

USO DE AMORTIGUADOR DE MASA SINTONIZADA EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL: EDIFICIO PARQUE ARAUCANO EN SANTIAGO DE CHILE

USE OF DYNAMIC TUNED MASS DAMPER IN STRUCTURAL ENGINEERING: PARQUE ARAUCANO BUILDING IN SANTIAGO DE CHILE

LEOPOLDO BRESCHI¹, ARTURO CASTILLO²

1 Universidad Católica de Chile. Chile. breschi@vmb.cl

2 Universidad Católica de Chile. Chile. castillo@vmb.cl

RESUMEN

La aplicación de Amortiguador de maza sintonizada en ingeniería mecánica es de uso corriente y larga data. Para este tipo de aplicaciones, las sollicitaciones son de frecuencias constantes y conocidas. Sin embargo su aplicación en estructuras ha comenzado hace pocos años, bajo el concepto general de protección sísmica.

El diseño de un Amortiguador de Masa Sintonizada para un edificio conlleva la dificultad práctica de sintonizar éste apropiadamente al periodo fundamental de la estructura. A través de la incorporación de amortiguamiento adicional, es posible ampliar el rango de frecuencias de sintonía y por ende hacer más efectivo el uso de un AMS.

Por otro lado, las excitaciones a las que se verá sometida la estructura son inciertas en cuanto a su distribución de frecuencias, esto conlleva la posibilidad cierta de generar un efecto contraproducente, ya que las respuestas pueden incluso ser peores con el uso del AMS. La incorporación de mayor amortiguamiento pese a que disminuye la eficiencia especialmente en el período fundamental, produce una mejor respuesta para todo el rango de frecuencias de dichas excitaciones.

El siguiente trabajo muestra en términos teóricos y prácticos la aplicación de este concepto en un edificio construido el año 2006 en Santiago de Chile, sometido a los efectos del sismo de magnitud 8,8 Mw e intensidad VIII de la región del Maule el año 2010.

PALABRAS CLAVE: amortiguador de masa flexible, amortiguación, sintonizado.

ABSTRACT

The application of Mass Damper tuned in mechanical engineering is current and long-term use. For this type of applications, the sollicitations are of constant frequencies and known. However its application in structures has begun a few years ago, under the general concept of seismic protection.

The design of a Tuned Mass Damper for a building entails the practical difficulty of properly tuning this to the fundamental period of the structure. Through the addition of additional damping, it is possible to expand the range of tuning frequencies and thus make the use of an AMS more effective.

On the other hand, the excitations to which the structure will be subjected are uncertain as to their frequency distribution, this entails the certain possibility of generating a counterproductive effect, since the response may even be worse with the use of AMS. The incorporation of greater damping, although decreasing efficiency especially in the fundamental period, produces a better response for the whole range of frequencies of said excitations.

The following work shows in theoretical and practical terms the application of this concept in a building built in 2006 in Santiago, Chile, subjected to the effects of the earthquake of magnitude 8.8 Mw and intensity VIII of the Maule region in 2010.

KEYWORDS: flexible mass damper, damping, tuned.

DOI: <http://dx.doi.org/10.23878/alternativas.v17i3.234>

RECIBIDO: 30/05/2015

ACEPTADO: 30/08/2015

INTRODUCCIÓN

El movimiento inducido en un edificio por un movimiento sísmico es modificado por la presencia de una amortiguadora de maza simplificada. Esta modificación debe disminuir las sollicitaciones 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.

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 éste y puede representarse como se muestra en la figura 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".

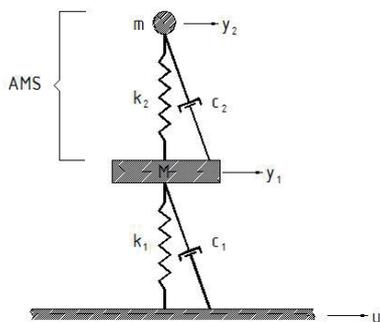


Figura 1. Sistema mecánico de un grado de libertad con AMS.

Aplicando las ecuaciones del movimiento al AMS de la figura 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:

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

que con una transformación de variable puede escribirse como:

$$EY_2 = DY_1 \quad (3)$$

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

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

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:

$$BY_1 = DY_2 + AU \quad (6)$$

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

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

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.

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 amortiguador 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 solicitación con una frecuencia coincidente con la del AMS, pero mejora la respuesta en algunas frecuencias parecidas, siendo mejor el resultado frente a frecuencias inciertas.

Cuando desaparece la solicitación el sistema, bajo la suposición de un sistema lineal, el sistema continúa 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.

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 figura 2, 3 y 4.

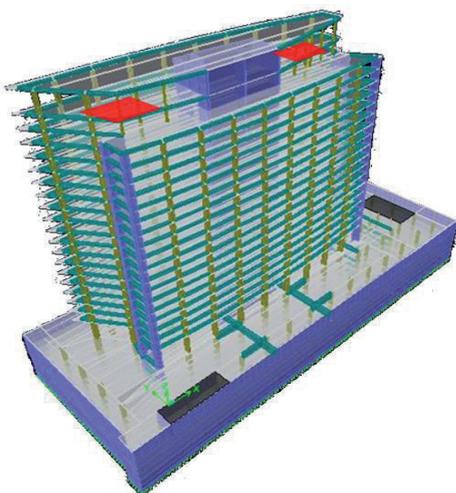


Figura 2. Modelo del edificio Parque Araucano con la ubicación de los AMS.

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.

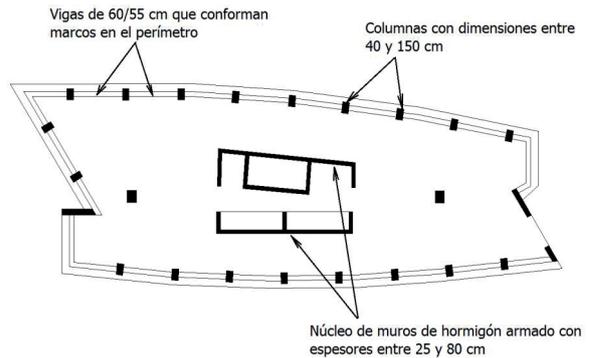


Figura 3. Vista en planta del piso tipo del edificio Parque Araucano.

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

MODOS	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

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 toneladas 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 Extended Three Dimensional Analysis of Building Systems 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 figura 5.

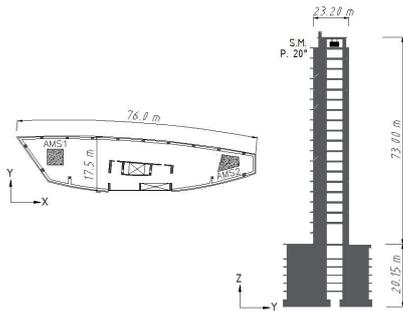


Figura 4. Planta del último piso y corte transversal Edificio Parque Araucano con ubicación de los AMS.

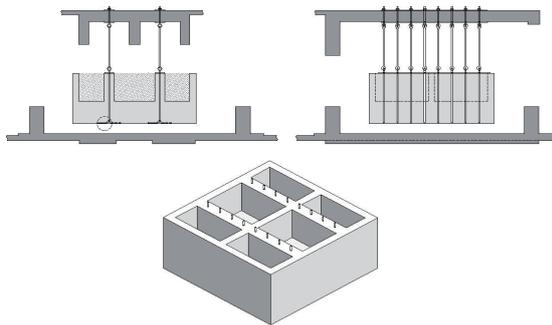


Figura 5. Detalles AMS de 150 ton (sin amortiguador).

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 figura 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 gráfico 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 com-

portamiento 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.

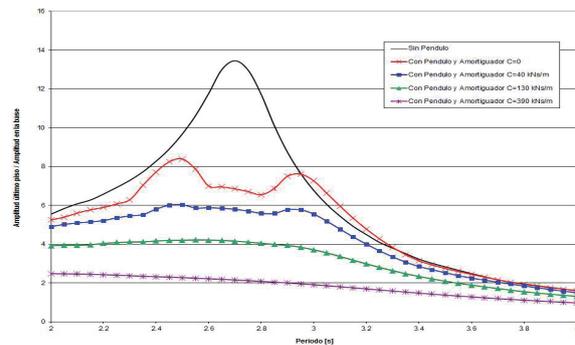


Figura 6. Función de transferencia para el CG del piso 20 obtenida con ETABS para distintas configuraciones.

VERIFICACIÓN CON REGISTROS REALES

Para encontrar los desplazamientos máximos del AMS y las velocidades máximas para poder diseñar el amortiguador, se usaron siete 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 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 figura. 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.

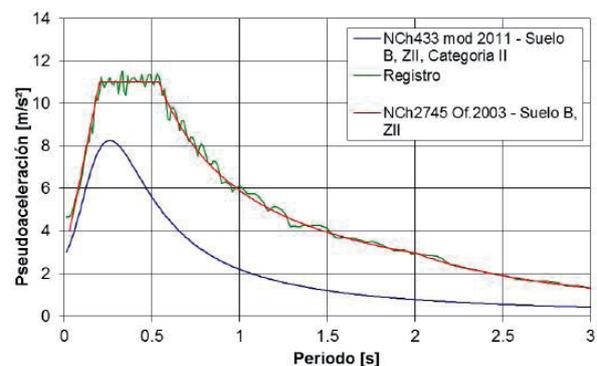


Figura 7. Espectro de aceleración, registro 1x, con 5% de amortiguamiento.

Los registros de aceleraciones “1x” y “2x” se muestran en las figura 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 figura 9 y 12 muestran el desplazamiento de ambos amortiguadores para los dos primeros pares de registros.

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

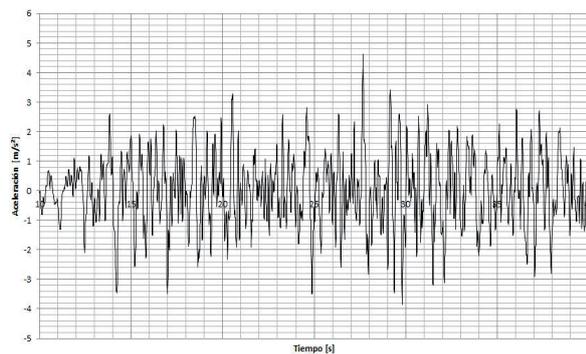


Figura 8. Registro de aceleraciones en “x” del 1° set de registros (parcial).

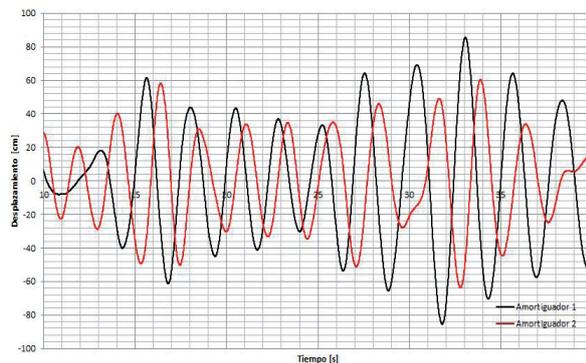


Figura 9. Desplazamiento de los amortiguadores para el 1° set de registros.

Las figura 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.

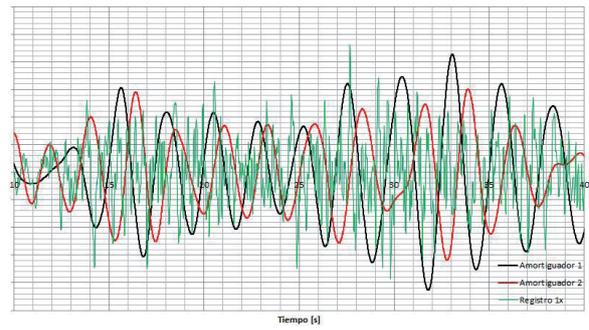


Figura 10. Comparación de la forma del registro y del desplazamiento de los amortiguadores para el 1° set de registros.

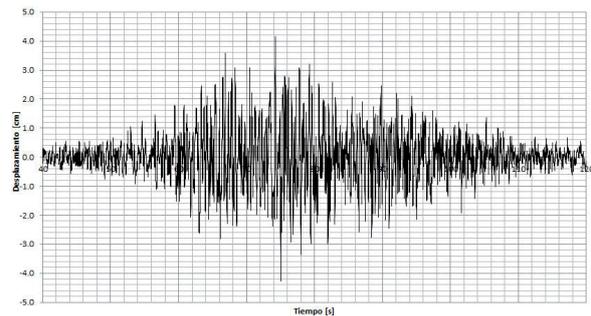


Figura 11. Registro de aceleraciones en “x” del 1° set de registros (parcial).

Al comparar el desplazamiento del amortiguador con los registros, figura 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.

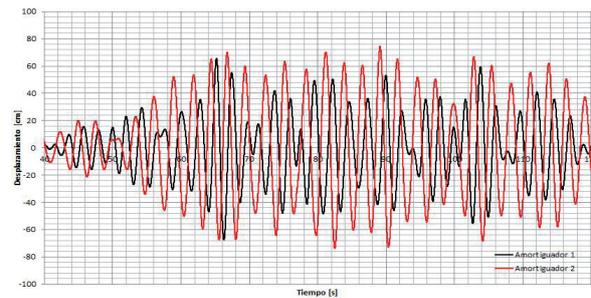


Figura 12. Desplazamiento de los amortiguadores para el 2° set de registros.

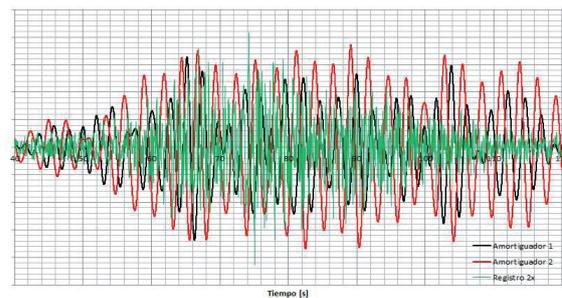


Figura 13. Comparación de la forma del registro y del desplazamiento de los amortiguadores para el 2° set de registros.

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 figura 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.

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 BIBLIOGRÁFICAS

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