



# Sistemas de control de vibraciones para grúas torre

*Vibration control devices for tower cranes*

• Jesús de Sebastián-Sanz  
• Carlos M. Casado-Sánchez  
• Antolín Lorenzana-Ibán  
• Alfonso Poncela-Méndez

Ingeniero Industrial  
Ingeniero Industrial  
Doctor Ingeniero Industrial  
Doctor Ingeniero Industrial

Fundación CARTIF, Área de Control de Estructuras  
Fundación CARTIF, Área de Control de Estructuras  
Universidad de Valladolid, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales  
Universidad de Valladolid, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales

Recibido: 19/09/08 • Aceptado: 17/11/08

## ABSTRACT

- The application of tuned mass damper in the field of the civil engineering has focused principally on skyscraper, communication towers or bridges. The present article proposes the use of them in tower cranes for the improvement of dynamical behaviour under daily use loads. We have done simulations of tuned mass dampers (TMD) using a two-dimensional model of a tower crane in order to evaluate the efficiency of these passive vibrations control systems.
- **Key words:** tower crane, vibrations, tuned mass damper.

## RESUMEN

La aplicación de los amortiguadores de masa en el campo de la ingeniería civil se ha centrado principalmente en su uso en rascacielos, torres de comunicación o puentes. El presente artículo propone su uso en grúas torre para la mejora del comportamiento dinámico de éstas frente a cargas de uso diario. Para ello y partiendo de un modelo bi-dimensional de una grúa torre, se han realizado simulaciones de amortiguadores de masa (TMD) con el fin de valorar la eficiencia de estos sistemas de control de vibraciones pasivos.

**Palabras clave:** grúa torre, vibraciones, amortiguador de masas.

## 1. INTRODUCCIÓN

Conforme ha ido aumentando la esbeltez de los sistemas estructurales, fundamentalmente los edificios en altura, se ha detectado la necesidad de introducir sistemas de control que mejoren tanto el comportamiento resistente (tensiones, resistencia a fatiga, etc.) como la comodidad de los usuarios (sensación de movimiento, mareos, etc.). En ocasiones no es eficiente sobredimensionar el esqueleto resistente de la estructura ya que al aumentar la rigidez aumenta la masa y el coste, y aunque disminuyan los desplazamientos del movimiento vibratorio aumentan las velocidades y aceleraciones.

Una de las soluciones para mitigar este movimiento vibratorio sin necesidad de rigidizar la estructura es mediante la incorporación de sistemas disipadores y/o absorbedores de energía que mejoren su respuesta dinámica y aumenten el amortiguamiento estructural, el cual generalmente es bajo.

Desde mediados de los años 70, los amortiguadores de masa o TMD (*Tuned Mass Damper*) han sido uno de los dispositivos más usados para la amortiguación de vibraciones en rascacielos, torres, tableros de puentes, chimeneas, etc. Quien esbozó por primera vez este dispositivo fue **Frahm** en 1909, pero fue **Den Hartog** [1] quien realizó los primeros desarrollos teóricos para el sintonizado óptimo de estos sistemas en estructuras sencillas de un solo grado de libertad. A partir de esta teoría, numerosos investigadores como **Warburton** [2], **Tsai** y **Lin** [3], **Poncela** et al. [4] entre otros, han propuesto nuevas formulaciones para el sintonizado óptimo de TMDs en estructuras más complejas. Estos dispositivos se han mostrado muy eficientes en la reducción de las vibraciones inducidas principalmente por el viento, aunque también las debidas a sismos, tráfico, etc. obteniendo en la respuesta de las estructuras mejoras del 30 al 50% [5] medidas en términos de tiempo de establecimiento y razones de amortiguamiento.

En comparación con las estructuras civiles mencionadas anteriormente, las grúas torre son

estructuras muy esbeltas y flexibles que tanto por la acción del viento como por los acoplamientos dinámicos del movimiento de la carga durante su uso diario [6], experimentan movimientos vibratorios muy amplios que condicionan el dimensionamiento resistente y dificultan el posicionamiento de la carga. En este trabajo se evalúa mediante simulación la efectividad de los amortiguadores de masa para reducir las oscilaciones de una grúa torre en concreto. Para ello, y a partir de los parámetros modales obtenidos de un modelo de la grúa en elementos finitos ajustado manualmente mediante datos experimentales, se ha desarrollado un modelo sencillo bidimensional de la grúa en *Working Model 2D* [7], en el cual se ha simulado el comportamiento transitorio de la grúa con diferentes TMDs cuando se la somete a su máxima carga en punta.

## 2. AMORTIGUADORES DE MASA EN ESTRUCTURAS CIVILES

Los amortiguadores de masa sintonizados son sistemas pasivos de absorción de vibraciones, que en su esquema más sencillo están compuestos por una masa móvil unida a las estructuras por muelles y amortiguadores (Fig. 1). Cuando la estructura desarrolla movimiento como respuesta a una perturbación externa (viento) o interna, el TMD se excita produciéndose una transferencia de la energía inercial de la estructura al amortiguador de masa. Con esto se consigue mitigar las oscilaciones de la estructura en tiempos menores, mejorando así el amortiguamiento estructural global. Para que el amortiguador de masas trabaje de la forma más eficaz posible es necesario un correcto sintonizado de los parámetros físicos de éste: la masa y las constantes de los muelles y amortiguadores.

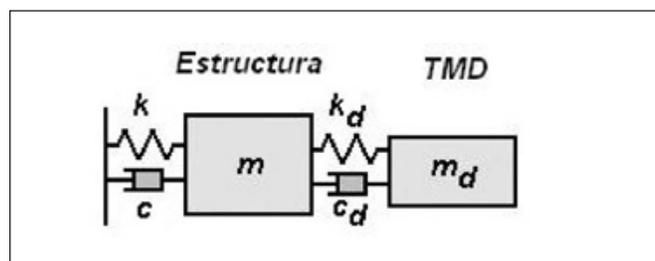


Figura 1. Esquema básico de un TMD acoplado a una estructura de un solo grado de libertad.

Existen numerosas estructuras civiles dotadas con amortiguadores de masa, siendo los edificios las estructuras que cuentan con mayor número de aplicaciones y ejemplos más espectaculares, éste es el caso del TMD del *Edificio Taipei 101* en Taiwan con una masa pendular de acero de 660 toneladas [8]. En **Constantinou** [9], **Fujita** [10] y **Tanida** [11] se pueden consultar muchas de las aplicaciones de estos sistemas en estructuras civiles, tanto implementaciones puramente pasivas, como versiones activas y semiactivas del TMD. Estas últimas, además de los elementos básicos de la versión pasiva, cuentan con actuadores hidráulicos o eléctricos, amortiguadores semiactivos, sensores, equipos de control,... que mejoran la eficiencia de los sistemas pasivos y que son

capaces de adaptarse mejor a cambios tanto de la naturaleza de la excitación como de la propia estructura civil.

Los dos esquemas constructivos de amortiguador de masa más empleados en estas estructuras son [5]: (a) el esquema lineal (*Translational TMD*) donde una masa móvil de acero u hormigón que desliza sobre ejes u otros sistemas mecánicos está situada en los pisos más altos del edificio al que se une por un sistema de muelles y amortiguadores. Las constantes de rigidez de los muelles junto con el valor de la masa definen la frecuencia de oscilación de esta, siendo los amortiguadores los encargados de disipar la energía inercial transferida por la estructura al TMD (Fig. 2a). (b) El otro esquema constructivo es el pendular (*Pendular TMD*) y consiste en colgar la masa del TMD mediante barras articuladas o cables metálicos (Fig. 2b), evitándose los problemas de rozamiento presentes en el esquema anterior, pero presentado limitaciones en cuanto a espacio. En este caso la frecuencia solo viene determinada por la longitud de las barras o cables.

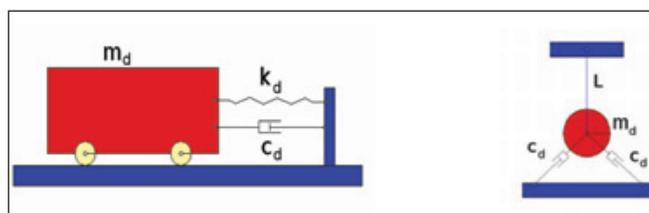


Figura 2. (a) Esquema básico de un TMD lineal. (b) Esquema básico de un TMD pendular

En las estructuras esbeltas, el viento induce diversos tipos de inestabilidades o fenómenos aerolásticos [12] provocando movimientos de flexión y en ocasiones de torsión. En general, el movimiento de mayor amplitud es el debido al modo 1 de flexión en el plano perpendicular al eje de menor inercia, y es éste al que normalmente se sintoniza el TMD. No obstante también pueden ser importantes el modo 2 de flexión, el modo 1 de flexión en el plano perpendicular y el modo 1 de torsión en estructuras no simétricas.

Para el correcto sintonizado del amortiguador de masa es necesario conocer determinadas características de la estructura que se trata de controlar, como son la frecuencia, la masa modal y el amortiguamiento correspondiente al modo de vibración que se trata de mitigar. Con esta información se puede calcular mediante diferentes formulaciones los valores de la masa  $m_d$ , rigidez  $k_d$ , y constante del amortiguador  $c_d$  con los que el TMD trabajaría de forma eficiente. En general las frecuencias fundamentales de las estructuras civiles esbeltas suelen estar por debajo de los 5 Hz y su razón de amortiguamiento ya sean de hormigón o de acero tienen valores menores de 1.5% del amortiguamiento crítico [13]. Dicho valor es difícilmente cuantificable al depender del material, de las uniones, del terreno, nivel de vibración etc. Un buen valor de partida para el cálculo del TMD podría ser del 1%.

De los tres parámetros mencionados, la frecuencia es el más crítico ya que debe ser determinado lo más fielmente posible tal que el TMD calculado trabaje de forma correcta. En el caso de la masa modal y sobre todo del amortiguamiento

## En el mercado existen multitud de grúas torre de características muy distintas en cuanto a dimensiones, capacidad de carga, etc

estructural solo sería necesario tener estimaciones de los valores reales ya que el sintonizado del TMD es menos sensible respecto a estos parámetros.

### 3. COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE GRÚAS TORRE

Al igual que muchas estructuras civiles, las grúas torre exhiben, debido al viento y al uso, un comportamiento vibratorio muy poco amortiguado y de gran amplitud que interesa mitigar para mejorar el posicionamiento rápido y preciso de la carga y para prevenir problemas de fatiga mecánica de la estructura resistente.

En el mercado existen multitud de grúas torre de características muy distintas en cuanto a dimensiones, capacidad de carga, etc. Asimismo su comportamiento dinámico es muy distinto con frecuencias propias y masas modales muy variadas. Con el ánimo de concretar el estudio se ha elegido una grúa torre sin tirantes o “flat top” de características medias-

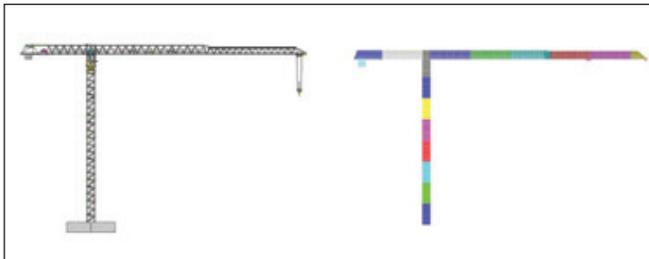


Figura 3. Grúa torre objeto del estudio “COMANSA LC2064”: Diseño CAD y Modelo en Elementos Finitos

altas (COMANSA Mod. LC2064) con los siguientes parámetros: mástil de 38.5 m, pluma de 54 m, contrapluma de 18 m, contrapeso de 17.5 Tn., peso total sin contrapeso de 48.69 Tn., capacidad de carga máxima de 12 Tn. y capacidad de carga en punta de 2.5 Tn.

A partir de los datos y planos constructivos del fabricante, esta grúa se modeló en elementos finitos como puede verse en la Fig.3. Con el objeto de realizar un ajuste manual de dicho modelo y calcular el amortiguamiento del primer modo de flexión de la torre al cual se sintonizarán los TMDs, se registró la vibración de la grúa mediante un acelerómetro en la parte alta de la torre (Fig. 4). A partir de los registros de la respuesta de la grúa frente a perturbaciones ambientales y pruebas de

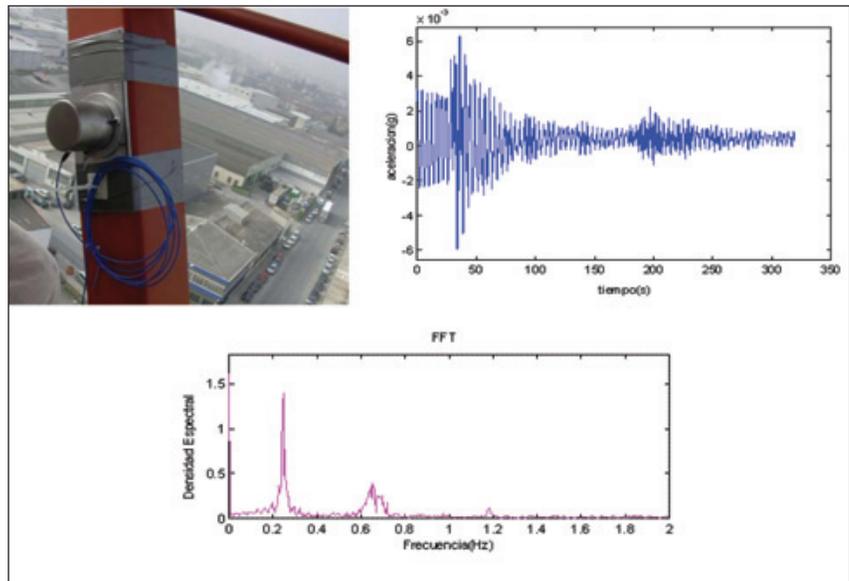


Figura 4. Respuesta temporal y FFT de la grúa obtenida con un acelerómetro en la torre de la grúa.

respuesta libre, se determinó el valor de las dos primeras frecuencias propias de la torre (0.242 Hz y 0.637 Hz) y una razón de amortiguamiento del 0.7%.

Como ya se mencionó anteriormente, para el cálculo de los parámetros del TMD no es suficiente solo con conocer la frecuencia del modo que queremos amortiguar, también es necesario conocer o estimar la masa modal y el amortiguamiento de la estructura correspondiente a dicho modo. Diferentes métodos de identificación de sistemas para la estimación de las características dinámicas de una estructura han sido muy estudiados ([14]; [15]), pero la mayoría de estos estudios se han centrado en propiedades dinámicas como son la función de transferencia y las frecuencias naturales. Sin embargo la identificación de las masas modales pocas veces se lleva a cabo [16]. En general los métodos para estimar la masa modal se dividen en: (a) Métodos analíticos/numéricos basados en la obtención de los autovectores del sistema haciendo uso del análisis en elementos finitos [17] y (b) métodos experimentales basados en el ajuste de funciones de respuesta en frecuencia obtenidas de datos experimentales, o dicho de otro modo “Análisis Modal Experimental” [18]. En este trabajo se ha empleado el primero de los métodos, desarrollando un modelo de elementos finitos con la herramienta COSMOS/M [19] el cual se ha ajustado manualmente a las frecuencias experimentales obtenidas en la torre.

A continuación se presentan las frecuencias principales y masas modales obtenidas tras el ajuste del modelo en elementos finitos de la grúa seleccionada para el estudio.

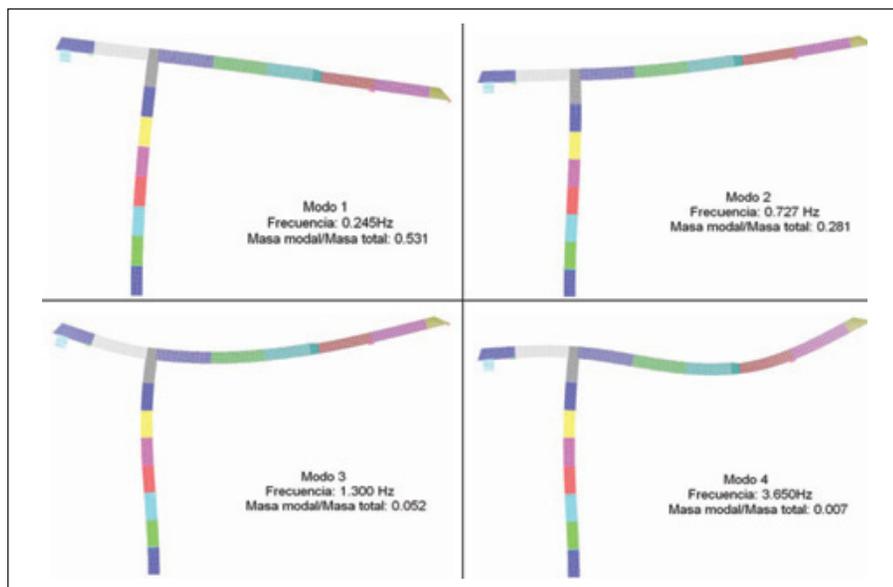


Figura 5. Parámetros modales de la grúa con contrapeso. (Masa total de la grúa: 66195 kg)

En cuanto al amortiguamiento de la grúa torre, que fue calculado experimentalmente en un 0.7% mediante el método del decremento logarítmico [20], se consideró sin pérdida de generalidad despreciable en las simulaciones y así simplificar el modelo desarrollado en *Working Model 2D*.

En el presente artículo se proponen tres disposiciones del contrapeso de la grúa en estudio. En el primer caso se emplea la totalidad del contrapeso (17500 kg) como TMD, mientras que en las otras dos se usan 10000 y 5000 kg respectivamente.

Previo al cálculo o sintonizado óptimo de las tres propuestas de amortiguadores de masa, es necesario recalcular los parámetros modales de la grúa ya que ahora solo parte del contrapeso es solidario a la grúa. Para ello se ha modificado el

Modo	Frecuencia (Hz.)	Masa modal /Masa total	Masa total grúa	Masa del contrapeso como TMD
1	0.293	0.452	48695 kg	17500 kg
2	0.781	0.323	48695 kg	17500 kg
1	0.270	0.490	56195 kg	10000 kg
2	0.754	0.299	56195 kg	10000 kg
1	0.257	0.511	61195 kg	5000 kg
2	0.739	0.290	61195 kg	5000 kg

Tabla 1. Parámetros modales de la grúa con contrapeso como TMD.

#### 4. DISEÑO Y SIMULACIONES DE AMORTIGUADORES DE MASA EN GRÚA TORRE

De los modos obtenidos los que nos interesan amortiguar mediante un TMD son los de mayor masa modal, es decir el primer modo de flexión de la torre (modo 1) y el primer modo de flexión de la pluma (modo 2). Para valorar la mejora de la respuesta dinámica de la grúa con TMD se compararán las respuestas transitorias de la grúa original y de la grúa con TMD cuando se le aplica una carga en la punta de la pluma, calculando el desplazamiento horizontal en la parte alta de la torre, el desplazamiento vertical en el extremo de la pluma, y por último el desplazamiento relativo del TMD respecto a su punto de unión en la grúa.

Las grúas torre disponen de un contrapeso con un valor de masa elevado. Esta masa (total o parcial) se presta bastante bien para ser empleada como masa del sistema TMD. El empleo de todo el contrapeso como masa del TMD supone que ésta sea del orden de la masa modal del primer modo de la estructura a

modelo en elementos finitos de la grúa obteniéndose los parámetros de la Tabla 1.

Los sintonizados de los amortiguadores de masa propuestos se han obtenido mediante fórmulas desarrolladas a partir de la minimización de la función de transmisibilidad del desplazamiento de la estructura respecto de la entrada de perturbación. A continuación se presentan algunos de los resultados empleados para el cálculo de los parámetros óptimos de un amortiguador de masa. El desarrollo completo de estos puede consultarse en el libro de Connor[17].

donde  $\bar{m}$  es la razón de masas del TMD frente a la masa del modo a amortiguar,  $m_d$ ,  $\omega_d$ ,  $c_d$ ,  $k_d$ , son respectivamente la masa, frecuencia, constante de amortiguamiento y rigidez del TMD que queremos calcular,  $m_{modo}$ ,  $\omega_{modo}$ , son la masa modal y frecuencia del modo de la estructura que queremos amortiguar y  $f_{opt}$ ,  $\xi_{dopt}$  son la razón de frecuencias, y la razón de amortiguamiento del TMD para un óptimo sintonizado obtenidas de la minimización de la función de transmisibilidad.

$$\bar{m} = \frac{m_d}{m_{\text{modo}}} \tag{1}$$

$$f_{\text{opt}} = \frac{\omega_d}{\omega_{\text{modo}}} = \frac{\sqrt{1-0.5\bar{m}}}{1+\bar{m}} \tag{2}$$

$$\xi_{\text{dopt}} = \sqrt{\frac{\bar{m}(3-\sqrt{0.5\bar{m}})}{8(1+\bar{m})(1-0.5\bar{m})}} = \frac{c_d}{2m_d\omega_d} \tag{3}$$

$$\omega_d = \sqrt{\frac{k_d}{m_d}} \tag{4}$$

Los parámetros óptimos para las tres propuestas de TMD, se calculan mediante la aplicación sucesiva de las fórmulas anteriores. Los valores obtenidos para el sintonizado al modo 1 de la estructura se muestran en la tabla 2.

md (kg)	kd (N/m)	cd (Ns/m)	fd (Hz)
5000	8916.03	3012.46	0.2125
10000	12675.45	7287.05	0.1795
17500	11088.85	13001.00	0.1267

Tabla 2. Parámetros óptimos de los TMD.

Con estos valores se procede a la simulación de la respuesta del modelo bidimensional de la grúa torre en *Working Model*

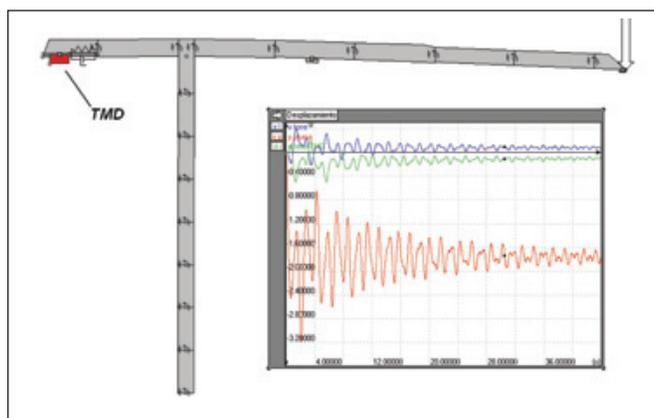


Figura 6. Simulaciones con un modelo bi-dimensional de la grúa torre en Working Model 2D.

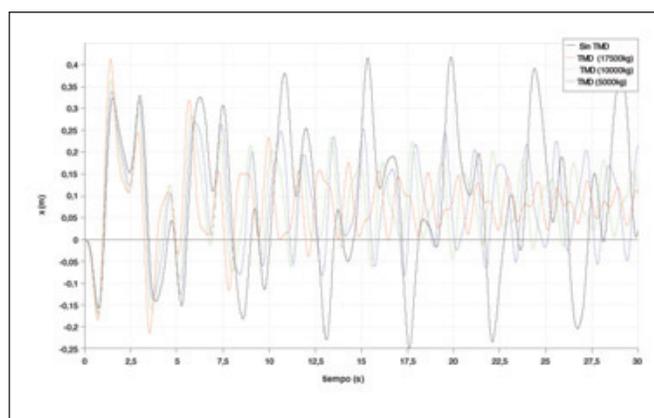


Figura 7. Desplazamiento horizontal de la torre.

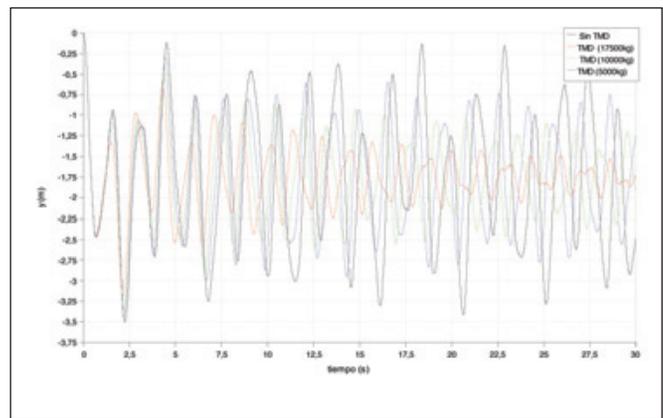


Figura 8. Desplazamiento vertical de la pluma.

2D bajo una excitación escalón de magnitud igual a la carga máxima en punta de la pluma (2500 Kg). Una imagen del modelo en plena simulación se observa en la Fig. 6. En ella se puede ver como la masa del contrapeso es acoplada a la grúa mediante un muelle y un amortiguador.

La respuesta transitoria del desplazamiento horizontal de la torre en su parte más alta y el desplazamiento vertical de la pluma en su punta se muestran en la Fig. 7 y Fig. 8 respectivamente, en las que se aprecia una más que clara mejora en ambos movimientos.

Realizando el análisis espectral de estos registros (Fig. 9), se observa como las tres propuestas de amortiguadores de masa absorben la mayor parte de la energía del primer modo al cual se han sintonizado, y una parte apreciable de la del segundo modo, el cual se ha beneficiado del aumento tan grande de amortiguamiento del primero. También se observa, como era de esperar, que al aumentar la masa del TMD y por tanto al aumentar la razón de masa, la mejora es mayor.

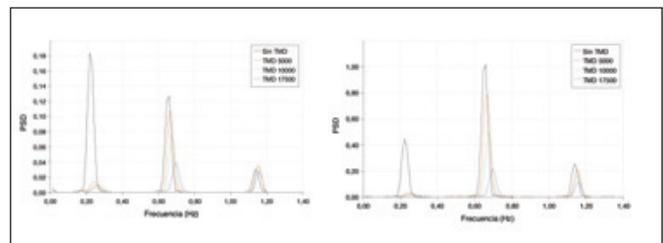


Figura 9. (a) FFT desplazamiento horizontal torre, (b) FFT desplazamiento vertical pluma.

Para cuantificar la mejora obtenida con estos dispositivos podemos fijarnos en magnitudes absolutas, como el valor del desplazamiento, velocidad y aceleración máximos, o relativas, como la razón de amortiguamiento y el tiempo de establecimiento. Estas últimas son más interesantes en problemas como el tratado donde desconocemos el comportamiento real ante una determinada excitación.

Para el cálculo de la razón de amortiguamiento ( $\xi$ ) se ha empleado la clásica formulación del decremento logarítmico [20]:

$$\text{Ln} \left[ \frac{Y_k}{Y_{k+N}} \right] = N\delta \tag{5}$$

$$\xi = \left[ \frac{N\delta}{(2\pi N)^2 + (N\delta)^2} \right]^{0.5} \tag{6}$$

Se ha procedido al sintonizado de varios amortiguadores de masa, cuyos parámetros se calcularon mediante el uso de formulaciones teóricas extraídas de la literatura y a partir de características modales de la grúa obtenidas experimentalmente y por simulación de un modelo de elementos finitos desarrollado para este fin.

Donde  $Y_k$  e  $Y_{k+N}$  son las amplitudes (valor de pico) del máximo desplazamiento en el ciclo de oscilación  $k$  y  $k+N$  respectivamente, siendo  $N$  el número de ciclos que separan a ambas amplitudes y  $\delta$  el decremento logarítmico.

Aplicando estas ecuaciones a las respuestas transitorias, obtenemos las razones de amortiguamiento crítico mostradas en la tabla 3.

Masa TMD (Kg.)	Modo sintonizado	Amortiguamiento modo 1 ( $\xi$ (%))	Amortiguamiento modo 2 ( $\xi$ (%))
17500	1°	10.45	1.64
10000	1°	10.11	0.86
5000	1°	8.49	0.37

Tabla 3. Amortiguamiento en los distintos casos de TMD en la grúa.

Como ya se indicó, no se ha considerado en las simulaciones la razón de amortiguamiento de la grúa torre calculada experimentalmente (0.7%), con lo que los valores de la tabla deberían ser ligeramente superiores. De cualquier manera la mejora de amortiguamiento obtenida es grande, lo cual indica, obviando las dificultades constructivas de estos dispositivos, su idoneidad para este tipo de estructuras.

Otro punto a tener en cuenta para la valoración de la idoneidad de los TMD en grúas torre es el desplazamiento relativo (carrera) de éstos con respecto a su punto de acoplamiento en la grúa (Fig 10), ya que esto nos da una medida del espacio que necesita el TMD para poder trabajar correctamente. En la gráfica se observa que estos

desplazamientos son menores de un metro, y que cuanto mayor es la razón de masas menor es el desplazamiento relativo del TMD, lo cual concuerda con los desarrollos teóricos dispuestos en la bibliografía.

Por tanto para medir cualitativamente y cuantitativamente la eficiencia del dispositivo pasivo no es necesario simular su comportamiento durante el uso diario de la grúa o frente a un determinado viento, lo que nos llevaría a un problema dinámico complejo que precisa la caracterización del viento y del movimiento de las cargas. Ha sido suficiente ver lo que ocurre al conjunto grúa-TMD tras una determinada excitación y así tener un problema de vibraciones libres más sencillo desde el punto de vista matemático.

La ejecución física del dispositivo TMD está siendo objeto de estudio. Una posible solución puede verse en la Fig.11 (ref. ES1064158 (U) *Oficina Española de Patentes y Marcas*), donde los valores de rigidez y amortiguamiento están intrínsecamente definidos por el comportamiento de los soportes neumáticos.

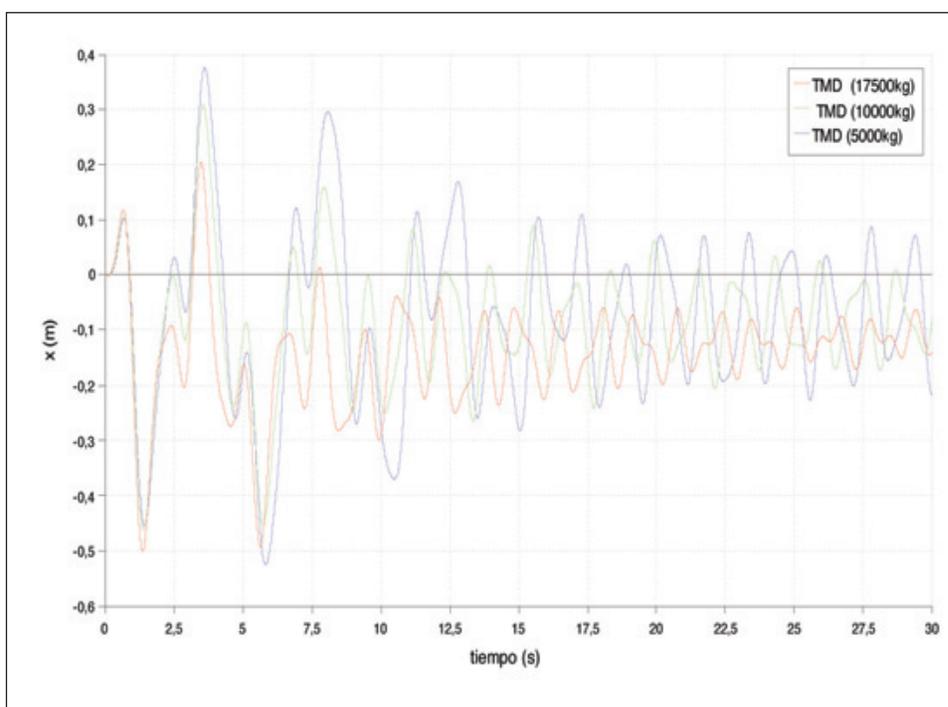


Figura 10. Desplazamiento relativo de los TMD en la contrapluma.

De cualquier manera la mejora de amortiguamiento obtenida es grande, lo cual indica, obviando las dificultades constructivas de estos dispositivos, su idoneidad para este tipo de estructuras.



obteniéndose mejoras en el amortiguamiento de la grúa y en la respuesta dinámica de la grúa.

El uso de toda o parte de la masa del contrapeso como amortiguador de masa pasivo se presenta como la mejor opción en cuanto a la mejora dinámica obtenida, a la no necesidad de modificar el esqueleto resistente de la grúa y a los pequeños desplazamientos relativos del TMD.

En este trabajo se ha empleado un esquema teórico de amortiguador de masa y no se ha tenido en cuenta la problemática del diseño y construcción del dispositivo físico (ejecución, comportamiento con rozamiento, etc.).

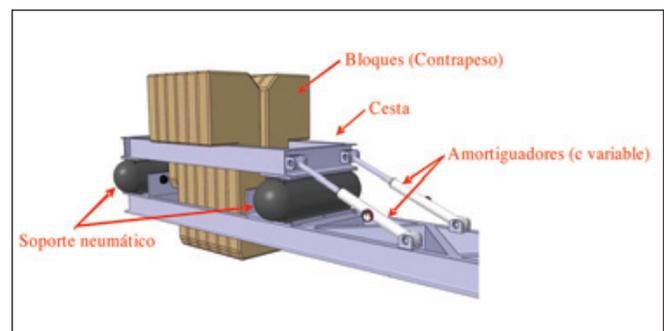


Figura 11. Posible materialización del dispositivo TMD en la grúa.

## 5. CONCLUSIONES

En el trabajo se han propuesto y analizado amortiguadores de masa (TMD) en una grúa torre como dispositivos absorbedores de vibraciones mecánicas. Aprovechando el hecho de que las grúas torre disponen de una gran cantidad de masa generalmente en la contrapluma a modo de contrapeso, se ha evaluado su uso como amortiguador de masa eliminando la necesidad del empleo de masas adicionales que podrían condicionar el rediseño del esqueleto resistente de la grúa.

Se ha procedido al sintonizado de varios amortiguadores de masa, cuyos parámetros se calcularon mediante el uso de formulaciones teóricas extraídas de la literatura y a partir de características modales de la grúa obtenidas experimentalmente y por simulación de un modelo de elementos finitos desarrollado para este fin.

Se ha demostrado mediante simulación de modelos de la grúa con amortiguadores de masa sintonizados que un esquema pasivo de estos se muestra eficiente como dispositivo absorbedor de vibraciones en el modo al cual es sintonizado,

Por tanto para medir cualitativamente y cuantitativamente la eficiencia del dispositivo pasivo no es necesario simular su comportamiento durante el uso diario de la grúa o frente a un determinado viento, lo que nos llevaría a un problema dinámico complejo que precisa la caracterización del viento y del movimiento de las cargas.

## 6.- AGRADECIMIENTOS

Este estudio ha sido financiado por el Ministerio de Industria (FIT 380000-2005-0104 DRAGADOS S.A), Ministerio de Fomento (C16/2006) y por el Ministerio de Educación y Ciencia (PCT-380000-2007-4) de España. Tanto la empresa de construcción DRAGADOS S.A. como la empresa de fabricación de grúas COMANSA, han puesto a nuestra disposición los medios necesarios sin los cuales no hubiera sido posible la realización de dicho estudio. Es por ello que queremos expresar nuestro agradecimiento a todas las personas que directa o indirectamente han colaborado con nosotros.

## 7.- BIBLIOGRAFÍA

- Den Hartog, Jacob Pieter. *Mechanical vibrations*. New York: Dover Publications, 1985. ISBN: 0-486-64785-4.
- Warburton Geoffrey. Barratt. "Optimum absorber parameters for various combinations of response and excitation parameters". *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*. 1982, Volume 10, Issue 3, Pages 381-401.
- Tsai Hsiang-Chuan, Lin Guan-Cheng. "Optimum Tuned-Mass Dampers for Minimizing Steady-State Response of Support-Excited and Damped Systems". *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*. 1993, Volume 22, Issue 11, Pages 957-973.
- Poncela Alfonso, Casado Carlos, Baeyens Enrique, Perán José Ramón. "Design of devices for protecting civil structures using fixed-order H control". *Structural Control and Health Monitoring*. 2005, Volume 14, Issue 2, Pages 239-260.
- Connor Jerome J. *Introduction to structural motion control*. New Jersey: Prentice Hall, 2003. ISBN: 0-13-009138-3.
- Ju Feng., Choo Yoo Sang, Cui Fang Sen, "Dynamic response of tower crane induced by the pendulum motion of the payload". *International Journal of Solids and Structures*. 2006, Volume 43, Issue 2, Pages 376-389.
- Working Model 2D User's Manual. San Mateo: Knowledge Revolution, 1995.
- Haskett Trevor, Breukelman Brian, Robinson Jamieson, Kottelenberg Jan. "Tuned mass dampers under excessive structural excitation". Report of the Motioneering Inc. Ontario. 2005.
- Constantinou Michael C., Soong Tsu-The, Dargush, Gary F. "Passive Energy Dissipation Systems for Structural Design and Retrofit". Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research. Monograph Series N°1: Buffalo. 1998.
- Fujita Takafumi. "Progress of applications of active vibration control for buildings in Japan", *Progress in Structural Engineering and Materials*. 2002, Volume 4, Issue 4, Pages 353-362.
- Tanida Koji. "Progress in the application of active vibration control technologies to long-span bridges in Japan", *Progress in Structural Engineering and Materials*. 2002, Volume 4, Issue 4, Pages 363-371.
- Meseguer José, Sanz Ángel, Perales José Manuel Y Pindado Santiago. *Aerodinámica civil. Cargas de viento en las edificaciones*. Madrid: McGraw-Hill Interamericana de España, 2001. ISBN: 84-481-3332-3.
- Reglamento CIRSOC 102-1, "Acción dinámica del viento sobre las construcciones. Construcciones en general", *SIREA-Sistema reglamentario argentino para las obras civiles*. 1982.
- Juang Jer-Nan. *Applied System Identification*. New Jersey: Prentice Hall, 1994. ISBN: 0-13-079211-X.
- Ljung Lennart. *System Identification: theory for the user*. 2ª Edición. New Jersey: Prentice Hall, 1999. ISBN: 0-13-656695-2.
- Hwang Jae-Seung, Kim Hongjin, Kim Jinkoo. "Estimation of the modal mass of a structure with a tuned-mass damper using H-infinity optimal model reduction". *Engineering Structures*. 2006, Volume 28, Issue 1, Pages 34-42.
- Zienkiewicz Oc. *The finite element method in engineering science*. London: McGraw-Hill, 1971. ISBN: 0-07-084072-5.
- Mcconnell Kenneth G. *Vibration testing: theory and practice*. New York: Wiley-Interscience, 1995. ISBN: 0-471-30435-2.
- COSMOS/M User's Guide 2.6. Los Angeles: Structural Research & Analysis Corporation, 2001.
- Umez-Eronini Eronini. *Dinámica de sistemas de control*. México D.F.: Thomson, 2001. ISBN: 970-686-041-X.