los problemas de seguridad estructural, en estructuras existentes, es la utilización de Amortiguadores de Masa Sintonizada (AMS), como sistema pasivo para el control de vibraciones. Un AMS consiste en una masa, un resorte y un amortiguador que, colocados en el sistema principal, absorbe energía atenuando las vibraciones. Está probada su eficiencia en acciones del tipo armónicas y de larga duración, no así para sismos de tipo impulsivos. La provincia de Mendoza, de acuerdo a sus características tectónicas, tiene registros de carácter impulsivo, para los cuales se encuentra discutida la eficiencia de los AMS. El objetivo del presente trabajo es evaluar la respuesta de un edificio de 9 pisos, de hormigón armado, característico de la zona y equipado con AMS, cuando es sometido a registros locales del tipo impulsivo. Los AMS se han sintonizado de acuerdo al estudio realizado por Warburton (Warburton, G., B., *Earth Eng and Struc Dyn.* 10: 381–401, 1982) para relaciones de masa del 1–2.5–5–7.5–10–15 y 20%. Se han seleccionado 11 registros ocurridos en la provincia de Mendoza, en los años 1.985, 2.005, 2.006 y 2.012. La eficiencia de la utilización de los AMS se mide por los máximos absolutos y los RMS del cortante basal y de la aceleración, velocidad y desplazamiento de la cabeza del edificio.

## 1 INTRODUCCIÓN

Las estructuras civiles sometidas a la acción dinámica inducida por agentes externos como pueden ser el sismo, el viento, el tráfico de vehículo o personas, etc., sufren un tipo de respuesta que en los casos más severos pueden llevarlas a la falla estructural, y en otros casos producen una sensación de incomodidad que las hace inapropiadas para su desempeño funcional.

Para evitar estas situaciones indeseables se utilizan desde hace ya algún tiempo sistemas de disipación de energía, que podemos identificarlos en dos grandes grupos tales como disipadores activos y disipadores pasivos. Los disipadores pasivos, funcionan exclusivamente por los principios con que han sido diseñados y no necesitan de energía externa ni de un mantenimiento periódico, son de baja complejidad y de reducido costo. Algunos de estos sistemas en uso son los Amortiguadores de Masa Sintonizados (AMS o TMD por sus siglas en inglés), los Amortiguadores de Líquido Sintonizados (ALS), los amortiguadores de fricción, amortiguadores viscosos, amortiguadores viscoelásticos, amortiguadores metálicos, sistemas magnetoreológicos, entre otros.

Los AMS son dispositivos compuestos por una masa, un resorte y un amortiguador que son sintonizados con una determinada frecuencia para lograr un buen desempeño en la estructura.

Las nuevas tendencias de la ingeniería estructural, a nivel mundial, reconocen la necesidad aumentar la seguridad estructural en los edificios construidos con normas obsoletas para estos tiempos, ya sea por su función social o por su valor histórico, a fin de poder resistir las acciones dinámicas ocasionadas por el sismo. En estos casos es cuando los sistemas pasivos de disipación de energía (AMS entre otros) poseen mayores virtudes frente a los sistemas de aislación de base. No hay dudas que en construcciones nuevas los sistemas de aislación son los más beneficiosos.

Los sismos ocurridos en la provincia de Mendoza se han caracterizado por estar asociados a fallas activas próximas a centros urbanos. La sismicidad se ha relacionado con eventos superficiales intraplaca lo que ha dado origen a sismos del tipo impulsivos, el más importante registrado el 26 de enero de 1.985. Numerosos estudios han mostrado las diferencias del comportamiento de estructuras cuando son sometidas a registros de campo cercano respecto del comportamiento de estructuras de campo lejano.

El estudio del desempeño de una estructura, característica de la zona, en la cual se incorporan amortiguadores de masa sintonizada para controlar las vibraciones, ante sollicitaciones de origen sísmico zonal, es el objetivo principal del trabajo de investigación. En particular se estudia la respuesta del sistema para distintas relaciones de masa entre el AMS y la estructura principal.

### 1.1 Antecedentes

Un Amortiguador de Masa Sintonizado consta de una masa adicional a la estructura que se encuentra unida mediante un sistema que ofrece una cierta rigidez y determinado amortiguamiento viscoso.

[Frahm \(1909\)](#) desarrolla un dispositivo que consiste en una masa y un resorte, y mediante la sintonización con la frecuencia de vibración de la estructura principal, permite reducir los movimientos de balanceo y vibraciones en buques marinos.

[Ormondroyd y Den Hartog \(1928\)](#) presentan un estudio donde incorporan por primera vez un amortiguador viscoso al resorte y a la masa. Esto origina que el dispositivo sea capaz de controlar la respuesta en sistemas sometidos a diversas acciones.

Cuando la frecuencia del AMS se encuentra en sintonía con la frecuencia de la excitación se logra disminuir la respuesta, el problema se manifiesta con el desconocimiento de la acción

exterior. [Iwanami y Seto \(1984\)](#) presentan un trabajo con 2 AMS dispuestos en paralelo para acciones armónicas. Y posteriormente se presentan varios trabajos con múltiples AMS (MAMS) dispuestos en serie y en paralelo. [Li y Qu \(2006\)](#) discuten la aplicación de un Sistema MAMS con igual rigidez y coeficiente de amortiguamiento pero diferente masa en el control de la respuesta traslacional y torsional, para una estructura de dos grados de libertad.

Numerosos estudios de optimización han sido realizados en función de la cantidad de masa, el grado de amortiguamiento y la relación de frecuencia. Entre los más destacados se citan el de [Den Hartog \(1928\)](#), sin amortiguamiento y para cargas armónicas y un grado de libertad, [Warburton \(1982\)](#) para cargas armónicas y ruido blanco. Y [Sadek et al \(1997\)](#) para determinar los parámetros óptimos frente a cargas sísmicas.

Refiriéndose a la utilización de AMS en la ingeniería sísmica se suman al ya citado trabajo de [Sadek et al](#), el de [Sladek y Klingner \(1983\)](#) y el trabajo de [Bekdas y Nigeli \(2013\)](#) que utiliza el algoritmo harmony search para optimizar la relación de frecuencias y la cantidad de amortiguamiento en función de la relación de masas.

En zonas sísmicas con características de registros impulsivos, near-field, está en discusión en la actualidad la efectividad de los AMS. [Matta \(2011\)](#) utiliza más de 300 registros de fuente cercana, donde concluye que con un diseño apropiado y cantidad de masa considerable es factible la reducción de la respuesta. Posteriormente, [Matta \(2013\)](#) evalúa la efectividad frente a acciones tipo pulso y realiza una comparación con acciones tipo armónicas, concluyendo que la frecuencia de sintonización y la relación de amortiguamiento deben ser menor que en el caso de utilizar solicitaciones tipo armónicas. Estos estudios se realizan en el campo lineal.

Cuando la estructura incursiona en el campo no lineal, se produce una pérdida de rigidez, lo cual genera una desintonización entre la frecuencia del AMS y la frecuencia de la estructura. [Rana y Soong \(1998\)](#) estudian el efecto de la desintonización entre la estructura y el AMS. [Pinkaw et al \(2003\)](#) realiza un estudio para acciones sísmica utilizando el índice de daño de [Park y Ang \(1985\)](#) para evaluar la efectividad de la incorporación de AMS en una estructura que incursiona en el campo no lineal. También [Domizio et al \(2013\)](#) evalúan el comportamiento de una estructura metálica en el campo no lineal sometida a registros de fuente cercana.

Los registros del oeste argentino son considerados de tipo impulsivo, [Frau \(2009\)](#). [Bassotti y Ambrosini \(2007\)](#) utilizan 3 registros locales para evaluar el comportamiento en estructuras de tabiques y de pórticos.

El objetivo del presente estudio es evaluar la eficiencia de Amortiguadores de Masa Sintonizada en una estructura de hormigón armado, característica de la ciudad de Mendoza, cuando es sometida a registros sísmicos locales con características impulsivas. Se utilizan 7 relaciones de masa y la sintonización se realiza según el estudio de [Warburton \(1982\)](#).

La eficiencia de la incorporación de amortiguadores de masa se evalúa por medio del cortante basal y de la aceleración, velocidad y desplazamiento del último nivel, en valores máximos y valores medios cuadráticos a través del RMS (root mean square). También se evalúa la respuesta en el tiempo en el rango lineal y las Amplitudes de la Transformada de Fourier para cada uno de los registros.

## 2 CARACTERÍSTICAS DE LA ESTRUCTURA

Se utilizó para el análisis una estructura característica de la zona de Mendoza, conformada por tabiques de hormigón armado de nueve niveles. En la dirección y se ubican 14 tabiques de 6m de largo y 0,20m de espesor dispuestos en forma simétrica. En el sentido transversal, x, un solo tabique de 7m de largo y 0,20m de espesor resiste el esfuerzo de cortante en esa dirección, generando además una importante torsión a la estructura. ([Figura 1](#)).



$$\mu = \frac{m}{\varphi_1^T [M] \varphi_1} \quad (1)$$

$$f_{opt} = \frac{\sqrt{1-\frac{\mu}{2}}}{1+\mu} \quad (2)$$

$$\xi_{opt} = \sqrt{\frac{3\mu}{8(1+\mu)\left(1-\frac{\mu}{2}\right)}} \quad (3)$$

Para evaluar la eficiencia del AMS se utilizarón 8 relaciones de masas distintas mostradas en la [Tabla 2](#), donde  $\mu_T$  representa la relación de masas entre el AMS,  $m_{AMS}$ , y la masa total de la estructura y  $Tn_{AMS}$  el período de vibración del AMS.

<b>I</b>	<b><math>\mu</math></b>	<b><math>\mu_T</math></b>	<b><math>f_{opt}</math></b>	<b><math>\xi_{opt}</math></b>	<b><math>m_{AMS}</math></b> [kg]	<b><math>Tn_{AMS}</math></b> [s]
1	0.000	0.000	1.000	0.000	0	0.256
2	0.010	0.007	0.988	0.061	35433	0.259
3	0.025	0.017	0.969	0.096	88582	0.264
4	0.050	0.034	0.940	0.135	177164	0.272
5	0.075	0.050	0.913	0.165	265746	0.280
6	0.100	0.067	0.886	0.189	354328	0.289
7	0.150	0.101	0.836	0.230	531491	0.306
8	0.200	0.134	0.791	0.264	708655	0.324

Tabla 2. Propiedades de sintonización de los AMS

### 3 ACELEROGRAMAS UTILIZADOS

Para obtener la respuesta de la estructura se utilizaron 11 registros correspondientes a cuatro sismos ocurridos en la ciudad de Mendoza, República Argentina. Del sismo del 26/01/85 ocurrido en Barrancas, Maipú, se utilizaron los registros de las estaciones situadas en la Municipalidad de Maipú, Municipalidad de las Heras y Escuela Edmundo de Amicis, con distancias epicentrales de 15, 31 y 29km respectivamente. Cabe señalar que, si bien la estación de Maipú es la más cercana al epicentro, las aceleraciones obtenidas son menores a los registros de Las Heras y Amicis, probablemente esto se deba al suelo firme que se encuentra en la zona, en contraposición del suelo blando localizado en la zona de Las Heras y Capital. En el registro de Maipú, se encuentran todas las características de un sismo de fuente cercana ([Frau, 2009](#)). Del sismo del 23/08/2005, en la zona de El Borbollón, se utilizó el registro de la UTN-Regional Mendoza, situado a 12,5km de la fuente sísmica. Del sismo ocurrido el 05/08/2006, en la misma zona del sismo de 1.985 se utilizó el registro de la UTN-Regional Mendoza, situado a 28,71km del epicentro. Y por último se utilizó la componente transversal registrada en la UTN-Regional Mendoza del sismo ocurrido el 18/06/2012. Los registros se han designado como transversales a los orientados en dirección E-O y longitudinales a los orientados en dirección N-S, en coincidencia con la dirección de las fallas. En la [Tabla 3](#), se muestra la designación, fecha, estación de registro, dirección y características de los Acelerogramas utilizados.

Designación	Fecha	Estación / Componente	PGA	PGV	PGD	
			[cm/s <sup>2</sup> ]	[cm/s]	[cm]	
LHERAS-85-T	26-01-85	Municip. Las Heras	E-W	401.2	25.4	4.6
LHERAS-85-L	26-01-85	Municip. Las Heras	N-S	184.1	7.6	4.4
AMICIS-85-T	26-01-85	Colegio Amicis	E-W	332.4	29.3	3.9
AMICIS-85-L	26-01-85	Colegio Amicis	N-S	267.0	11.2	1.6
MAIPÚ-85-T	26-01-85	Municip. de Maipú	E-W	191.5	14.2	3.0
MAIPÚ-85-L	26-01-85	Municip. de Maipú	N-S	65.4	4.3	0.7
MZA-05-T	23-08-05	UTN-Regional Mza	E-W	164.1	7.0	0.4
MZA-05-L	23-08-05	UTN-Regional Mza	N-S	129.0	4.8	0.5
MZA-06-T	05-08-05	UTN-Regional Mza	E-W	102.1	4.4	0.4
MZA-06-L	05-08-05	UTN-Regional Mza	N-S	71.6	3.0	0.9
MZA-12-T	18-06-12	UTN-Regional Mza	E-W	94.2	3.7	0.2

Tabla 3. Registros utilizados en el análisis

En la [Figura 2](#), se grafican los espectros de respuesta para una relación de amortiguamiento del 5%, donde se observa que los picos de aceleración en los espectros de respuesta se producen para períodos comprendidos entre 0.18s y 0.23s, excepto para el registro de Maipú, cuyo máximo se produce en un periodo de 0.08s aproximadamente, en concordancia con lo indicado anteriormente sobre los suelos duros de la estación registradora Maipú. El de línea negra vertical representa el período fundamental de la estructura en la dirección estudiada. Se observa una buena sintonización con la mayoría de los registros, especialmente con el registro de Las Heras-T.

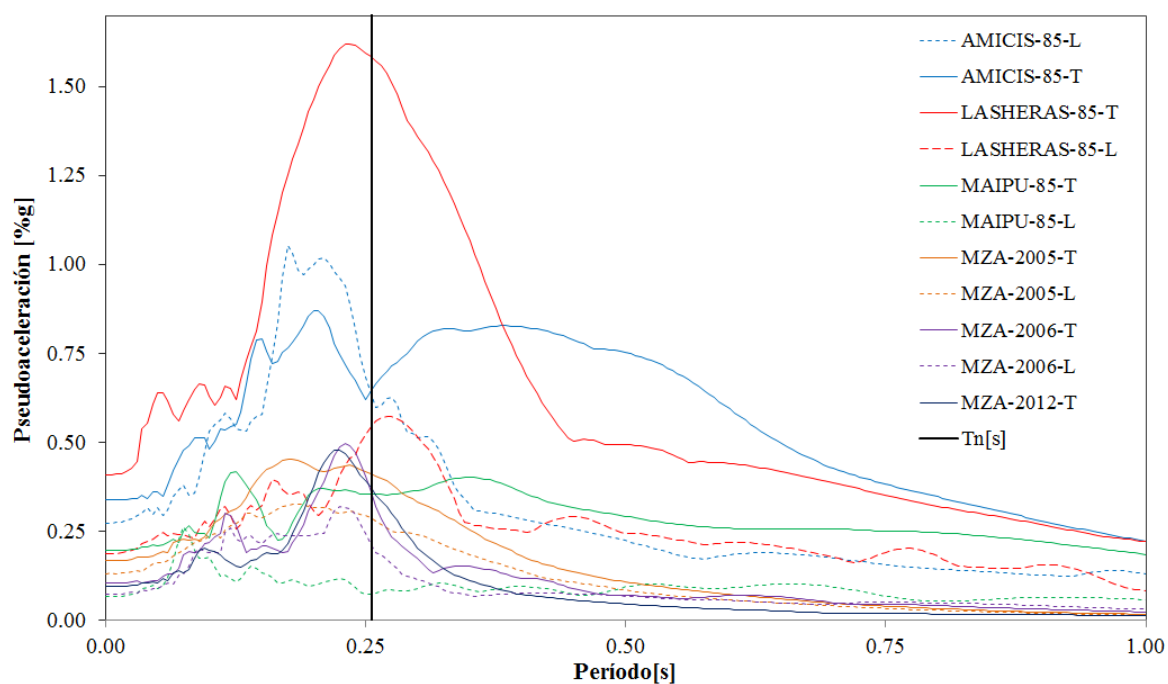


Figura 2. Espectros de pseudoaceleración de los registros. En vertical el período del edificio.

#### 4 RESULTADOS DEL ANÁLISIS NUMÉRICO

El modelo estudiado con 7 relaciones de masas y 11 registros de acelerogramas fue resuelto con el software en el campo lineal.

Para evaluar la eficiencia de los AMS se graficaron en las abscisas la relación de masas ( $\mu$ ) y en ordenadas la relación entre el valor del sistema con el AMS y sin el AMS para las distintas variables que han sido propuestas en la literatura, también se grafican las medias aritméticas obtenidas para cada variable

Para el trabajo se utilizaron los máximos de cortante basal, de desplazamientos, de velocidad y de aceleración en la cabeza del edificio. Además, se evaluaron los valores medios cuadráticos de las distintas variables consideradas, mediante el RMS (root mean square). Evaluado esto para cortantes, desplazamientos, velocidad y aceleración. El RMS representa de mejor manera el daño estructural acumulado sobre la estructura.

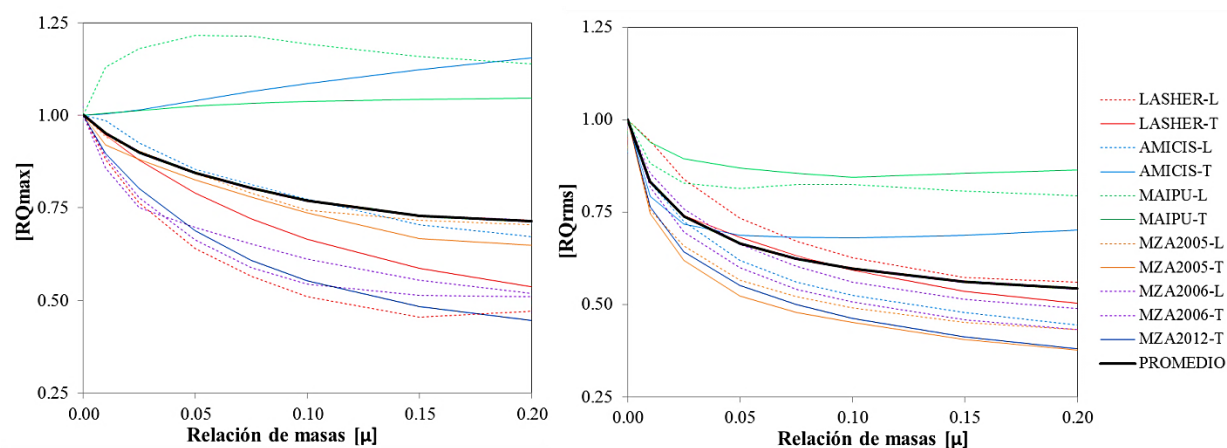


Figura 3. Relación de cortantes máximos y cortantes RMS.

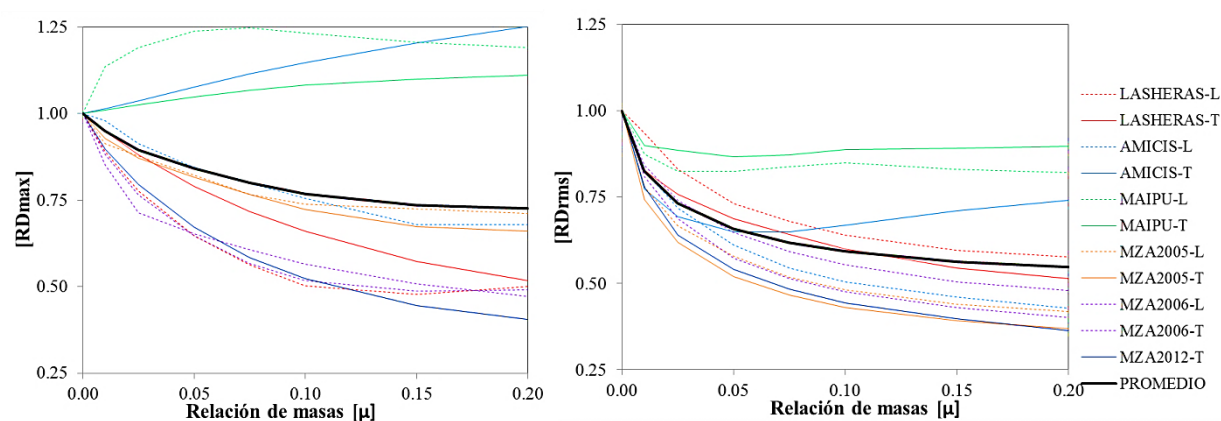


Figura 4. Relación de desplazamientos máximos y desplazamientos RMS

El esfuerzo de cortante es una de las variables utilizadas por Warburton(1982) como parámetro de optimización. En la Figura 3, se muestra la relación de cortantes en la estructura con AMS y sin AMS para máximos,  $RQ_{max}$ , y para los medios cuadráticos,  $RQ_{rms}$ . Para 8 de los 11 registros se observó una disminución de  $RQ_{max}$  y  $RQ_{rms}$  en forma exponencial con el incremento de la relación de masas. Para los 3 registros restantes, Maipú-T, Maipú-L y

Amicis-T del sismo de 1.985, se aumentó la respuesta,  $RQ_{max}$ , con el incremento de la relación de masas. Aunque, cuando se evaluó el  $RQ_{rms}$ , para estos 3 registros, la respuesta se redujo conforme se incrementó la relación de masas. De los promedios de los registros se observaron reducciones del 10% para  $RQ_{max}$  y del 25% para  $RQ_{rms}$  cuando la relación de masas fue de 0,025.

En la Figura 4 se muestran las relaciones de desplazamientos en la cabeza de la estructura con y sin AMS para los picos máximos,  $RD_{max}$ , y para los promedios,  $RD_{rms}$ . El comportamiento es similar al mostrado para el esfuerzo de cortante, siendo los mismos registros los que muestran una respuesta no satisfactoria para  $RD_{max}$ . Para relaciones de masa de 0,025 las reducciones promedios fueron del 10% y del 25% para  $RD_{max}$  y  $RD_{rms}$  respectivamente.

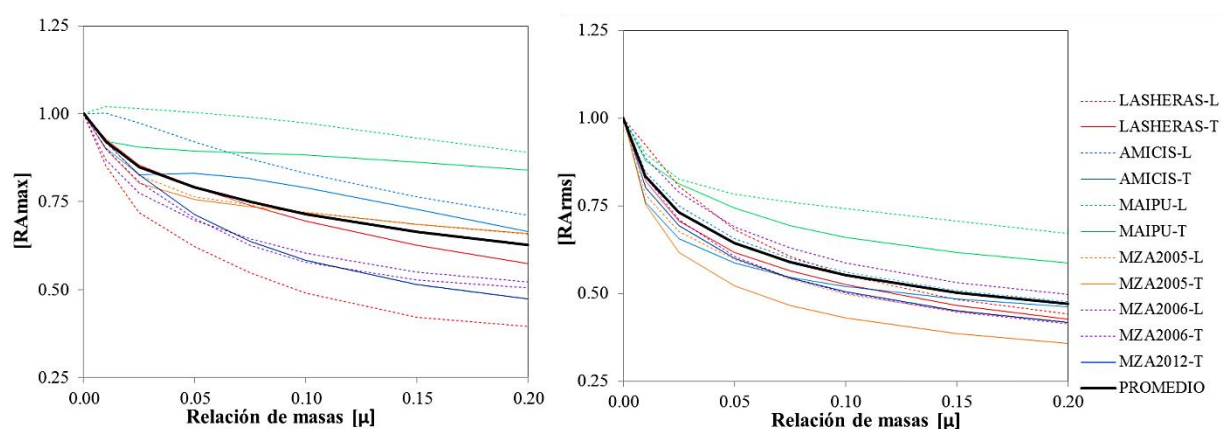


Figura 5. Relación de aceleraciones máximas y aceleraciones RMS

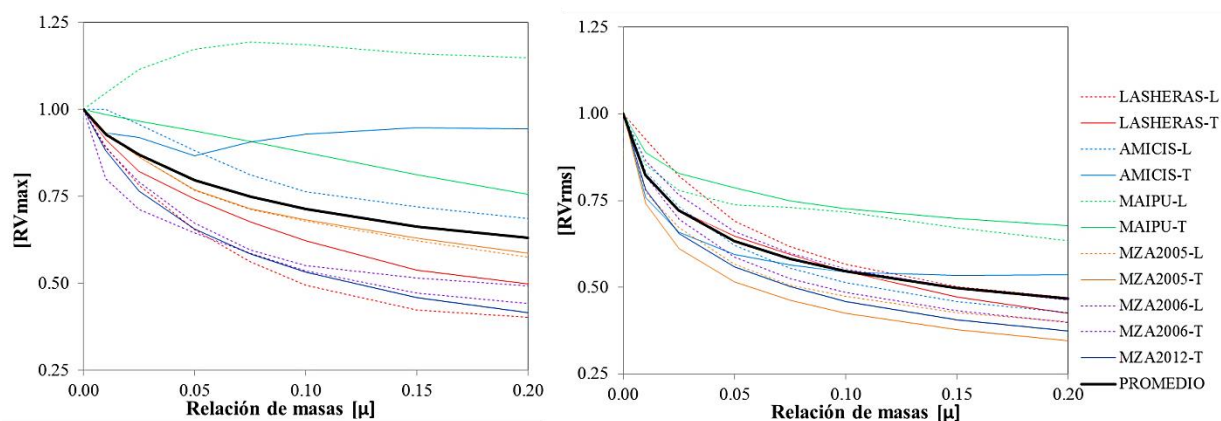


Figura 6. Relación de velocidades máximas y velocidades RMS

La aceleración del piso superior, también utilizada por Warburton(1982) como parámetro de optimización, permite evaluar el confort de los ocupantes del edificio. En la Figura 5, se muestran los resultados obtenidos en la estructura con AMS y sin AMS para los picos máximos,  $RA_{max}$ , y para los promedios  $RA_{rms}$ . Se observó que, tanto para  $RA_{max}$  como para  $RA_{rms}$  la respuesta se redujo conforme se incrementó la relación de masas. Aunque para los registros de Amicis y Maipú el decaimiento en la respuesta no fue exponencial como para el resto de los registros. La reducción en promedios de  $RA_{max}$  y  $RA_{rms}$  fue del 10% y del 25% para relación de masas es de 0.025.



La velocidad inducida en la estructura está asociada a los daños que se generan, el RMS da un indicio de los daños acumulados, por tanto es de vital importancia su evaluación. En la Figura 6, se muestran las relaciones de velocidad en la cabeza de la estructura con AMS y sin AMS para los máximos,  $RV_{max}$ , y para los promedios,  $RV_{rms}$ . Se observó un comportamiento similar a cuando se evaluaron los desplazamientos y los cortantes, reduciéndose en forma exponencial los  $RV_{max}$  y  $RV_{rms}$ , excepto para los registros de Maipú-T, Maipú-L y Amicis-T, donde se observó un incremento de la respuesta conforme se aumentó la relación de masas. Para relaciones de masas del 0,025 la reducción promedio en  $RV_{max}$  y  $RV_{rms}$  fue del 13% y del 27% respectivamente.

En general, se obtuvo una reducción con tendencia exponencial en todos los casos, con decaimiento mayor en el RMS que en los máximos, lográndose reducciones para máximos y para RMS del 12% y del 27% para relaciones de masas de 0,025 respectivamente y del 33% y 50% para relaciones de 0,20 respectivamente

También se analizó la respuesta en el tiempo para los distintos casos en estudio. En la Figura 7 se grafican, para los registros de Maipú-T, Amicis-T y Las Heras-T, los cortantes basales y las aceleraciones del último piso para la estructura sin AMS y con AMS  $-\mu=0.10$ . También se incorporan los acelerogramas de cada registro.

Para los registros de Maipú-T y Amicis-T el cortante con AMS es superior al cortante sin AMS, tal como mostró el  $RQ_{max}$  (Figura 3), pero sólo en el primer pico de la respuesta, hasta que el AMS comienza a absorber energía, posterior a ese pico la respuesta es satisfactoria para la estructura con AMS, como lo mostró el  $RQ_{rms}$  (Figura 3).

En la Figura 7 también se grafican los resultados obtenidos para el registro Las Heras-T, en este caso la respuesta se reduce para todas las variables analizadas.

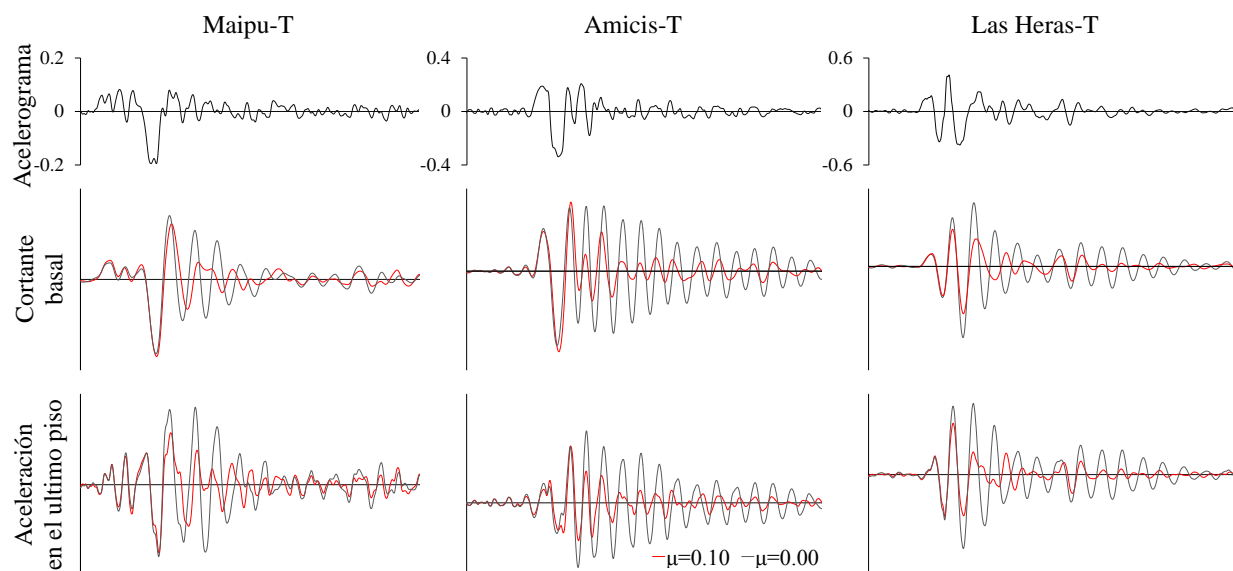


Figura 7. Respuesta en el tiempo de la estructura con y sin AMS

En la Figura 8 se muestra la Amplitud de la Transformada de Fourier para los registros de Maipú-T, Amicis-T y Las Heras-T del sismo de 1.985. Con línea roja se indica el periodo de la estructura (0,256s) y la franja representa la banda de supresión para una relación de masas de 0.20. Esta franja indica la zona en que la estructura con AMS reduce la respuesta respecto de la estructura sin AMS.

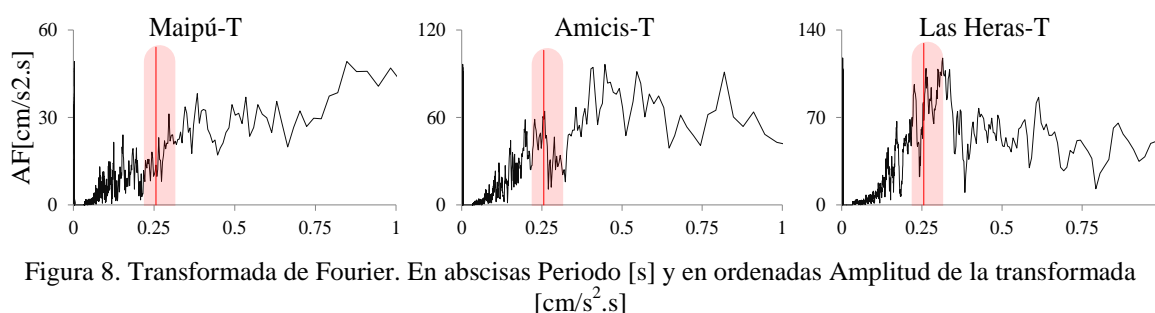


Figura 8. Transformada de Fourier. En abscisas Período [s] y en ordenadas Amplitud de la transformada [cm/s<sup>2</sup>.s]

Se observó que para el registro de Las Heras-T, hay coincidencia entre el período de la estructura y los períodos predominantes de la ATF (Amplitud de la Transformada de Fourier). Esto concuerda con lo mostrado en los gráficos anteriores sobre la eficiencia de los AMS para este registro. Por el contrario, para los registros de Maipú-T y Amicis-T del sismo de 1.985, el predominio de períodos de la ATF no coincide con el período de sintonización del AMS y a su vez concuerda con lo mostrado en *RQmax* y *RDmax*, donde la utilización de AMS no es eficiente.

## 5 CONCLUSIONES

En este trabajo se estudia la efectividad de la utilización de Amortiguadores de Masa Sintonizada (AMS) en una estructura de hormigón armado sometida a 11 registros de sismos de la Provincia de Mendoza del tipo impulsivo. Se utilizaron 7 relaciones de masas distintas, sintonizadas en frecuencia y amortiguamiento de acuerdo a las expresiones de [Warburton \(1982\)](#).

De acuerdo a los resultados obtenidos en el trabajo se pudo determinar que la respuesta en términos de RMS (cortante, aceleración, velocidad y desplazamiento) se redujo en forma exponencial conforme se incrementó la relación de masas para todos los registros. La reducción fue del 26% para relaciones de masa de 0,025 y del 50% para relaciones de 0,20.

En términos de máximos, la respuesta se redujo para 8 de los 11 registros, siguiendo una tendencia exponencial conforme se incrementó la relación de masas, pero con un decaimiento menor que para el caso del RMS. Siendo del 15% la reducción para relaciones de masas de 0,025 y del 30% para relaciones de 0,20.

Para los 3 registros (Maipu-T, Maipu-L y Amicis-T) en que la respuesta en máximos no fue eficiente se realizó el análisis en el tiempo. Ahí se observó que la estructura sin AMS se mostró superada por la estructura con AMS solo en los 2 primeros picos, luego se redujo en forma considerable la respuesta.

Mediante la Amplitud de la Transformada de Fourier se observó que el contenido de frecuencias de estos registros difiere de la frecuencia fundamental de la estructura. Los registros de Maipú y Amicis, posiblemente, tengan los rasgos de sismos impulsivos más acentuados que los registros de Las Heras.

Es necesario seguir investigando sobre la efectividad de utilización de Amortiguadores de Masa Sintonizada con registros locales de tipo impulsivo, sea utilizando otras estructuras para el análisis y/o incorporando más registros a la base de datos.

## 6 AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo brindado por la Facultad Regional San Rafael de la Universidad Tecnológica Nacional a través del proyecto “Desempeño ante acción sísmica de estructuras civiles equipadas con disipadores pasivos y aisladores de base”.

## 7 REFERENCIAS

- Bassotti R., y Ambrosini, D., Sobre la utilización de amortiguadores de masa sintonizada en la provincia de Mendoza, *Mecánica computacional* vol. XXVI, pp 2321-2340, 2007.
- Bekdaş, G., Nigdeli, S.M., Mass ratio factor for optimum tuned mass damper strategies. *Int. J. Mech. Sci.* 2013, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2013.03.014>.
- Domizio, M., Ambrosini, D., Curadelli, O., Evaluación del desempeño de amortiguadores de masa sintonizada frente a sismos de falla cercana. *Mecánica computacional* Vol XXXII, pp 2115-2129, 2013.
- Frahm, H. Device for Damped Vibrations of Bodies. *U.S. Patent No. 989958*. October 30, 1909
- Frau, C. Espectro de diseño considerando efectos de directividad en zonas Near-Fault de Argentina. *Tesis doctoral, Universidad Tecnológica Nacional, Argentina*, 2009.
- Iwanami, K., Seto, K., Optimum design of dual tuned mass dampers and their effectiveness. *Bulletin of JSME(C)* 1984;50(449):44–52, 1984.
- Li, Ch., 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
- Matta, E., Effectiveness of Tuned Mass Dampers against Ground Motion Pulses. *Journal of Structural Engineering*, 139: 188–198, 2013.
- Matta, E., Performance of tuned mass dampers against near-field earthquakes. *Structural Engineering and Mechanics*, 39: 621–642, 2011.
- Ormondroyd, J., y Den Hartog, J. P. The Theory of the Dynamic Vibration Absorber. *Trans. ASME*, 9–22, 1928.
- Park, Y., Ang, H.S. Mechanistic seismic damage model for reinforced concrete. *Journal of Structural Engineering*. 111(4),722-739, 1985
- Pinkaew, T., Lukkunaprasit, P., Chatupote, P., Seismic effectiveness of tuned mass dampers for damage reduction of structure. *Engineering Structures*, 25: 39-46, 2003.
- Rana, R. y Soong, T. Parametric study and simplified design of tuned mass dampers. *Engineering Structures*, 20(3), 193–204, 1978
- 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* 1997;26:617–35. 1997
- SAP 2000, Integrated Finite Element Analysis and Design of Structures, V.14.1.0. *Computers and structure Inc*, 2009.
- Sladek, J., y Klingner, R. Effect of Tuned-Mass Dampers on Seismic Response. *Journal of Structural Engineering*, 109: 2004–2009, 1983.
- Warburton, G.B., Optimum absorber parameters for various combinations of response and excitation parameters. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*.10: 381–401, 1982.