

Use of TMD in structural engineering: Building Parque Araucano in Santiago de Chile

L. Breschi¹, A. Castillo²

ABSTRACT¹

The application of Tuned Mass Dampers in mechanical engineering is of longstanding and habitual use. In these kinds of applications, the loading forces are based on constant frequencies and they are in most case well known. The application of a TMD in structural engineering is more recent, beginning a few years ago under the concept of seismic protection.

The design of a TMD for a building presents the practical difficulty of tuning the device to the fundamental period of the structure. Through the application of additional damping, it is possible to widen the range of tuning frequencies and therefore increase the effectiveness of the TMD. Additionally, the seismic loads to which the structure will be submitted are uncertain in their frequency distribution which could generate a counterproductive effect, because the response of the building to the seismic forces could be even worse with the use of TMD. The addition of more damping has the result of a reduction of the positive effect of the TMD at the fundamental frequency, but produces a better response for the entire range of frequencies of the seismic excitation.

The following work shows both the theoretical and practical application of this concept to a building built in 2006 in Santiago de Chile, which passed unscathed the 2010 Maule Earthquake, which reached a magnitude 8,8 Mw with an intensity VIII in the locations of the building.

Keywords: AMS, TMD, damper, mass, tuned.

1. INTRODUCCIÓN

El movimiento inducido en un edificio por un movimiento sísmico es modificado por la presencia de un AMS. Esta modificación debe disminuir las solicitaciones sobre el edificio, pero el que esto sea así depende de los periodos de las ondas que excitan la estructura, del periodo propio del AMS y del periodo del edificio. La inclusión adicional de amortiguadores en el AMS amplía el rango en que este tiene un comportamiento deseable. En este estudio muestra el desarrollo teórico de un AMS, como se eligieron los amortiguadores viscosos de los dos AMS del edificio Parque Araucano en Santiago de Chile y detalles generales de la construcción.

¹Associate of VMB Ingeniería. Estructural, professor of the Faculty of Engineering in PUC, lbreschi@vmb.cl

²Associate of VMB Ingeniería. Estructural, acastillo@vmb.cl (Corresponding author)

2. DESARROLLO TEÓRICO DE UN AMS

Un AMS o Amortiguador de Masa Sintonizada es un sistema mecánico que se acopla a un sistema vibratorio con la intención de reducir la amplitud del movimiento de este y puede representarse como se muestra en la Fig. 1. La masa "M" representa la masa del sistema cuyas vibraciones se desea reducir. La masa "m" es la del AMS y es mucho más pequeña que la masa "M".

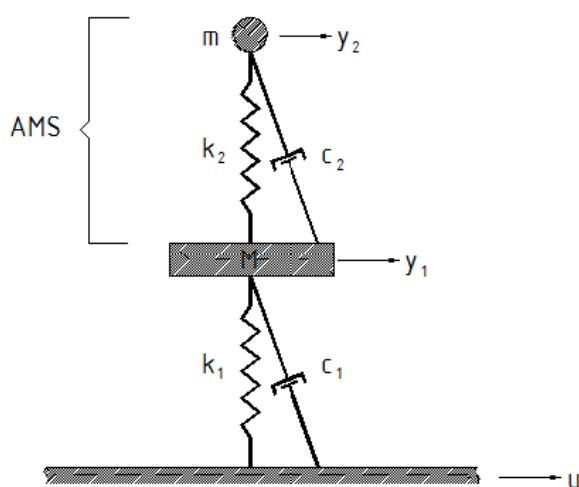


Figura 1. Sistema mecánico de un grado de libertad con AMS.

Aplicando las ecuaciones del movimiento al AMS de la Fig. 1 se obtiene:

$$m\ddot{y}_2 = -k_2(y_2 - y_1) - c_2(\dot{y}_2 - \dot{y}_1) \quad (1)$$

ordenando y aplicando la transformación de Laplace para trabajar en el espacio de las frecuencias se llega a:

$$(ms^2 + c_2s + k_2)Y_2 = (c_2s + k_2)Y_1 \quad (2)$$

que con una transformación de variable puede escribirse como:

$$E Y_2 = D Y_1 \quad (3)$$

Aplicando las ecuaciones del movimiento a la masa principal se obtiene:

$$M\ddot{y}_1 = k_2(y_2 - y_1) + c_2(\dot{y}_2 - \dot{y}_1) - k_1(y_1 - u) - c_1(\dot{y}_1 - \dot{u}) \quad (4)$$

y nuevamente ordenado y aplicando la transformación de Laplace para trabajar en el espacio de las frecuencias se llega a:

$$[Ms^2 + (c_1 + c_2)s + k_1 + k_2]Y_1 = (c_2s + k_2)Y_2 + (c_1s + k_1)U \quad (5)$$

que esta vez con una transformación de variable puede escribirse como:

$$B Y_1 = D Y_2 + AU \quad (6)$$

De las Eq.(1) y Eq.(2) puede despejarse Y1 y se obtiene:

$$Y_1 = \frac{A E}{BE - D^2} U \quad (7)$$

El objetivo es encontrar el valor de Y1 de tal modo que la masa principal tenga desplazamiento mínimo, lo que resulta ser una tarea compleja, excepto en el caso en que el amortiguamiento del AMS no existe, es decir $c_2 = 0$, en cuyo caso es suficiente exigir $E = 0$, lo que se traduce en

$$(ms^2 + k_2) = 0 \quad (8)$$

Si el movimiento basal es armónico con frecuencia ω y por lo tanto $s = \omega j$ la ecuación anterior se transforma en:

$$(-m\omega^2 + k_2) = 0 \quad (9)$$

cuya solución es:

$$\frac{k_2}{m} = \omega^2 \quad (10)$$

Esto último significa que si la frecuencia propia del AMS, $\omega_{AMS} = \sqrt{\frac{k_2}{m}}$, es idéntica a la frecuencia del movimiento basal, es posible obtener un movimiento nulo en la masa principal, incluso si la masa del AMS, m_2 , es pequeña.

3. EL AMS EN LA PRÁCTICA

Si bien en la teoría un AMS puede ser efectivo incluso si la masa "m" es pequeña, en la práctica hay limitaciones técnicas para lograr este efecto ya que esto implica una amplitud de movimiento muy grande de sus componentes, es decir de la masa y también del amortiguadores y del resorte. No obstante el sistema AMS ha sido usado exitosamente por más de 100 años para reducir vibraciones principalmente en máquinas que trabajan a frecuencias constante, como son las movidas por motores eléctricos sincrónicos cuya frecuencia depende de la red eléctrica, pero también para reducir la amplitud de la oscilación de cables colgantes y edificios.

En los casos en que la frecuencia solicitante no coincide con la del AMS, lo que puede pasar en forma permanente o durante la partida o parada de una máquina, pueden producirse desplazamientos bastante importantes, incluso más grandes que los que tendría el sistema sin AMS.

La inclusión de un amortiguador en el AMS deteriora el comportamiento del sistema frente a una sollicitación con una frecuencia coincidente con la del AMS, pero mejora la respuesta en algunas frecuencias parecidas, siendo mejor el resultado frente a frecuencias inciertas.

Por otro lado, cuando desaparece la sollicitación el sistema, bajo la suposición de un sistema lineal, el sistema continua vibrando de acuerdo a sus modos propios, en la que se destaca el modo principal y por lo tanto se requiere que el AMS esté sintonizado con el primer modo, que es el de mayor duración.

4. DESCRIPCIÓN DEL EDIFICIO

El edificio Parque Araucano es un edificio de hormigón armado con una superficie de 60000 m² y 90 m de altura total, de estructuración mixta, con marcos y muros, de 21 pisos más 6 subterráneos ubicado en Santiago de Chile y se muestra en las Fig. 2, 3 y 4.

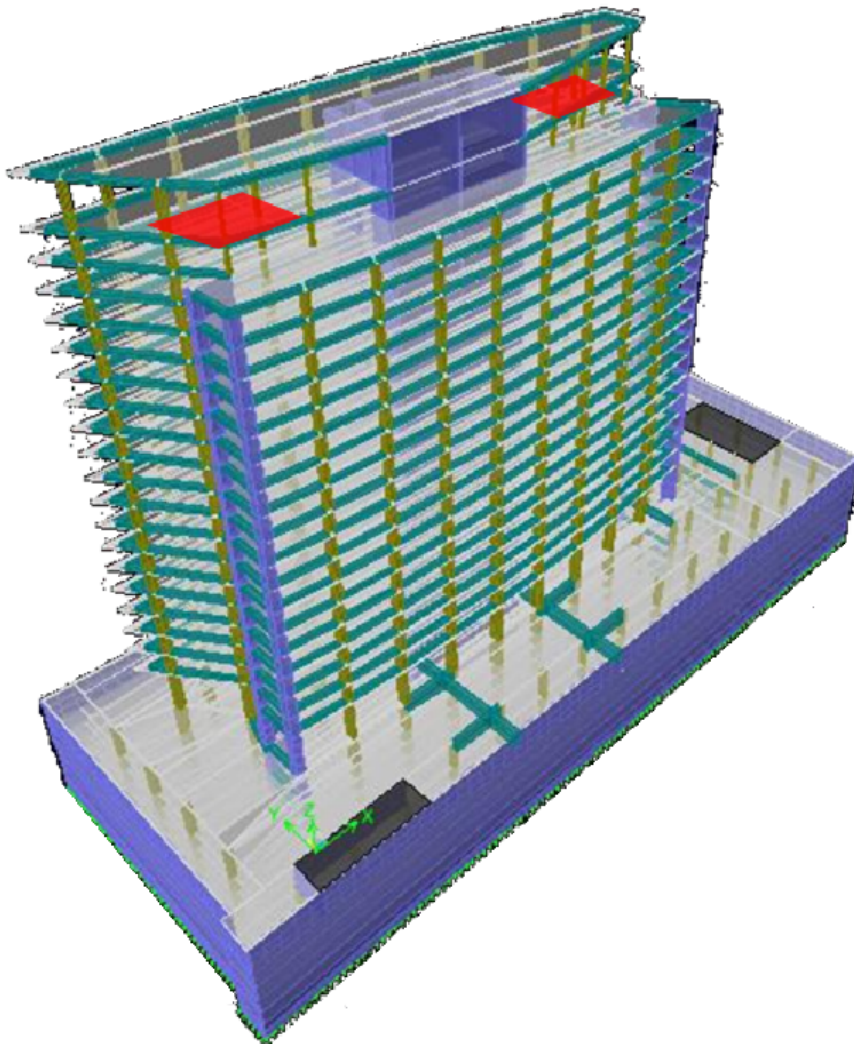


Figura 2. Modelo del edificio Parque Araucano con la ubicación de los AMS.

Los objetivos planteados fueron:

- Mejorar la serviciabilidad al reducir las aceleraciones, velocidades y desplazamientos máximos, y al reducir la duración del movimiento.
- Disminuir el efecto de la torsión de las plantas.
- Disminuir daños en elementos estructurales y no estructurales en caso de un evento sísmico.

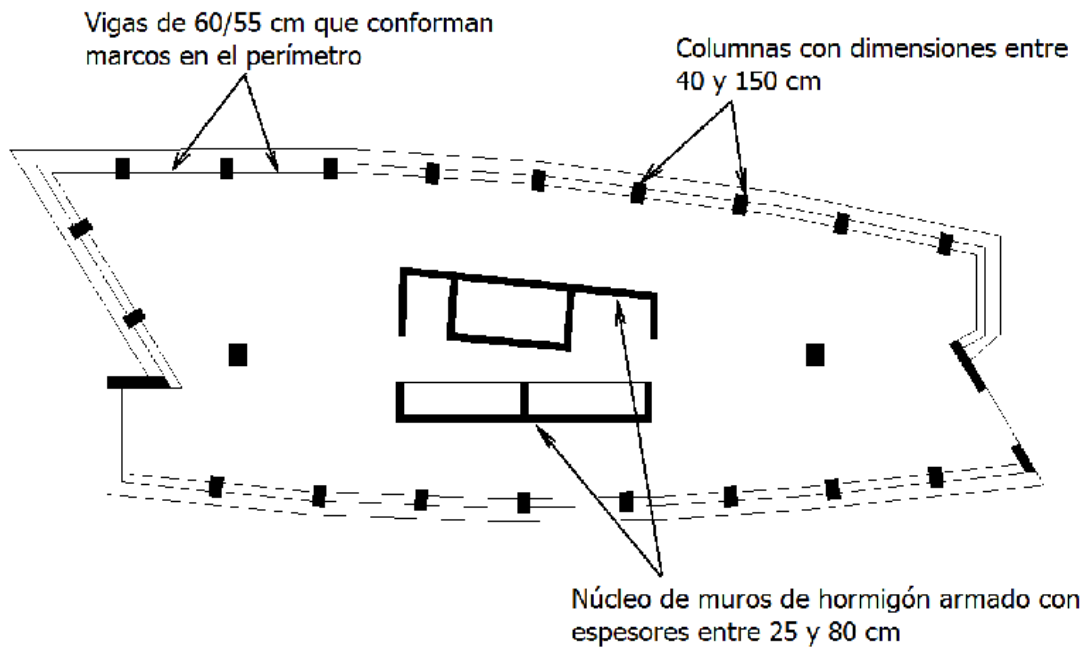


Figura 3. Vista en planta del piso tipo del edificio Parque Araucano.

El edificio tiene un periodo principal de 2.71 s, según el modelo, y que corresponde a un movimiento en dirección transversal. Las masas equivalentes de los primeros tres modos de vibrar se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Primeros tres modos de vibrar y masas equivalentes (%) del Edificio Parque Araucano

Modo	Periodo	Meq.X	Meq.Y	Meq.RZ
1	2.716	0.163	39.336	1.043
2	1.886	0.270	0.006	18.984
3	1.400	39.953	0.167	0.050

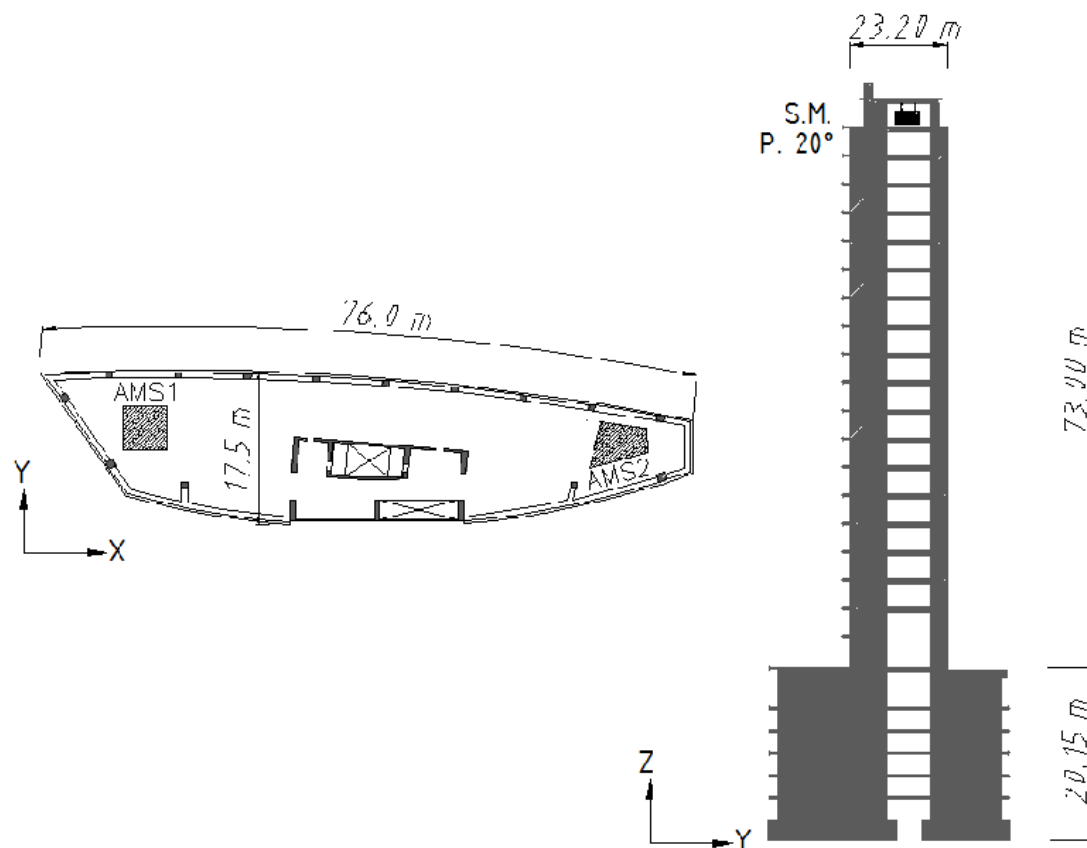


Figura 4. Planta del último piso y corte transversal Edificio Parque Araucano con ubicación de los AMS..

El edificio tiene dos AMS en el piso de la sala de máquinas (piso 21), que se eligieron con una masa del 1% de la masa del primer modo de vibrar, que corresponde a 150 ton cada uno y que tienen como objetivo disminuir el movimiento en la dirección transversal (dirección Y) durante un sismo y disminuir la duración de las oscilaciones posteriores.

El edificio se modeló en ETABS con diafragmas rígidos. Los elementos de hormigón se analizaron en forma lineal elástica.

El comportamiento elástico de los AMS se logró colgando las masas como un péndulo y así usando el peso como fuerza restitutiva. El periodo se ajustó través del largo del péndulo y el amortiguamiento se logro con amortiguadores viscoelásticos. Ver Fig. 5.

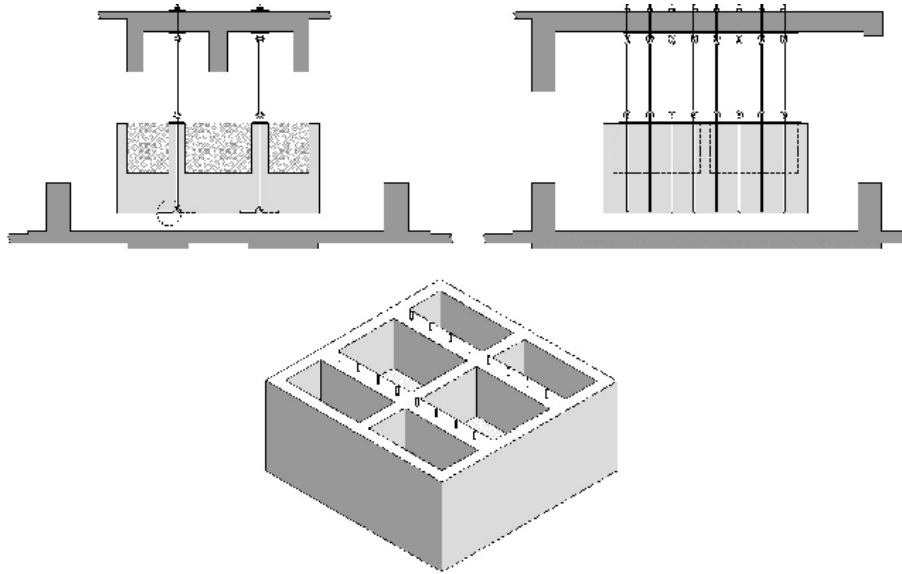


Figura 5. Detalles AMS de 150 ton (sin amortiguador).

5. FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA DEL EDIFICIO PARA VARIOS NIVELES DE AMORTIGUAMIENTO

Para distintas configuraciones de AMS y amortiguamiento lineal se obtuvo la respuesta del edificio frente a una aceleración sinusoidal en la base. Se eligió usar amortiguamiento lineal ya que al ser el movimiento basal sinusoidal, hay una equivalencia energética exacta. El utilizar un amortiguamiento no lineal lleva al problema que la función de transferencia depende adicionalmente de la amplitud de los movimientos, la que depende de los registros que efectivamente actuarán sobre la estructura.

La Fig. 6 muestra la función de transferencia (sin la fase) para el movimiento del centro de gravedad del piso bajo los AMS, piso 20, frente al movimiento basal (input), para el rango de periodos de 2 a 4 s. El gráfico se obtiene de la respuesta del edificio en régimen permanente para registros sinusoidales y en algunos programas es de ayuda la función Steady State.

En este caso se ha preferido usar amortiguamiento lineal ya que así el grafico se independiza de la amplitud del movimiento y del coeficiente Alfa. Por otro lado cualquier amortiguador no lineal es equivalente a un determinado amortiguador lineal para una sollicitación sinusoidal en régimen permanente.

Se observa que para la sollicitación armónica hay una zona entre los 3 y 3.2 s en que el comportamiento de la estructura con AMS es aún peor que sin AMS. También se observa que el amortiguamiento suaviza estas curvas disminuyendo la respuesta del edificio y aumenta el ancho de banda.

Se observa que para los amortiguamientos usados se obtiene una disminución en la amplitud del movimiento.

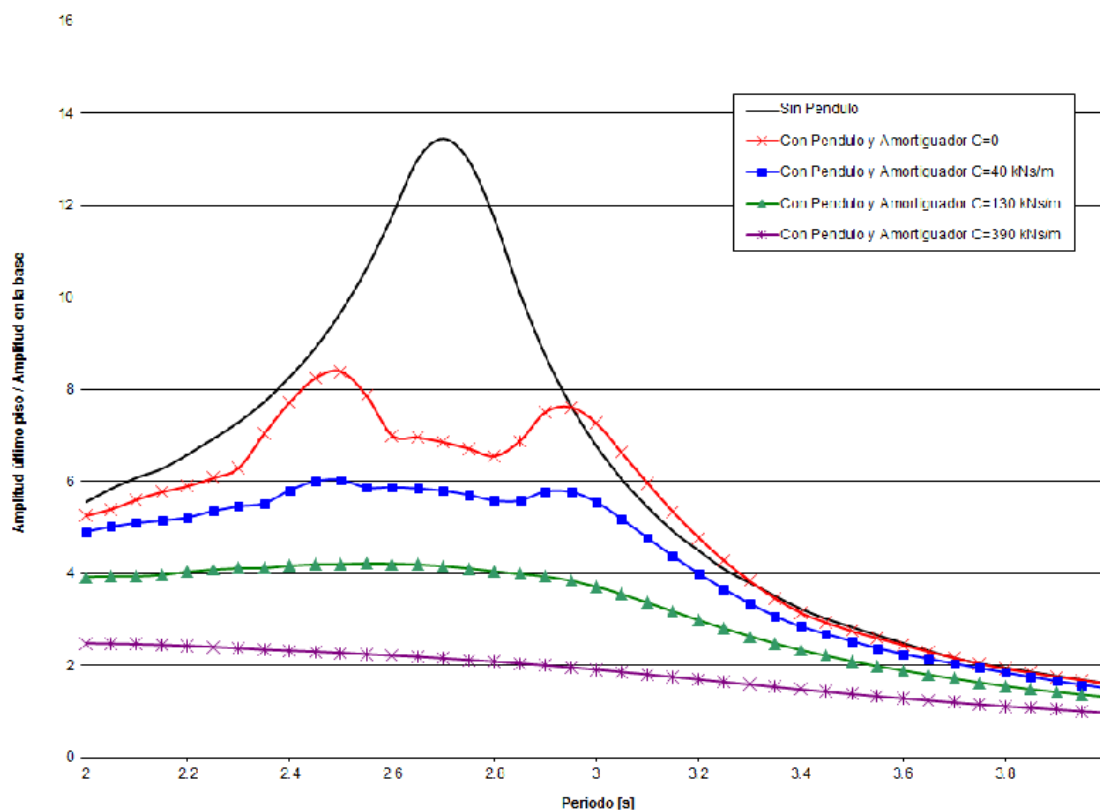


Figura 6. Función de transferencia para el CG del piso 20 obtenida con ETABS para distintas configuraciones.

6. VERIFICACIÓN CON REGISTROS REALES

Con el objetivo de encontrar los desplazamientos máximos del AMS y las velocidades máximas para poder diseñar el amortiguador, se usaron 7 pares de registros sintéticos compatibles con la NCh2745, of.2003 Suelo B, Zona II, que tienen aceleraciones máximas de hasta 5,30 m/s² y un contenido de frecuencias entre 0,3 y 10 Hz.

Al ser los todos los registros usados compatibles con un espectro particular (NCh2745, Suelo B, Zona II) se obtienen velocidades y desplazamientos máximos para el amortiguador que son similares aunque no iguales. El uso de registros compatibles con otros espectros llevará a resultados distintos.

La Fig. 7 muestra el espectro de la componente "x" del primer registro utilizado en comparación con las NCh433 of.2009 y NCh2745 of.2003. Se omite el espectro de aceleraciones para los otros registros por ser muy parecidos.

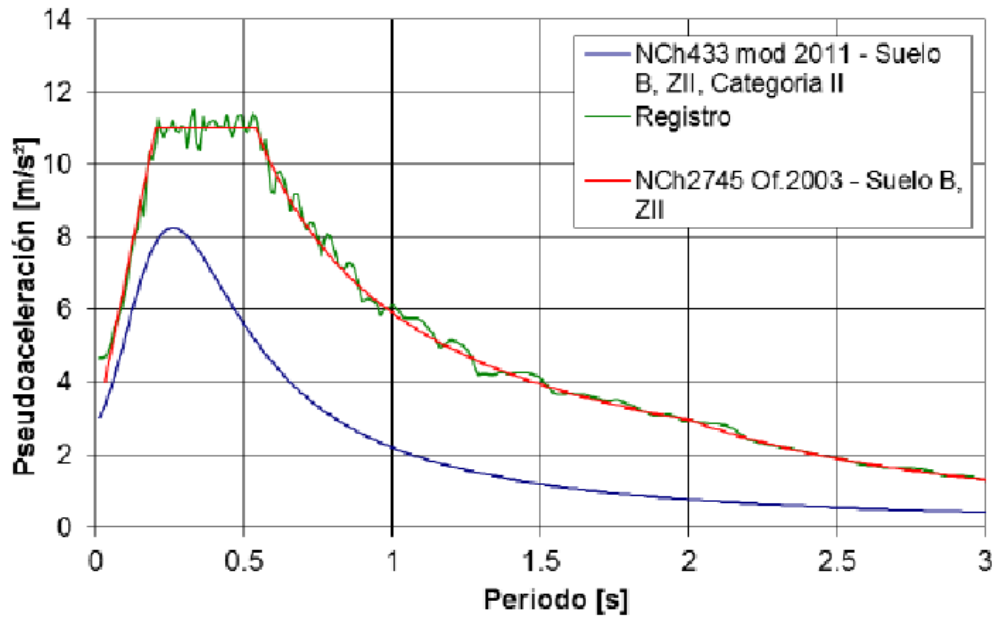


Figura 7. Espectro de aceleración, registro 1x, con 5% de amortiguamiento.

Los registros de aceleraciones “1x” y “2x” se muestran en las Fig. 8 y 11.

Al procesar el modelo del edificio con los AMS y con registros adecuados se obtienen requerimientos de desplazamiento para los amortiguadores y periodos de oscilación que sirven de base para una primera selección de estos.

A continuación se realizó un análisis con amortiguadores no lineales (amortiguador con $\alpha=2$) para verificar las velocidades y fuerzas máximas que son datos que entrega el fabricante, para ello se usaron 7 pares de registros, que tiene diferentes sismos en las direcciones “x” e “y”

Las Fig. 9 y 12 muestran el desplazamiento de ambos amortiguadores para los dos primero pares de registros.

Las Fig. 10 y 13 comparan la forma del registro y el desplazamiento de los amortiguadores para el 1° y 2° set de registros respectivamente.

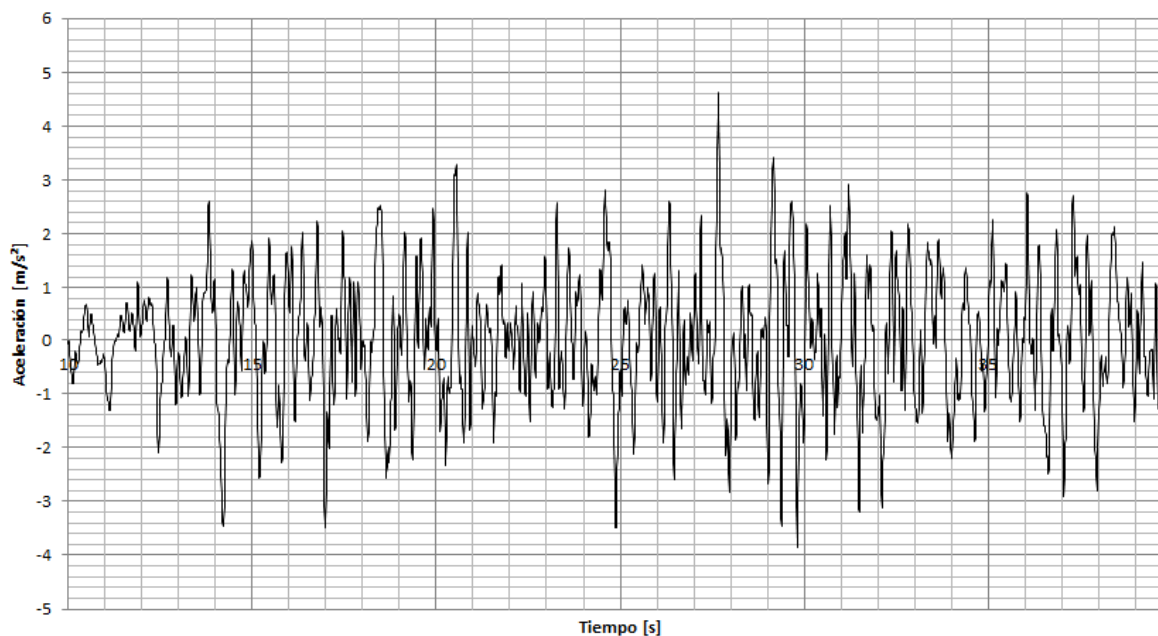


Figura 8. Registro de aceleraciones en "x" del 1° set de registros (parcial)..

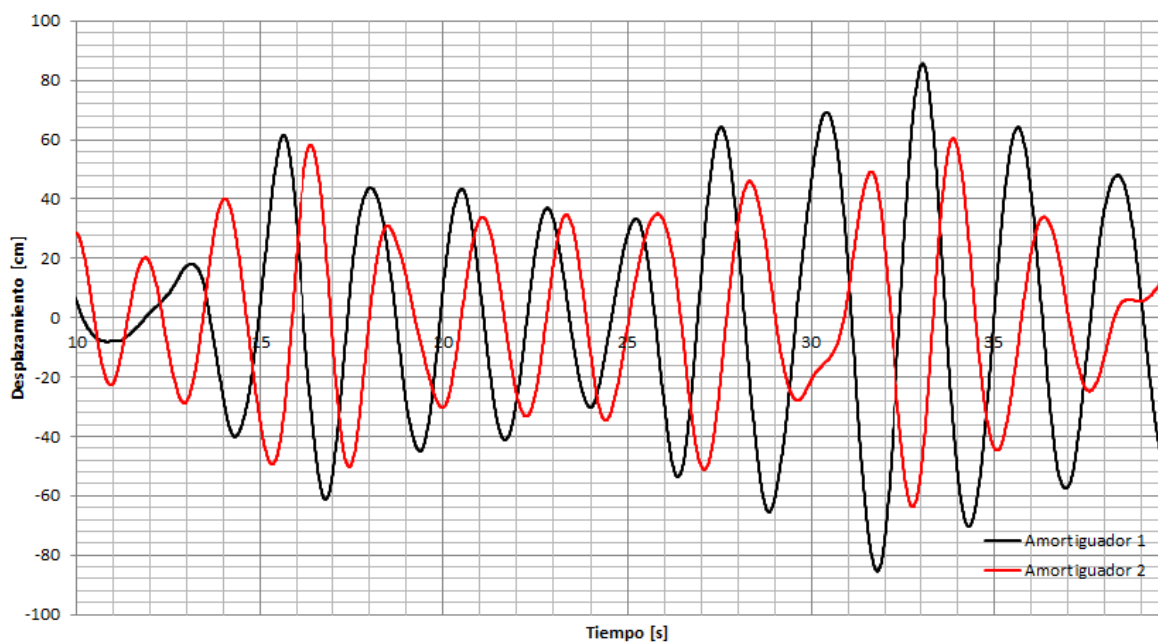


Figura 9. Desplazamiento de los amortiguadores para el 1° set de registros.

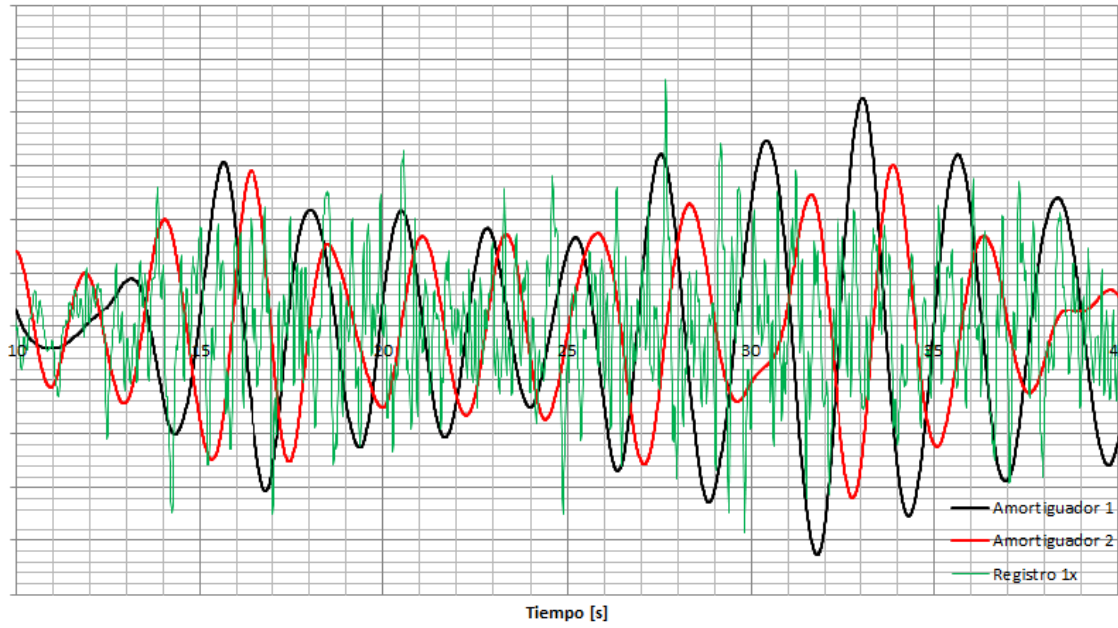


Figura 10. Comparación de la forma del registro y del desplazamiento de los amortiguadores para el 1° set de registros.

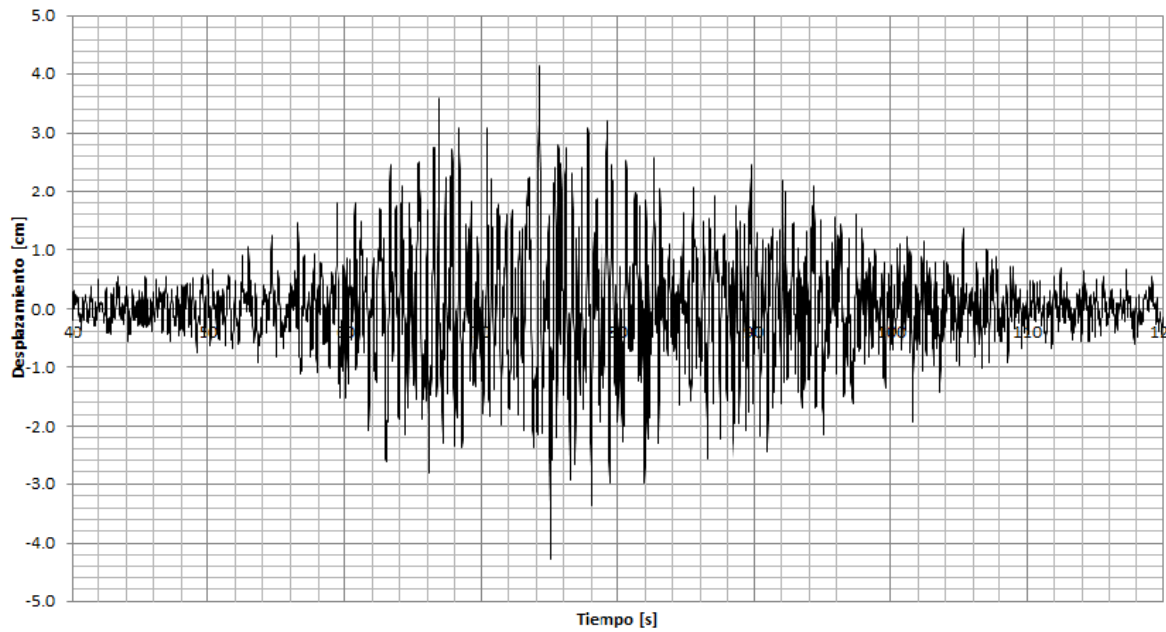


Figura 11. Registro de aceleraciones en "x" del 1° set de registros (parcial).

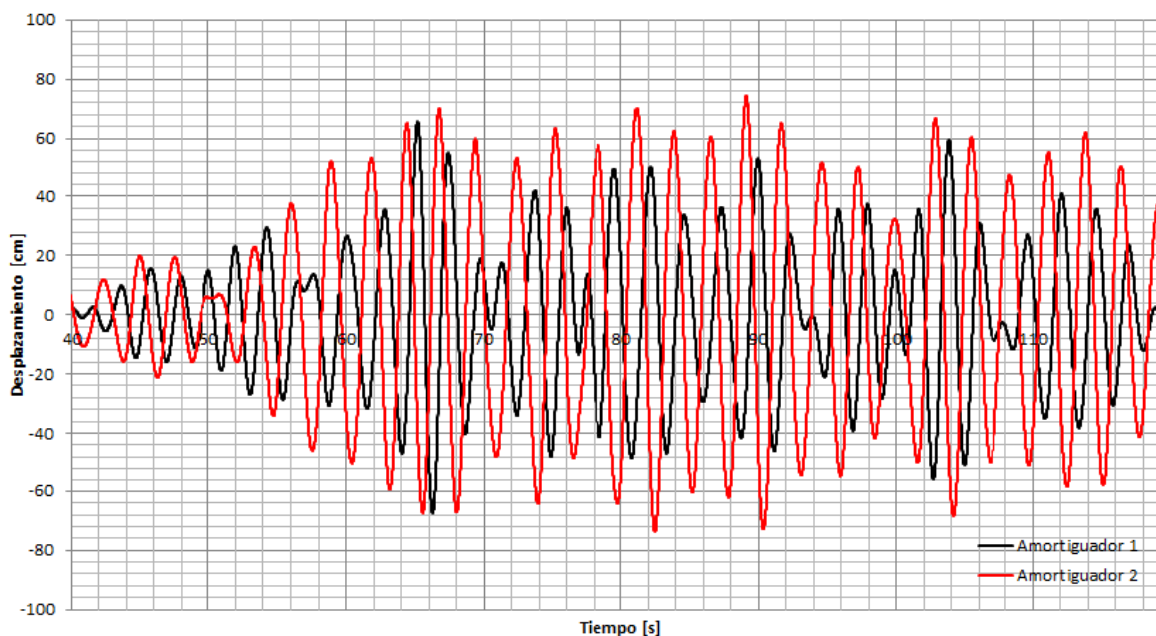


Figura 12. Desplazamiento de los amortiguadores para el 2° set de registros.

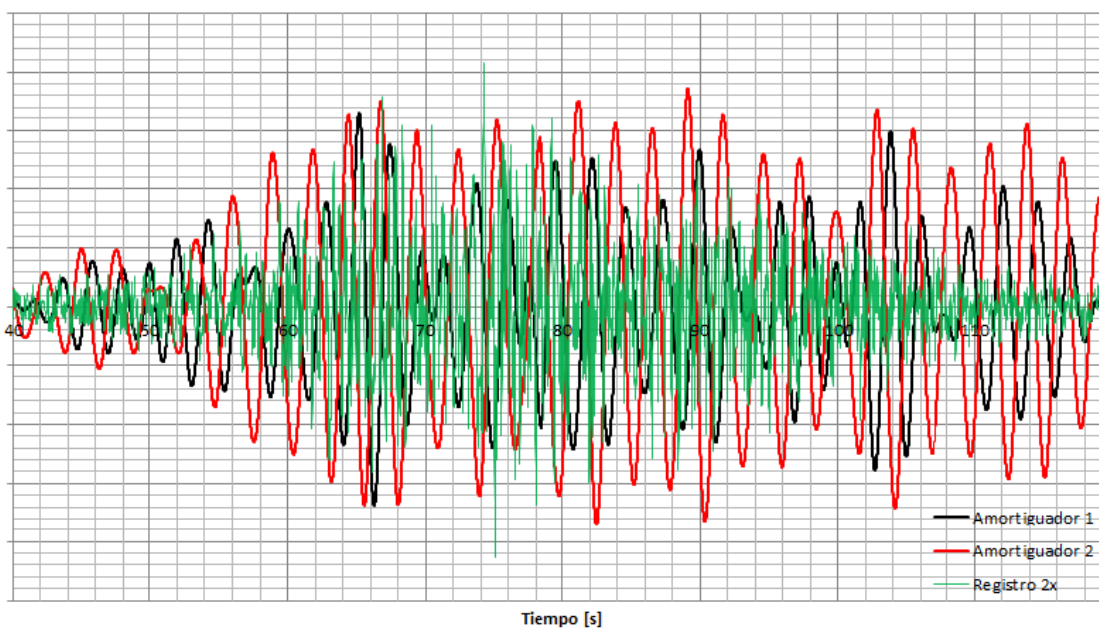


Figura 13. Comparación de la forma del registro y del desplazamiento de los amortiguadores para el 2° set de registros.

Las Fig. 9 y 12 reflejan el movimiento del péndulo y muestran aproximadamente el periodo de estos. Al comparar estas figuras con el registro de aceleraciones se aprecia fuertemente un filtrado de las frecuencias altas por parte del edificio y del AMS.

Al comparar el desplazamiento del amortiguador con los registros, Fig. 10 y 13, no se observa una clara correspondencia entre los registros y el movimiento del amortiguador.

Se observa que en repetidas ocasiones y en corto tiempo el AMS presenta discontinuidades en su movimiento como adaptándose al del edificio.

En ambos casos se observa un desplazamiento máximo del orden de aproximadamente 70 cm con un periodo de 2.75 s que para un amortiguador con $C = 56.91 \text{ kN}/(\text{m/s})^\alpha$ con $\alpha=2$, que corresponde al usado en la modelación, conlleva a un amortiguamiento lineal equivalente de $C = 77.3 \text{ kNs/m}$. A través del gráfico de la Fig. 6 es posible estimar la función de transferencia aunque también es posible nuevamente deducir numéricamente la curva completa, esta vez para un amortiguamiento no lineal.



Figura 14. AMS con amortiguador..

El terremoto del Maule del año 2010 que fue de magnitud 8,8 Mw y tuvo una intensidad VIII en la zona del edificio encontró al edificio terminado y habilitado aunque los amortiguadores no estaban instalados. El edificio no presentó daños ni en su estructura ni en la habilitación pero esto no es atribuible directamente a los AMS ya que los edificios vecinos tampoco presentaron daños.

7. CONCLUSIONES

Si bien un AMS es un sistema efectivo para la reducción de amplitudes de vibración, este debe estar ajustado a la frecuencia de la sollicitación. Para frecuencias parecidas o en transientes pueden producirse amplitudes mayores. La incorporación de amortiguamiento adecuado lleva a una ampliación del ancho de banda por lo que aunque pueda disminuir la eficiencia en la zona el periodo principal se logra un mejor comportamiento para un rango mayor de vibraciones descartando además la posibilidad de una influencia negativa de estos sobre el sistema.

REFERENCIAS

- [1] Christopoulos C., Filiatrault A. Principles of passive supplemental damping and seismic isolation. IUSS Press 2006;277-297.
- [2] Wilson E. Three dimensional static and dynamic of structures. CSI 2001.
- [3] Lee Cl, Chen, Cw, Chung LI, Wang, Yp. Optimal design theories and applications of tuned mass dampers. Engineering Structures 2006.
- [4] Yeh K., Chen CW., Lo DC., Liu K., Neural-network fuzzy control for chaotic tuned mass damper systems with time delays. Journal of vibration 2012.