

Determinación de parámetros óptimos de AMS en un edificio de acero de 28 pisos

N. Machuca¹, N. Maureira², F. Sanhueza³

RESUMEN

Esta investigación tiene por objetivo encontrar un diseño óptimo de AMS en un edificio de acero de 28 pisos. Para lo anterior se debió adaptar la arquitectura de un edificio de hormigón existente en el centro de Concepción, para obtener un edificio de acero de similares características. Se construyó un modelo estructural del edificio en el software ETABS para realizar análisis dinámico del edificio con y sin AMS. Se establecieron rangos razonables para los parámetros de diseño del AMS, estos fueron: masa y razón de amortiguamiento crítico, los cuales fueron utilizados en el análisis paramétrico. De los resultados del análisis se determinó la efectividad del AMS en la reducción de la respuesta de la superestructura en todos los casos de análisis. Para lo anterior, se definieron como respuestas objetivo el corte basal, aceleración y desplazamiento de techo. De los resultados del análisis se determinaron los parámetros óptimos de diseño, masa y amortiguamiento, del AMS, en las dos direcciones de análisis. A partir de lo anterior se pudo determinar que se logra minimizar las respuestas objetivos al considerar un AMS con masa igual al 1,5% de la masa de la superestructura y 30% de amortiguamiento crítico. Sin embargo, los parámetros considerados como óptimos en el diseño dependerán del factor económico o costo de incorporar la tecnología. Esto debido a que en la medida de que el tamaño del AMS crece, la respuesta podría reducirse aún más, pero sólo marginalmente en comparación con el incremento del costo del dispositivo. Por lo anterior, la elección de diseño dependerá concretamente del sector económico al que vaya dirigido el proyecto.

PALABRAS CLAVES: Amortiguamiento de masa sintonizada; determinación de parámetros óptimos; corte basal; desplazamiento de techo; aceleración de techo.

ABSTRACT

This research aims to find an optimal AMS design for a 28-story steel building. For the above, the architecture of an existing concrete building in the center town of Concepción was adapted to obtain a steel building with similar characteristics. A structural building model was built in the software ETABS to perform a series of dynamic analysis of the building with and without AMS. Reasonable ranges were set for the AMS design parameters, those were: mass and critical damping ratio, which were used in the parametric analysis. From the results of the analysis the effectiveness of the AMS in the reduction of the superstructure responses in all the cases of analysis was determined. For the above, the baseline shear load, acceleration and displacement of the roof were defined as objective responses. From the results of the analysis, the optimum parameters of design, mass and damping of the AMS, were determined in the two directions of analysis. From the above it was able to determine that it is possible to minimize the objective responses when considering an AMS with mass equal to 1.5% of the mass of the superstructure and 30% of critical damping. However, the parameters considered as optimal in the design will depend on the economic factor or cost of incorporating the technology. This is because as the size of the AMS grows, the response could be reduced further, but only marginally compared to the increase in device cost. Therefore, the choice of design parameters of the AMS will depend in particular on the economic sector to which the project is directed.

KEYWORDS: Tuned mass damping; Determination of optimal parameters; Basal cut; Roof shifting; Roof acceleration.

¹ Estudiante, Carrera de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, npmachuca@ing.ucsc.cl

² Profesor Auxiliar, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, nmaureira@ucsc.cl

³ Profesor Asistente, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, franksanhueza@ucsc.cl

1. INTRODUCCIÓN

Chile se ubica en el borde sur este del cinturón de fuego del pacífico, donde se concentra más del 90% de la energía sísmica liberada en promedio al año. Corresponde por lo tanto a uno de los países más sísmicos en el mundo (Notimérica, 2016). Esto hace que la ingeniería sísmica sea un tópico de enseñanza mínima en todos los programas de estudio de las carreras de ingeniería civil de nuestro país.

Como es sabido, el crecimiento de la población ha sugerido la necesidad de construir edificios a gran altura, los cuales tienden a ser muy livianos y delgados. Estos presentan un amortiguamiento muy pequeño, volviéndolos más propensos a las oscilaciones, ya sea por sismos o por viento (Montaro, 2002). El terremoto del 27 de febrero del 2010, que produjo daños estructurales severos en muchos edificios, causó inseguridad en las personas y reticencia a habitar este tipo de estructuras. Esto generó preocupación en los ingenieros calculistas, lo cual condujo a modificaciones en la norma de diseño sísmico de edificios, NCh433, tendientes a la obtención de edificaciones más seguras. Adicionalmente, las inmobiliarias se vieron motivadas a incluir protección sísmica, en vista del interés generado en el mercado debido al citado terremoto. Tal es el caso de los diseños con la participación del equipo de ingeniería SIRVE (SIRVE, Sistemas de protección sísmica, 2013).

Una de las alternativas más eficaces y de bajo costo para el mejoramiento de la seguridad de las estructuras existentes son los amortiguadores de masa sintonizada (AMS) o tuned mass dampers (TMD) (Araya & Philippe, 2012). Estos dispositivos están compuestos por una masa, un elemento elástico y un amortiguador. Esto trabajando en conjunto con la estructura, permite atenuar las vibraciones no deseadas debido a la acción de cargas dinámicas. El mecanismo de funcionamiento del AMS establece que éste debe estar en sintonía con la frecuencia de vibración fundamental de la estructura que protege, esto es, ambos tienen igual frecuencia fundamental. De este modo, el AMS vibra en resonancia con la forma modal predominante de la superestructura que es la que prevalece en su respuesta, incrementando sus desplazamientos debido al efecto de resonancia. La respuesta del AMS estaría en contrafase con la respuesta de la superestructura, imponiéndole a ésta cargas que contrarrestan parte de la acción de la sollicitación dinámica externa. Adicionalmente, los grandes desplazamientos del dispositivo en conjunto con el amortiguamiento adicionado, permiten disipar gran cantidad de la energía impuesta por las cargas externas (Montaro, 2002). Los AMSs pueden ser materializados de diferentes formas constructivas para proporcionar la masa, rigidez y amortiguamiento requeridos. Al instalarse en el techo del edificio, ofrecen la ventaja de no intervenir su arquitectura. Estos pueden generar reducciones entre un 25% y un 35% en las deformaciones de la estructura. Son más eficientes para reducir la respuesta en edificios habitacionales altos (más de 15 pisos) (SIRVE, Sistemas de protección sísmica, 2013).

Este trabajo busca implementar un diseño óptimo de AMS en un edificio de acero de 28 pisos con el fin de reducir las respuestas objetivo de corte basal, aceleración y desplazamiento de techo. Para esto se debió adaptar la arquitectura de un edificio de hormigón armado existente para obtener un edificio de acero de similares características. Se realizó el modelamiento sísmico y diseño de los elementos metálicos del edificio en el software ETABS, conservándose la losa y muros de hormigón armado. Se definieron diferentes modelos de AMSs según sus parámetros de diseño —masa y razón de amortiguamiento—. Se realizó un análisis tiempo-historia considerando como input sísmico un terremoto artificial basado en los registros del terremoto del 27 febrero de 2010 en las direcciones ortogonales de análisis X e Y en forma separada. Esto con el fin de determinar si la incorporación de amortiguadores de masa sintonizada funciona adecuadamente en el edificio. Con ayuda de un análisis paramétrico que integra las tres R.O. en sus dos direcciones ortogonales, se comprobó que pueden minimizarse óptimamente al considerar un AMS con masa igual al 1,5% de la masa de la superestructura y 30% de amortiguamiento crítico. Sin embargo, los parámetros considerados como óptimos en el diseño dependerán del factor económico o costo de incorporar la tecnología.

A modo de ejemplo, el edificio Parque Araucano ubicado en Las Condes, posee un par de AMSs que consisten en masas de concreto rellenas con bolones de acero de 150 ton en total cada uno. Este edificio constituyó un hito en la ingeniería sísmica chilena, pues en su interior se instalaron dos AMSs diseñados y proyectados por VMB, siendo los primeros de Sudamérica. Estos AMS reducen considerablemente el nivel de daños provocados por un sismo, lo cual quedó demostrado en el terremoto del 27 de febrero de 2010 con el excelente desempeño del edificio, con

nulo daño en la estructura y en el contenido, aseguran los ingenieros de VMB, cuyas oficinas se encuentran en este edificio (SIRVE, www.sirve.cl, actualizada 2012).



Figura 1: AMS edificio parque Araucano (SIRVE, 2012)

Tabla 1: Ejemplos de edificios con AMS en Chile (Garrido, B.I., 2016)

Nombre	Uso	N pisos	Ubicación en Chile	Características
Parque Araucano	Oficina	22	Las Condes	2 AMS de 150 ton c/u
Geo centro Agustinas	Residencial	36	Santiago	2 AMS de 200 ton c/u
Jardines de Infante	Residencial	18	Ñuñoa	2 AMS de 200 ton c/u
Las Condes Capital	Residencial	19	Las Condes	2 AMS de 150 ton c/u
Cerro Colorado	Residencial	15	Las condes	2 AMS de 115 ton c/u
1K	Residencial	16	Las Condes	2AMS
Trilogía Sur	Residencial	23	Antofagasta	1AMS de 90 ton
Brisas de Costa Laguna	Residencial	23	Antofagasta	2AMS
Cámara Chilena de la Construcción	Oficina	23	Las Condes	1AMS

Un ejemplo emblemático del uso de AMS corresponde a la torre Taipei 101, de 101 pisos de altura, ubicada en la ciudad de Taipei, Taiwán, inaugurado en 2004. Esta torre se diseñó con un péndulo de acero con forma esférica de 660 toneladas que sirve como un amortiguador de masa sintonizada, y se encuentra suspendido desde el piso 92 hasta el piso 87. El péndulo se balancea para compensar los movimientos en el edificio causados principalmente por fuertes ráfagas de viento. Su masa amortiguadora, la más grande del mundo al momento de su construcción, se compone de 41 placas de acero circulares, cada una con un espesor de 125 mm, soldadas entre sí para formar una esfera de diámetro de 5,5 m (Lanzen, A., 2008).

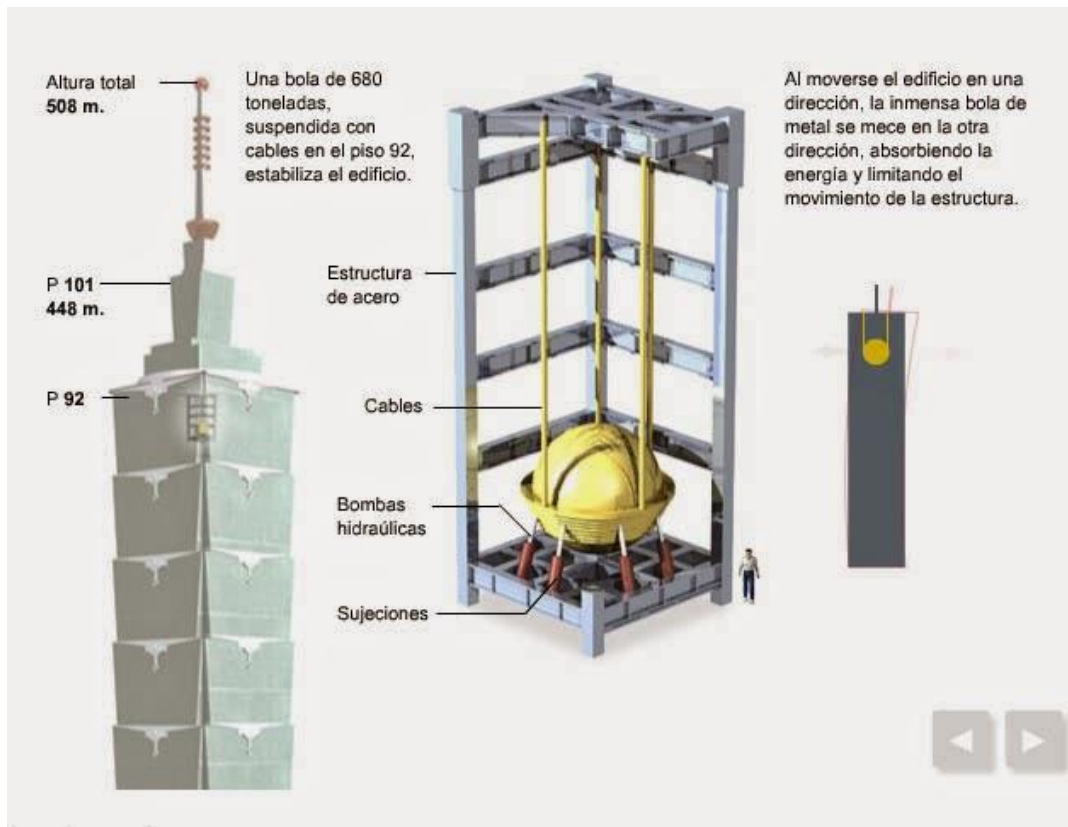


Figura 2: AMS torre Taipei (Lanzen, A., 2008)

Tabla 2: Ejemplos de edificios con AMS en el mundo (Garrido, B., 2016)

Nombre	Uso	N pisos	Ubicación en el mundo	Características
Shanghai world financial center	Oficinas, hoteles y centros comerciales	118	China	2 AMS
Shanghai tower	Oficina, comercio y ocio	128	China	1 AMS de 100 ton
Burj Al-Arab	Hotel	56	Emiratos Árabes Unidos	3 AMS
Citigroup center	Oficinas	59	New York	1 AMS de 400 ton
John honcock tower	Oficinas, viviendas y comercio	60	Boston	2 AMS de 270 ton c/u
Trump world tower	Residencial	72	Nueva york	1 AMS de 600 ton
Yokohama Landmark tower	Hotel de 5 estrellas	71	Japón	1 AMS de 340 ton
Shinjuku Park tower	Oficinas, hoteles y centros comerciales	52	Tokio	3 AMS de 110 ton c/u
One Canada square	Oficinas y centros comerciales	50	Reino unido	1 AMS
Taipei 101	Oficina, comercio y ocio	101	Taiwán	1 AMS de 660 ton

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo general

Determinar parámetros óptimos de diseño de un AMS instalado en la azotea de un edificio de acero de 28 pisos, obtenidos al minimizar la respuesta estructural del sistema sometido a un registro sísmico sintético compatible con la NCh433 para el sitio del emplazamiento.

2.2 Objetivos específicos

- Adaptar la arquitectura de un edificio de hormigón de 28 pisos existente en el centro de Concepción, para obtener un edificio de acero de similares características.
- Construir modelo estructural de edificio en software ETABS para realizar análisis dinámico de: periodos, masa, rigidez, input sísmico y respuesta del edificio sin AMS.
- Definir modelos estructurales con AMS en software ETABS, según los rangos en los cuales varían los parámetros de diseño de este, masa y razón de amortiguamiento.
- Definición de respuestas objetivo para determinar efectividad de implementación de AMS en los diferentes casos de análisis.
- Determinar los parámetros óptimos de diseño del amortiguador de masa sintonizada, esto es, masa y razón de amortiguamiento, en las direcciones de análisis X e Y.

3. METODOLOGÍA

3.1 Adaptación del edificio de hormigón armado a acero

Se tomó como modelo de análisis una adaptación estructural de la torre del edificio mall del centro, la cual está destinada a habitaciones de hotel y recintos de uso comercial y de oficinas. Se escogió este edificio por ser actualmente el más alto en Concepción —28 pisos—, además de tener una singular planta trapezoidal. En la modelación se mantuvieron las dimensiones en planta, altura y número de pisos, además de ubicación de núcleos de muros. Sin embargo, los marcos no arriostrados que conforman el edificio real fueron cambiados de hormigón a acero, ya que lo que se buscaba es saber cómo se comportaba un edificio de acero con las mismas características que uno de hormigón ante la sollicitación de un sismo.

3.2 Diseño de elementos metálicos del edificio

Para determinar las dimensiones de los elementos metálicos se realizó un análisis modal espectral basado en la NCh 433 of 1996 modificada el 2009 más el Decreto Supremo 61 actualizado, (NCh 433, 1996). En el análisis elástico lineal de la estructura sin AMS se utilizó el método de análisis modal espectral. De los resultados de este análisis se determinó la demanda sísmica en los elementos y se escogieron secciones adecuadas para ellos.

En el análisis y diseño se consideró acero ASTM A572, con tensión de fluencia $F_y=3.500 \text{ kg/cm}^2$ y tensión de rotura $F_u=4.500 \text{ kg/cm}^2$. El hormigón se consideró H-40, con $f_c'=281 \text{ kg/cm}^2$. Los perfiles utilizados para el diseño son del tipo IN y HN, con elementos soldados para poder crear perfiles adecuados para este diseño. Las dimensiones fueron estimadas según los elementos de hormigón del edificio original. Se utilizaron elementos de tipo “I/Wide flange section” para columnas y vigas, y elementos Shell de 4 nodos para muros de hormigón. Las losas fueron modeladas como elementos Shell de 4 nodos, segmentadas en los paños entre vigas. Se agregó un diafragma horizontal rígido en cada piso que considera losas indeformables en su plano.

Los parámetros de macro-zonificación y micro-zonificación sísmica necesarios para construir el espectro de diseño son obtenidos desde tablas que están en la NCh 433 y decreto supremo 61. El parámetro T^* que corresponde al período del modo con mayor masa traslacional en la dirección de análisis, presenta dos valores diferentes, uno para cada dirección de análisis, X e Y. Estos se obtienen mediante el programa ETABS al realizar un análisis de

valores y vectores propios. Los datos específicos para obtener el espectro de diseño son los mostrados en la tabla siguiente:

Tabla 3: Parámetros sísmicos, (NCh 433, 1996)

Categoría del edificio	II
Zona sísmica	3
Tipo de suelo	C
Factor de modificación de la respuesta, R	7
Factor de modificación de la respuesta, R_0	11
Período fundamental, T_x^*	2,2
Período fundamental, T_y^*	1,8
A_0	0,4*g
S	1,05
T_0	0,4
T'	0,45
n	1,4
p	1,6
I	1

La carga sísmica del edificio se calculó según los parámetros de la **Tabla 3**, según esos valores se tiene los espectros de diseño para determinar la demanda sísmica del edificio para ambas direcciones de análisis, X e Y.

En **Tabla 4** se muestran los elementos metálicos obtenidos luego de rediseñar el edificio (Pincheira, M. et al, 2017), en donde las propiedades de los elementos no variaron al aumentar la altura del edificio.

Tabla 4: Dimensión final de elementos (Pincheira, M. et al, 2017)

Elementos	Material	Sección
Vigas	A-50	IN 700x450x45x20
Viguetas	A-50	IN 200x150x10x5
Columnas	A-50	HN 900x900x55x40
Losa	H-A	15 cm
Muros	H-A	25 cm

A continuación, se muestra cómo varía la forma de las plantas a medida que aumenta la altura del edificio. En el círculo rojo puede verse la ubicación del centro de masa de la última planta correspondiente al piso 28, en donde se ubicará el AMS.

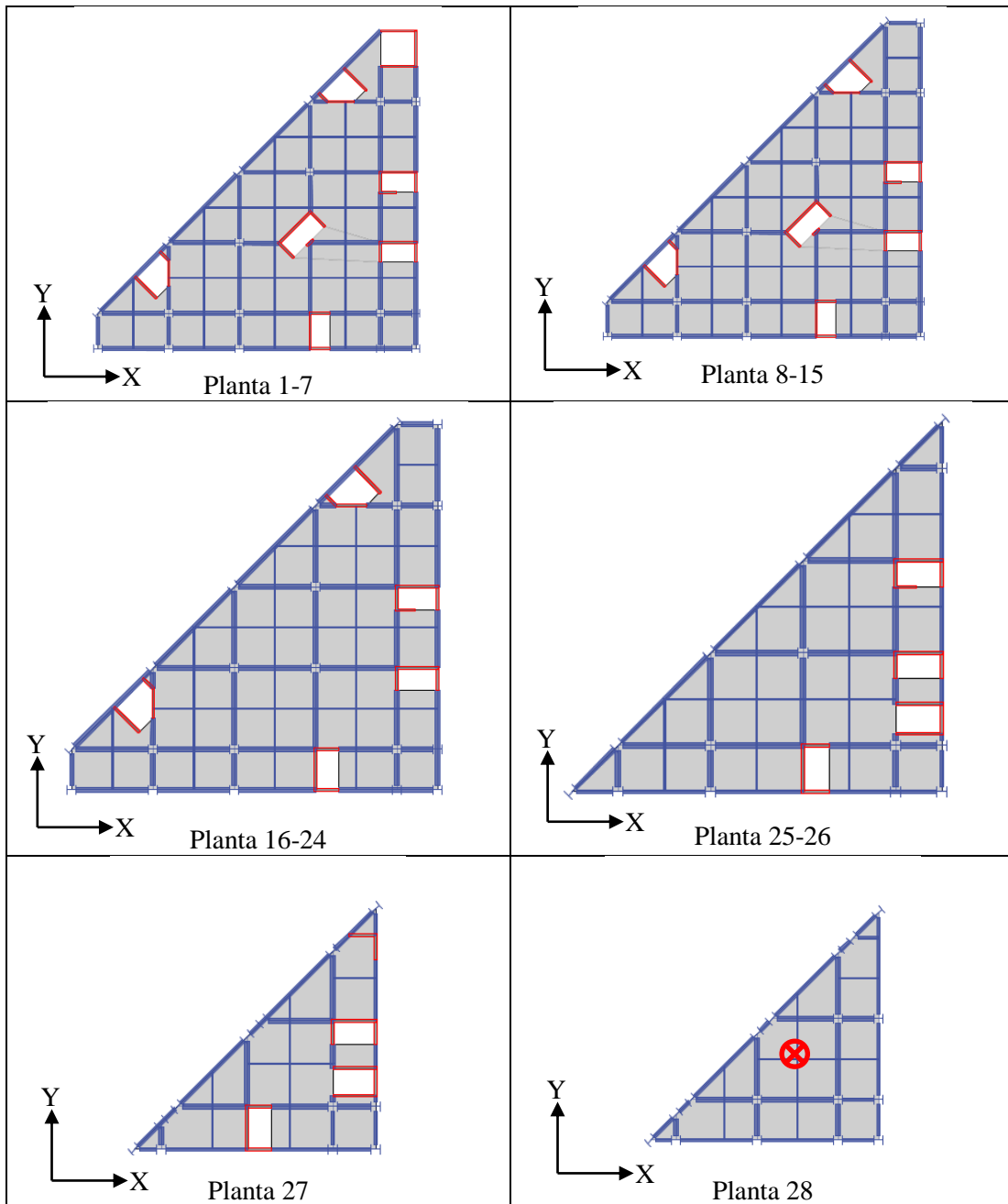


Figura
Plantas
edificio
piso y

3:
del
por

ubicación del centro de masa

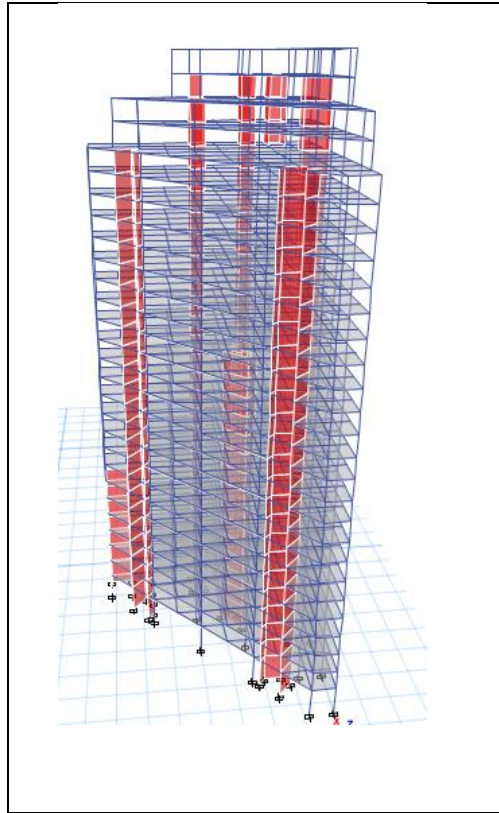


Figura 4: Modelo del edificio en 3D

3.3 Modelo estructural y respuesta objetivo

3.3.1 Input sísmico para análisis tiempo-historia

Para la determinación de la respuesta de los edificios con y sin AMS se utilizó un análisis dinámico tiempo-historia. Con el fin de determinar si la incorporación de amortiguadores de masa sintonizada funciona adecuadamente en este edificio en particular, se utilizó como input un terremoto artificial que se generó a partir del registro del evento ocurrido el 27 de febrero de 2010, medido en el centro de Concepción. Esto se realizó modificando de forma iterativa la amplitud del registro sísmico original en el dominio de la frecuencia, hasta hacer coincidir aproximadamente su espectro de respuesta con el espectro de diseño de la norma NCh 433. Este terremoto fue incorporado en las dos direcciones ortogonales de análisis en forma separada.

Como se muestra en **Figura 5**, el espectro de respuesta del sismo compatible o artificial generado se ajusta al espectro de diseño de la NCh433 (Pincheira, M., et al, 2017).

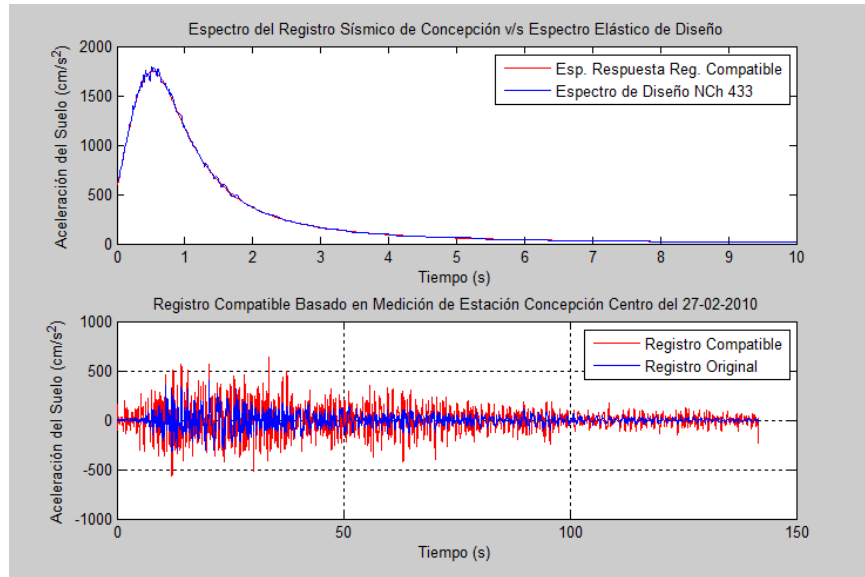


Figura 5: Sismo de referencia y artificial compatible con espectro de NCh433 (Pincheira, M., et al, 2017).

3.3.2 Modelo estructural

Se construyó un modelo de análisis en el software ETABS, sobre la base del modelo estructural del edificio sin AMS utilizado para el diseño de los elementos de acero. Tanto para el análisis del edificio con AMS como para el que no cuenta con este, se incorporó como input el registro sísmico sintético antes descrito.

En el caso del edificio con AMS se utilizó el mismo modelo anterior como referencia, pero se incorporó el dispositivo de masa sintonizada en la posición del centro de masa en la azotea. Se construyeron varios modelos estructurales de los edificios con diferentes parámetros para los AMS, con el fin de obtener la combinación de éstos que conduce a una mayor reducción de la respuesta.

3.3.3 Parámetros de los AMS

La masa del AMS se determinó como una proporción de la masa total del edificio, a partir del parámetro adimensional η , al cual se le asignó valores entre 0.5% y 3%. De esta forma, la masa del AMS, queda definida por:

$$M_{AMS} = \eta \cdot P_s / g \quad (1)$$

Donde P_s es el peso sísmico del edificio.

El período de oscilación natural del AMS por definición debe estar en sintonía o igualado al período fundamental de la estructura (período del modo con mayor masa traslacional) en la dirección de análisis, ya que esta igualación permitirá que el AMS se desacople con el edificio.

$$T_{AMS} = T_{edificio} \quad (2)$$

Por lo tanto, la frecuencia angular del AMS está dada por

$$\omega_{AMS} = 2\pi / T_{AMS} \quad (3)$$

La rigidez del AMS se obtiene según la masa y la frecuencia de este, y se obtendrá como sigue

$$K_{AMS} = \omega_{AMS}^2 \cdot M_{AMS} \quad (4)$$

El amortiguamiento de este dispositivo variará según la razón de amortiguamiento ξ_{AMS} , definida entre 5% y 30%, con un incremento del 5%. Esto permite determinar la constante de amortiguamiento como:

$$C_{AMS} = 2 \cdot \xi_{AMS} \cdot M_{AMS} \cdot \omega_{AMS} \quad (5)$$

Se construyeron modelos estructurales de edificios en el software ETABS, considerando todas las combinaciones de parámetros del AMS. Estas combinaciones están definidas en forma discreta por medio de los parámetros adimensionales η y ξ_{AMS} .

El AMS fue incorporado al modelo estructural del edificio mediante una masa puntual la cual fue restringida de giros y desplazamientos, excepto en la dirección de análisis sísmico. Esta fue conectada con un elemento del tipo “Link, Damper-Exponential” de ETABS, el cual incorpora las propiedades de amortiguamiento y rigidez.

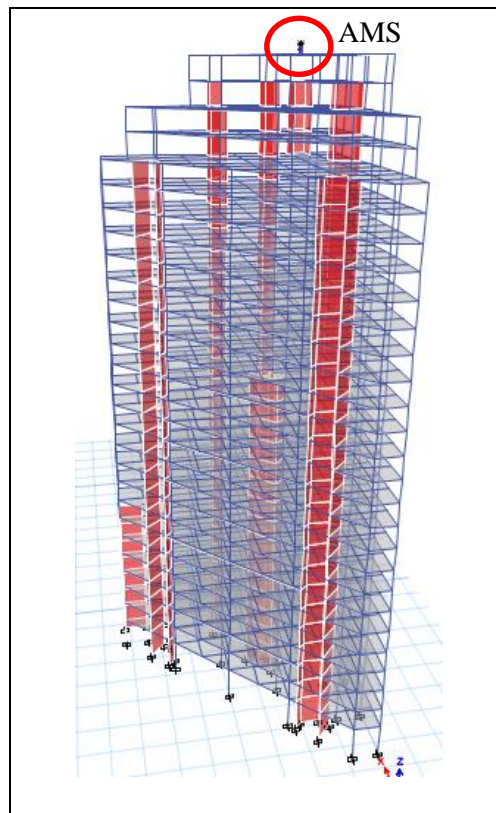


Figura 6: Esquema del modelo estructural del edificio y ubicación del AMS

Para el diseño del AMS se corrieron análisis con diferentes combinaciones de masa, rigidez y amortiguamiento de éste. Se buscó la combinación de dichos parámetros que conduce a la mayor reducción de las respuestas objetivo corte basal, aceleración de techo y desplazamiento techo. Sin embargo, es importante destacar que el incrementar demasiado los valores de rigidez, amortiguamiento o masa en el AMS podía generar un incremento en las respuestas objetivo por sobre la respuesta de estructura sin AMS.

3.3.4 Respuesta objetivo y reducción de respuesta

Se consideraron como respuestas objetivo de interés la aceleración absoluta de techo, deslizamiento de techo relativo al suelo y corte basal. Estas respuestas se escogieron debido a que tienen relación con la demanda sísmica en la estructura y la percepción del sismo por parte de los ocupantes, así como su efecto en los elementos muebles. Para evaluar la efectividad de la incorporación de AMS en la reducción de cada una de las respuestas objetivo se definieron respuestas normalizadas, dividiendo por la correspondiente respuesta máxima de la estructura sin AMS, como se describe a continuación.

Se define la aceleración de techo normalizado como:

$$\hat{A}_t^{(L)} = \frac{A_t^{(C/AMS)}}{A_t^{(S/AMS)}} \quad (6)$$

Donde el valor del $A_t^{(S/AMS)}$ es constante y se obtiene de la estructura sin AMS, el $A_t^{(C/AMS)}$ depende de la cantidad de disipación agregada a la estructura. De esta manera, valores de $\hat{A}_t^{(L)}$ menores a 1 implican una reducción en la respuesta objetivo.

Se define el corte basal normalizado como:

$$\hat{Q}_0^{(L)} = \frac{Q_0^{(C/AMS)}}{Q_0^{(S/AMS)}} \quad (7)$$

Donde el valor del $Q_0^{(L)}$ es constante y se obtiene de la estructura sin AMS, el $Q_0^{(C/AMS)}$ depende de la cantidad de disipación agregada a la estructura.

Se define el desplazamiento de techo normalizado como:

$$\hat{D}_t^{(L)} = \frac{D_t^{(C/AMS)}}{D_t^{(S/AMS)}} \quad (8)$$

Donde el valor del $D_t^{(L)}$ es constante y se obtiene de la estructura sin AMS, el $D_t^{(C/AMS)}$ depende de la cantidad de disipación agregada a la estructura.

3.3.5 Funcional para determinación de respuesta óptima

Para realizar la selección de los parámetros óptimos a implementar en el AMS se realizó un análisis global comparando la reducción de las tres respuestas objetivos en conjunto en ambas direcciones. Para ello se definió el orden de importancia de cada respuesta objetivo como: Aceleración de techo (como percibo el sismo), desplazamiento de techo (los esfuerzos internos) y corte basal (lo da la norma y define la sección indicada), considerándose aquellas direcciones en que se reflejara una reducción importante de la R.O. por sobre la otra dirección, así como también, que el delta de reducción no fuese tan alto entre una dirección y otra.

Todo lo anterior se realizó estableciendo un funcional matemático como se muestra en las siguientes ecuaciones, en donde el mayor valor de cada opción resultante indicará la mejor alternativa a escoger. Este funcional está compuesto por un cociente, donde su numerador busca maximizar la reducción de la R.O. y su denominador minimizar su diferencia de reducción.

$$F(\tilde{A}) = \frac{\tilde{A}_x + \tilde{A}_y}{\tilde{A}_x - \tilde{A}_y} \quad (9)$$

Donde:

\tilde{A}_x : Reducción de la aceleración de techo en la dirección X

\tilde{A}_y : Reducción de la aceleración de techo en la dirección Y

$\tilde{A}_x + \tilde{A}_y$: Aumento en la reducción de la R.O.

$\tilde{A}_x - \tilde{A}_y$: Disminución delta entre las direcciones ortogonales

$$F(\tilde{\mu}) = \frac{\tilde{\mu}_x + \tilde{\mu}_y}{\tilde{\mu}_x - \tilde{\mu}_y} \quad (10)$$

Donde:

$\tilde{\mu}_x$: Reducción del desplazamiento de techo en la dirección X

$\tilde{\mu}_y$: Reducción del desplazamiento de techo en la dirección Y

$\tilde{\mu}_x + \tilde{\mu}_y$: Aumento en la reducción de la R.O.

$\tilde{\mu}_x - \tilde{\mu}_y$: Disminución delta entre las direcciones ortogonales

$$F(\tilde{Q}) = \frac{\tilde{Q}_x + \tilde{Q}_y}{\tilde{Q}_x - \tilde{Q}_y} \quad (11)$$

Donde:

\tilde{Q}_x : Reducción del corte basal en la dirección X

\tilde{Q}_y : Reducción del corte basal en la dirección Y

$\tilde{Q}_x + \tilde{Q}_y$: Aumento en la reducción de la R.O.

$\tilde{Q}_x - \tilde{Q}_y$: Disminución delta entre las direcciones ortogonales

Según la importancia que se requiera en el diseño pueden definirse factores α, β, γ que indiquen un porcentaje de peso, es decir, se le asigne un valor más grande a aquella R.O. que más interese reducir.

$$F(\tilde{R}_T) = \alpha \cdot F(\tilde{A}) + \beta \cdot F(\tilde{\mu}) + \gamma \cdot F(\tilde{Q}) \quad (12)$$

4. RESULTADOS

Para cada dirección se obtuvo la respuesta máxima de corte basal, desplazamiento y aceleración absoluta de techo para edificio sin AMS y con todas las combinaciones de parámetros de los AMS, de acuerdo a lo definido en punto 3.3.3. Con lo anterior se determinaron las respuestas normalizadas de acuerdo a ecuaciones (6), (7) y (8), lo cual es una medida directa de la reducción de respuesta objetivo al incorporar AMS. Finalmente se construyeron gráficas que muestran cada una de estas respuestas máximas normalizadas, en función de las dos variables de diseño del AMS —masa y amortiguamiento—. El objetivo de lo anterior es visualizar la tendencia que tiene la reducción de la respuesta objetivo al modificarse cada una de las variables de diseño del AMS. A partir de lo anterior, se busca determinar la combinación óptima de parámetros de diseño del AMS que conducen a la mayor reducción de respuesta, de acuerdo al criterio establecido aquí.

4.1. Análisis dinámico T-H en dirección X

El análisis para la determinación de los parámetros óptimos de AMS se realizó de forma separada. Primero se variaron las propiedades de diseño de éste en la dirección X, con sismo actuando en la misma dirección. De los resultados del análisis se obtuvieron las Figuras 7 a la 12.

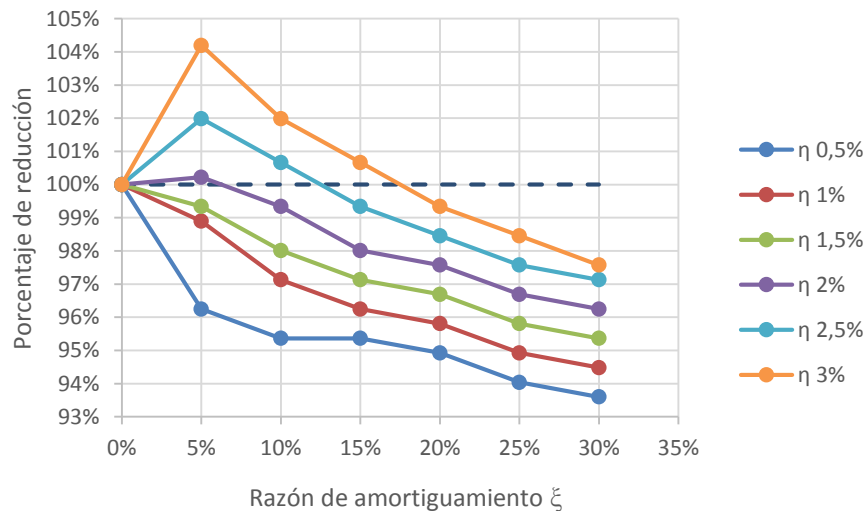


Figura 7: Reducción de la aceleración de techo variando la razón de amortiguamiento, para distintas masas.

De los resultados mostrados en **Figura 7** se observa que al aumentar la razón de amortiguamiento para masas del AMS entre 0,5% y 2% de la masa sísmica, la aceleración de techo disminuye monótonamente. Para las masas del AMS indicadas antes, la aceleración de techo siempre presenta reducción respecto de lo obtenido en el edificio sin AMS. Sin embargo, si existe un aumento de la aceleración de techo con AMS respecto de la respuesta máxima sin AMS para porcentajes de masa de éste mayores del 2% de la masa sísmica y razones de amortiguamiento menores al 15%. Si se considera utilizar un AMS con amortiguamiento entre el 5% y 30% y masa del 0,5% de la masa sísmica se obtiene un beneficio adicional en la reducción de no más del 2% en la reducción de la aceleración de techo. Por lo tanto, desde el punto de vista económico, conviene utilizar un AMS con razón de amortiguamiento entre el 10% y 20% con masa del 0,5% de la masa sísmica, alcanzando un 5% de reducción de la respuesta. Al considerar un AMS con amortiguamiento del 30% con masa de 0,5% de la masa sísmica se obtiene la mayor reducción de la aceleración de techo, la cual alcanza a un 6%. Por lo tanto, la incorporación de más amortiguamiento al AMS es beneficiosa en la reducción de la aceleración de techo.

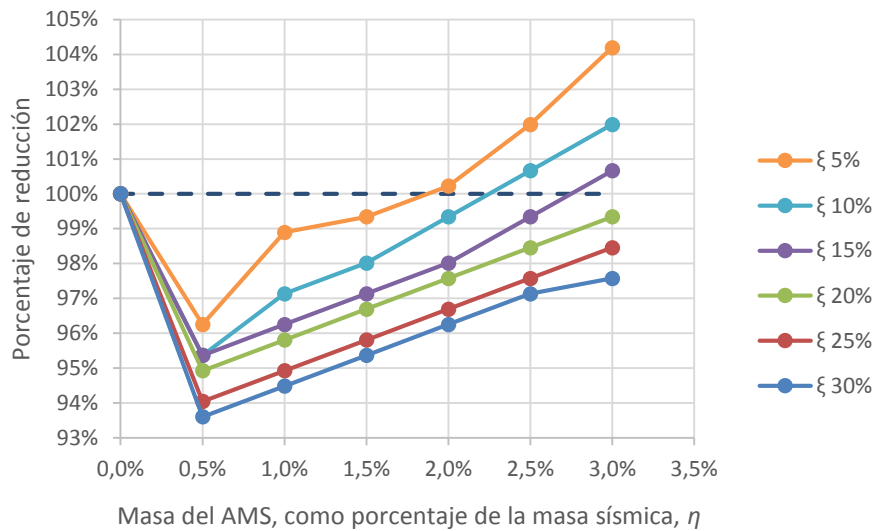


Figura 8: Reducción de la aceleración de techo variando el porcentaje de masa, para distintos amortiguamientos

De los resultados mostrados en **Figura 8** se observa que a medida que se aumenta la masa del AMS aumenta la respuesta, por lo que es necesario aumentar la razón de amortiguamiento para lograr reducir la aceleración de techo. Al aumentar el porcentaje de masa desde un 2% hasta un 3% de la masa sísmica para razones de amortiguamiento entre un 5% y un 15% del crítico existe un aumento de la aceleración de techo con AMS respecto de la respuesta máxima sin AMS. Independientemente de la razón de amortiguamiento del AMS, se observan un óptimo global que ocurre para un porcentaje de masa del 0,5% de la masa sísmica. La mayor reducción de la aceleración de techo se alcanza al utilizar un 30% del amortiguamiento crítico en el AMS. La reducción de la aceleración de techo varía entre un 4% y un 6% para amortiguamiento del AMS entre un 5% hasta un 30% del crítico respectivamente. De lo anterior se concluye que es recomendable utilizar un AMS de masa pequeña — 0,5% de la masa sísmica del edificio—, con una razón de amortiguamiento crítica alta —30%— para alcanzar la mayor reducción de la aceleración de techo

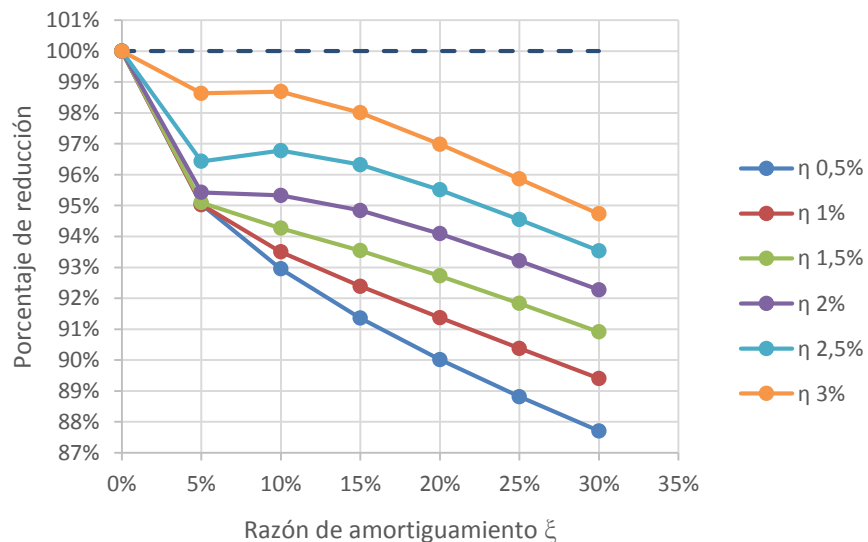


Figura 9: Reducción del corte basal variando la razón de amortiguamiento, para distintas masas

De los resultados mostrados en **Figura 9** se observa que a medida que se aumenta la razón de amortiguamiento la reducción del corte basal se reduce monótonamente, alcanzando un 12% de reducción respecto de la estructura sin AMS. Esta última se logra para una razón de amortiguamiento del 30% y 0,5% de masa sísmica asignados al AMS. Por lo tanto, la incorporación de más amortiguamiento al AMS es beneficiosa para la reducción del corte basal, no así la adición de más masa.

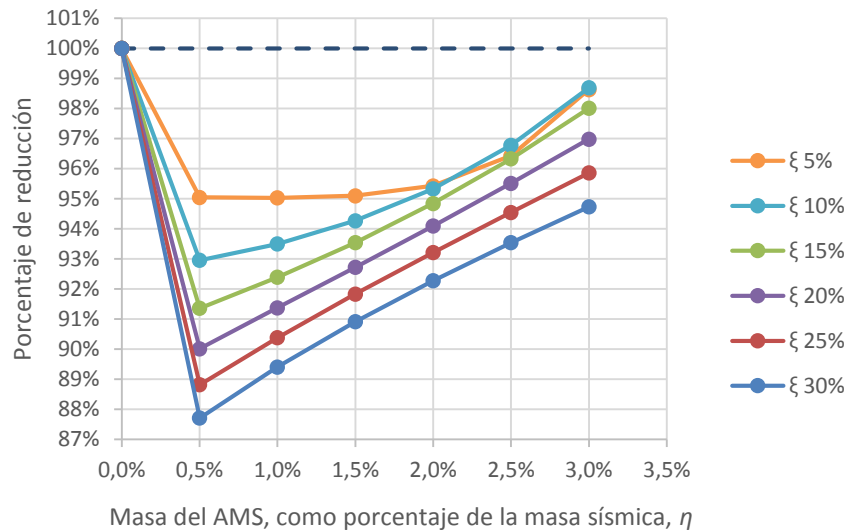


Figura 10: Reducción del corte basal variando el porcentaje de masa, para distintos amortiguamientos

De los resultados mostrados en **Figura 10** se observa que a medida que se aumenta el porcentaje de masa sísmica la reducción del corte basal aumenta monótonamente, por lo que se necesita mayor amortiguamiento para alcanzar una mayor reducción. Para todas las curvas de razón de amortiguamiento se observan un óptimo global que ocurre para un porcentaje de masa del 0.5% de la masa sísmica. Concluyéndose que para el 0,5% de la masa sísmica con un 30% de amortiguamiento, se obtiene la mayor reducción de la reducción del corte basal, la cual alcanza a un 12%.

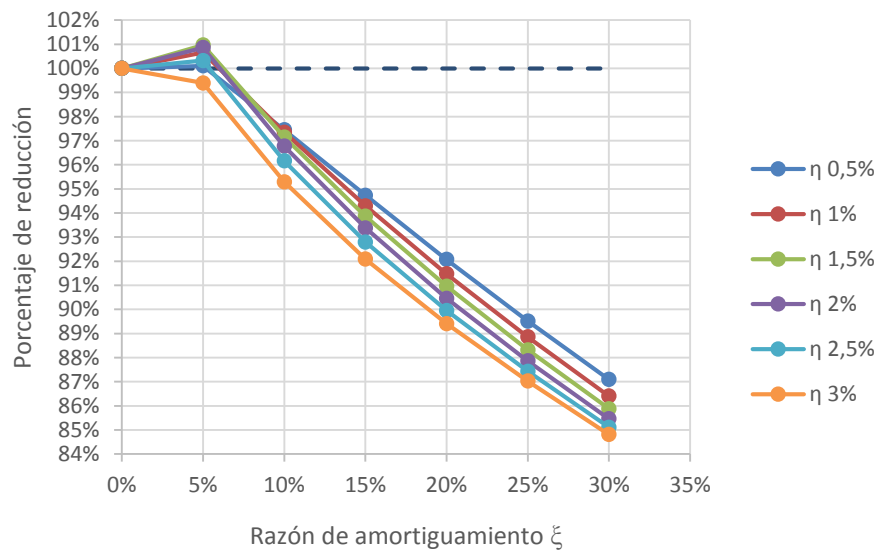


Figura 11: Reducción del desplazamiento de techo variando la razón de amortiguamiento, para distintas masas

De los resultados mostrados en **Figura 11** se observa que incrementos del amortiguamiento por sobre el 5% del crítico en el AMS genera reducciones monótonas de la respuesta objetivo. Para el 30% de amortiguamiento se obtiene la mayor reducción de l desplazamiento de techo, la cual varía entre un 15% y 13% según la masa del AMS utilizado. La reducción máxima de la R.O. de 15% se alcanza para masa del AMS mayor al 1,5% de la masa sísmica. Para amortiguamiento crítico del 5% se registran incrementos de la respuesta objetivo para masas de hasta 2,5%. Concluyéndose que la incorporación de más amortiguamiento y más masa al AMS son beneficios en la reducción del desplazamiento de techo.

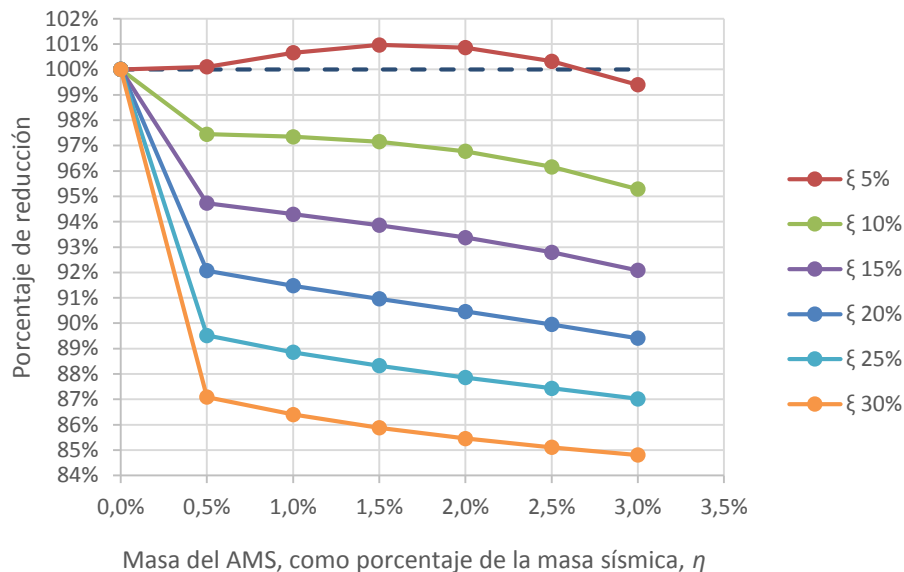


Figura 12: Reducción del desplazamiento de techo variando masa, para distintos amortiguamientos

De los resultados mostrados en **Figura 12** se observa que a medida que se aumenta la masa del AMS existe una disminución del desplazamiento de techo. Se exceptúa de lo anterior el caso con 5% de amortiguamiento, en donde existe un aumento del desplazamiento de techo con AMS respecto de la respuesta máxima sin AMS. Para masa del AMS del 0.5% de la masa sísmica, se observa una reducción del desplazamiento de techo de entre un 2.5% y 13%, para amortiguamientos asignados entre 10% y 30% del crítico. Incrementos de masa del AMS por sobre el 0.5% y hasta el 3% de la masa sísmica, generan reducción adicional de la respuesta, pero ésta es marginal en comparación con la correspondiente a masa del 0.5%. En todos los casos, la incorporación de más amortiguamiento en el AMS resultó beneficiosa en la reducción de la respuesta de desplazamiento máximo de techo.

4.2. Análisis dinámico T-H en dirección Y

De los resultados mostrados en **Figura 13** se observa un óptimo global con reducción de respuesta del 15% que ocurre para una razón de amortiguamiento del 10% y masa del AMS de 2% de la masa sísmica. La incorporación de más amortiguamiento al AMS sólo conduce a reducción de la aceleración de techo cuando es menor o igual al 10% del crítico, independientemente de la masa del AMS. Incrementos en la masa del AMS generan virtualmente en todos los casos reducciones de aceleración de techo.

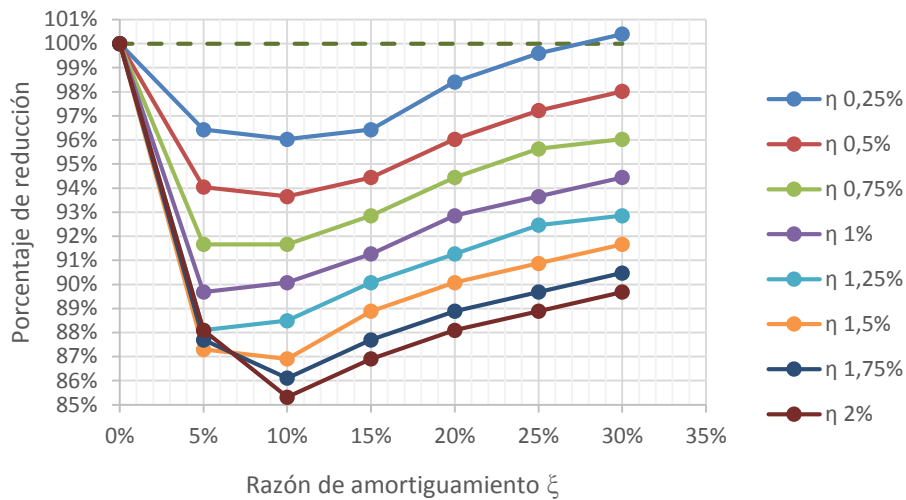


Figura 13: Reducción de la aceleración de techo variando la razón de amortiguamiento, para distintas masas

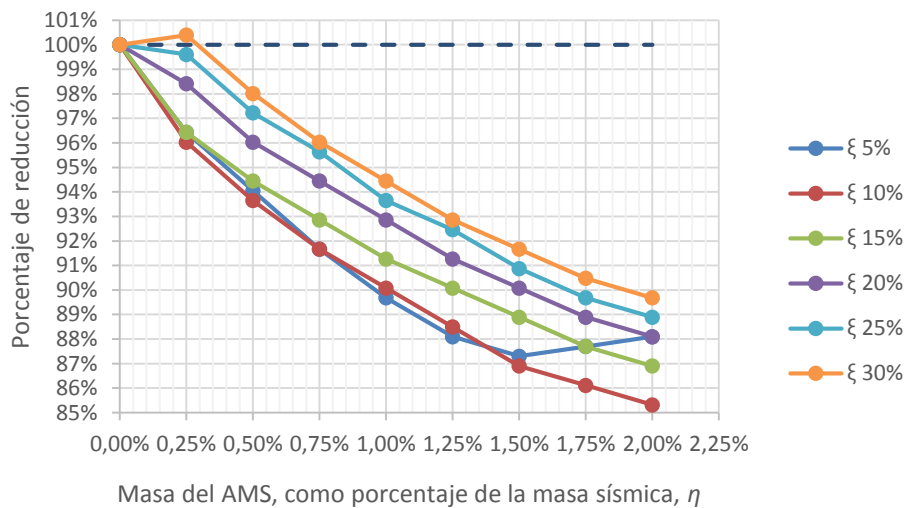


Figura 14: Reducción de la Aceleración de techo variando la masa, para distintos amortiguamientos

De los resultados mostrados en **Figura 14** concluye que a medida que se incrementa el porcentaje de masa la aceleración de techo disminuye, alcanzando la mayor reducción de un 15% con un 2% de masa y 10% de amortiguamiento. Para la curva de 5% de razón de amortiguamiento se observa un óptimo global para el 1.5% de masa sísmica. Cuando el amortiguamiento es bajo, basta con una masa pequeña para obtener reducción de la respuesta significativa. Sin embargo, si la masa se incrementa el efecto es adverso.

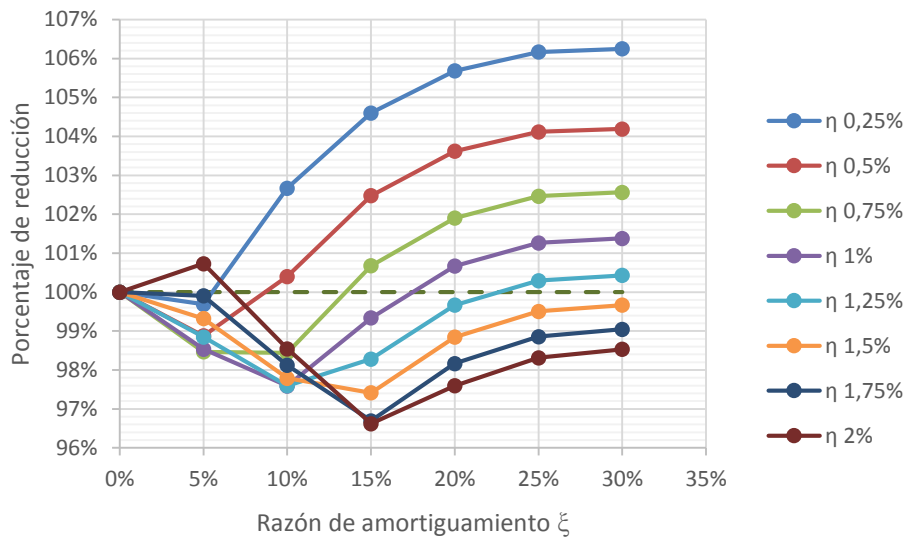


Figura 15: Reducción del corte basal variando la razón de amortiguamiento, para distintas masas

De los resultados mostrados en **Figura 15** se observa que existe un óptimo global para el 15% de amortiguamiento, con masa del 2% de la masa sísmica para el AMS. En la condición de diseño anterior se logra la máxima reducción del corte basal correspondiente a un 3%. Para el 2% de la masa sísmica, cuando la razón de amortiguamiento es del 5%, existe un aumento del corte basal con AMS respecto de la respuesta máxima sin AMS. En general no se observa reducción del corte basal al incrementarse la razón de amortiguamiento una vez pasado el óptimo. Para lograr reducir el corte basal resulta conveniente aumentar la masa del AMS.

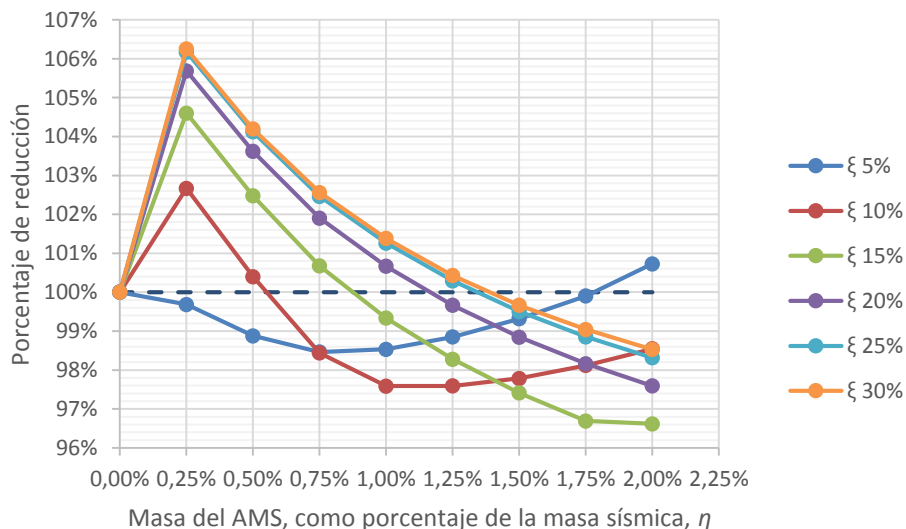


Figura 16: Reducción del corte basal variando la masa, para distintos amortiguamientos

De los resultados mostrados en **Figura 16** se observa una reducción significativa del corte basal para AMS con masas mayores al 1,25% de la masa sísmica y razones de amortiguamiento entre 15% y 30%. Existen dos óptimos globales para el 5% y 10% de amortiguamiento, los cuales ocurren para un 0,75% y 1% de porcentaje de masa sísmica, observándose que luego de sobrepasado estos óptimos el corte basal comienza a aumentar, por lo que es necesario aumentar el amortiguamiento para reducirla. Al considerar un AMS con amortiguamiento del 15% y masa superior al 1,5% de la masa sísmica se obtiene la mayor reducción del corte basal, la cual alcanza a un 3%.

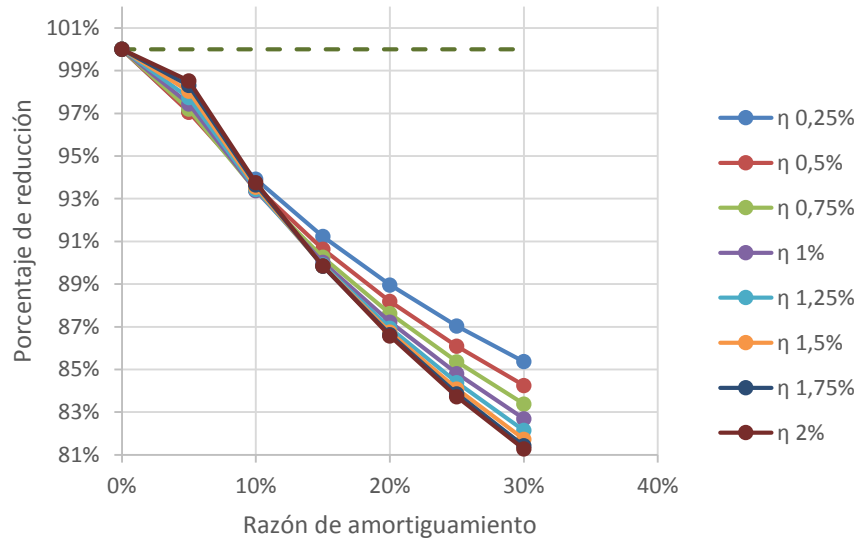


Figura 17: Reducción del desplazamiento de techo variando la razón de amortiguamiento, para distintas masas

De los resultados mostrados en **Figura 17** se observa que al incrementarse la razón de amortiguamiento se aprecia una reducción monótona del desplazamiento de techo. Para el porcentaje de amortiguamiento correspondiente al 30% la R.O. se reduce al máximo, alcanzando un 19%. Por lo tanto, el incremento de amortiguamiento en el AMS resulta beneficioso para la reducción del desplazamiento de techo variando la reducción máxima entre un 15% y un 19% para el 30% de amortiguamiento según sea la masa del AMS escogido. Desde el punto de vista económico convendría escoger el menor porcentaje de masa sísmico correspondiente al 1,5%.

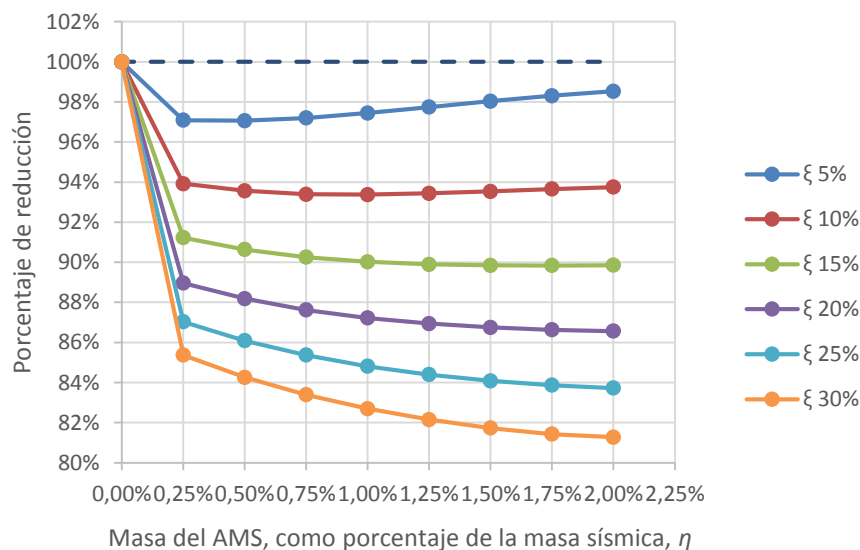


Figura 18: Reducción del desplazamiento de techo variando la masa, para distintos amortiguamientos

De los resultados mostrados en **Figura 18** se observa que a medida que se aumenta la masa del AMS existe una reducción de desplazamiento de techo para las razones de amortiguamiento mayores al 20%. La máxima reducción del desplazamiento de techo es de un 19% con un 30% de razón de amortiguamiento y 1,5% de masa sísmica. Por lo tanto, la incorporación de más masa al AMS es beneficiosa para la reducción del desplazamiento de techo.

4.3. Parámetros óptimos del AMS

A continuación, se muestran los resultados calculados de acuerdo al funcional matemático, el cual permitió escoger con mayor claridad los parámetros óptimos seleccionados del análisis global de los gráficos realizado anteriormente.

Tabla 5: Funcional matemático (Ec. 9) de aceleración de techo

Opción	1		2		3	
Dirección	X	Y	X	Y	X	Y
n(%)	2	2	1,5	1,5	1,5	1,5
ξ (%)	10	10	10	10	30	30
R(%)	1	15	2	13	5	8
$F(\tilde{A})$	1,2		1,4		4,4	

De la tabla se observa que la mayor reducción de la R.O. se obtiene en la dirección Y, por lo que la mejor alternativa de acuerdo al criterio lo planteado en la metodología, sería escoger la opción 3, es decir, un porcentaje de masa de 1,5%, una razón de amortiguamiento del 30%. Esta alternativa conduce a reducciones de respuesta objetivo para los ejes X e Y del 5% y 8% respectivamente.

Tabla 6: Funcional matemático (Ec. 10) de desplazamiento de techo

Opción	1	
Dirección	X	Y
n(%)	1,5	1,5
ξ (%)	30	30
R(%)	15	19
$F(\tilde{\mu})$	8,5	

En este caso no fue necesario la determinación de un funcional matemático, ya que la máxima reducción se alcanzó en el eje Y, con un porcentaje de masa del 1,5%, una razón de amortiguamiento del 30%. Esta alternativa conduce a reducciones de respuesta para los ejes X e Y de 15% y 19% respectivamente. Estas fueron las máximas reducciones alcanzadas en el análisis paramétrico.

Tabla 7: Funcional matemático (Ec. 11) de corte basal

Opción	1		2		3	
Dirección	X	Y	X	Y	X	Y
n(%)	0,5	0,5	1,5	1,5	1,5	1,5
ξ (%)	30	30	15	15	30	30
R(%)	12	-4	6	3	9	0
$F(\tilde{Q})$	0,5		3		1	

Para el caso del análisis paramétrico del corte basal, el funcional matemático indica que es más conveniente utilizar una razón de amortiguamiento del 15% en vez del 30%. Sin embargo, la reducción de la respuesta sólo varía en un 3%, por lo que la incorporación del AMS no incide mayormente en la reducción del corte basal. Es por ello, que se respetará una razón de amortiguamiento favorable del 30% que es congruente con la reducción de las R.O. analizadas anteriormente, un porcentaje de masa del 1,5%, cuya máxima reducción es alcanzada en un 9% para el eje X, sin reflejar reducción en el eje Y.

5. CONCLUSIONES

La aceleración máxima de techo en la dirección X mostró una tendencia a disminuir monótonamente al aumentar la razón de amortiguamiento. En términos de la masa del AMS, el incremento de ésta no es beneficioso, ya que, a medida que aumenta el porcentaje de masa se requiere de más amortiguamiento para reducir la respuesta. La máxima reducción de la R.O. es de un 6% con razón de amortiguamiento 30% y porcentaje de masa 0,5%.

Respecto a la R.O. aceleración de techo en la dirección Y, es posible observar un óptimo global en reducción de la respuesta para un AMS con 10% de amortiguamiento crítico. Sin embargo, superado dicho amortiguamiento dicha variable de diseño redundante en incremento de la respuesta, siendo necesario una mayor masa para reducir la R.O. A medida que se aumenta la masa del AMS se reduce la R.O. La máxima reducción de respuesta es de 15%, la cual se obtiene con un AMS cuyo amortiguamiento es del 10% y su masa es un 2% de la masa sísmica.

Tanto la adición de masa como de amortiguamiento al AMS resultó en reducción del desplazamiento máximo de techo en ambas direcciones de análisis. En dirección X se alcanzó una reducción máxima de un 15%, en tanto en dirección Y la reducción fue del 19%. En ambos casos, dichas reducciones fueron alcanzadas con un AMS con 30% del amortiguamiento crítico y masa de un 1,5% de la masa sísmica del edificio.

El corte basal máximo en la dirección X mostró reducción a medida que se aumentó la razón de amortiguamiento del AMS. La incorporación de más masa al AMS no mostró ser beneficiosa al reducir dicha respuesta. La mayor reducción del corte basal máximo registrada fue del 12% respecto del edificio sin AMS. Esta se logró con un AMS de masa igual al 0,5% de la masa sísmica del edificio y amortiguamiento del 30% del crítico.

En la dirección Y, la reducción del corte basal máximo mostró un comportamiento irregular, sin una tendencia clara a medida que se incrementa la razón de amortiguamiento. Se alcanzó una reducción máxima de un 3% para esta respuesta. Esta reducción se alcanzó con un AMS con amortiguamiento de 15% del crítico y masa entre 1.5% y 2% de la masa sísmica de la superestructura, sin variaciones significativas de la reducción de respuesta en el rango de masa mencionado para el AMS.

Del análisis paramétrico se observó que la maximización del funcional condujo a mayores reducciones de desplazamiento de techo, moderadas reducciones de aceleración absoluta de techo y modestas reducciones de corte basal. De lo anterior se deduce que la implementación de AMS es escasamente efectiva en reducir el corte basal en condición de carga sísmica, lo cual redundante en disminuciones bajas o nulas de costo de construcción. Sin embargo, la reducción en desplazamiento de techo y aceleración absoluta no es despreciable por lo que el efecto benéfico de incorporar AMS en el edificio estudiado redundante en una percepción atenuada del sismo por parte de los ocupantes, así como menores daños en elementos no estructurales y muebles.

Teniendo en cuenta lo anterior, se escogió como parámetros óptimos para el AMS un amortiguamiento del 30% del crítico y una masa del 1.5% de la masa sísmica del edificio. Estos parámetros de diseño del AMS sólo conducen a reducción máxima de desplazamiento de techo. Sin embargo, pese a que las reducciones de aceleración absoluta y corte basal alcanzadas con dicho AMS no son las máximas si alcanzan valores cercanos a ésta. El diseño escogido tiene un mayor impacto en la protección de elementos estructurales y menor en las cargas de diseño de los elementos estructurales, las cuales se relacionan directamente con el corte basal.

6. REFERENCIA

- Araya, I., & Philippe, L. (2012). Estimación multimodelo de parámetros estructurales para el diseño y sintonía de amortiguadores de masa sintonizados. Pontificia Universidad Católica de Chile.
- europapress (Ed.). (s.f.). notimérica. Recuperado el 10 de Agosto de 2017, de www.notimerica.com/sociedad/noticia-cinturon-fuego-pacifico-amenaza-sismica-iberoamericana
- Garrido Kogan, B. I. (2016). Amortiguadores de masa sintonizada en edificios sometidos a registros sísmicos en Chile. Santiago, Chile.
- Jayaram, N., Lin, T., & Baker, J. W. (2011). A computationally efficient ground-motion selection algorithm for matching a target response spectrum mean and variance. *Earthquake Spectra*, 27(3), 797-815.
- Kogan, B. I. (2016). Amortiguadores de masa sintonizada en edificios sometidos a registros sísmicos en Chile. Santiago, Chile.
- Lanzen, A. (14 de agosto de 2008). www.amusingplanet.com. Recuperado el 10 de agosto de 2017, de <http://www.amusingplanet.com/2014/08/the-728-ton-tuned-mass-damper-of-taipei.html>
- Montaro, M. I. (2002). Sistemas de control de vibraciones en estructuras de gran altura. *Informes de la construcción*, 53(477), 31.
- Montaro, M. I. (2002). Sistemas de control de vibraciones en estructuras de gran altura. *Informes de la construcción*, 53(477), 36.
- NCh 433. (1996). Diseño sísmico de edificios (2 ed.). INN-Chile.
- Pincheira Martínez, E. N. (2017). Diseño óptimo de disipadores metálicos en un edificio de acero de 28 pisos.
- SIRVE S.A. (14 de agosto de 2012). SIRVE Seismic Protection Technologies. Recuperado el 5 de agosto de 2017, de <http://sirve.cl/archivos/6390/ams-edificio-parque-araucano-2>