

Control de Vibraciones en Pasarelas Peatonales



Carlos Mariano Casado-Sánchez*

Jesús de Sebastián-Sanz*

Iván Muñoz-Díaz**

Alfonso Poncela-Méndez***

Antolín Lorenzana-Ibán***

Ingeniero Industrial

Ingeniero Industrial

Dr. Ingeniero Industrial

Dr. Ingeniero Industrial

Dr. Ingeniero Industrial

* Centro Tecnológico CARTIF, Parque Tecnológico de Boecillo, Parcela 205 - 47151 Boecillo (Valladolid). Tfno: + 34 983 546504. carcas@cartif.es; jesseb@cartif.es

** Universidad de Castilla-La Mancha, Edificio Politécnico, Av. Camilo José Cela, s/n - 13071 Ciudad Real. Tfno: +34 926 295300. ivan.munoz@uclm.es

*** Universidad de Valladolid, Paseo del Cauce 59 - 47011 Valladolid. Tfno: +34 983 423313. poncela@eis.uva.es; ali@eis.uva.es

Recibido: 29/09/2010 • Aceptado: 14/03/2011

Vibration Control of Pedestrian Bridges

ABSTRACT

• In the last years, a wide number of footbridges have been built as demand response of more direct pathways in cities. These structures have lower building requirements as compared with standard bridges. This circumstance has facilitated the development of new structural design with complex geometries and innovative materials. As a result, these structures may be slender, light and low damped, leading to vibration problems once in service. The current codes take into account this problem, and recommend designs with natural frequencies away from the typical pedestrian pacing rates and fix comfort limits to guarantee the serviceability of the structure.

This paper studies this problem from a practical point of view. Thus, the key points of codes and footbridges guidelines are showed, the typical experimental dynamic analysis techniques are presented, and the usual solutions adopted to improve the dynamic performance of these structures are discussed. Finally, the works carried out on the Valladolid Science Museum Footbridge by Centro Tecnológico CARTIF in collaboration with the Universities of Valladolid and Castilla-La Mancha are showed. These works include: (1) the dynamic study of the three steel spans of the footbridge, (2) the design and implementation of a tuned mass damper in the liveliest span, (3) the implementation of an active mass damper using an electrodynamic shaker, and (4) the development of field tests to assess the serviceability of such span.

• **Key words:** footbridges, vibration control, damping systems, passive control, active control, serviceability.

RESUMEN

En los últimos años se ha construido un gran número de pasarelas peatonales como respuesta a la demanda de nuevas vías de paso en las ciudades. Estas estructuras tienen requisitos constructivos menos exigentes en comparación con otros tipos de puentes, lo cual ha facilitado el desarrollo de diseños con nuevos esquemas resistentes, complicadas geometrías y el empleo de nuevos materiales. En general estas estructuras son esbeltas, ligeras y poco amortiguadas, lo que en ocasiones ha generado problemas de vibraciones al paso de peatones una vez puestas en servicio. Las normativas actuales son cada vez más sensibles a esta problemática, recomendando diseños cuyas frecuencias naturales deben estar alejadas de los rangos de frecuencia de paso típicos de los peatones y fijando límites de confort en forma de valores

máximos de aceleración permitidos, asegurándose así un correcto comportamiento de la estructura.

En el presente artículo se analiza esta problemática desde un punto de vista práctico. Para ello se muestran los puntos clave de las normativas y guías de diseño de pasarelas que se pueden encontrar actualmente en la bibliografía, se presentan las técnicas que habitualmente se emplean en el análisis dinámico experimental de estas estructuras, y se comentan las soluciones a las que generalmente se recurre para mejorar su comportamiento dinámico. Por último, se muestran los trabajos llevados a cabo por el Centro Tecnológico CARTIF en colaboración con las Universidades de Valladolid y Castilla-La Mancha en la pasarela peatonal del Museo de la Ciencia de Valladolid. Estos trabajos incluyen: (1) el estudio dinámico de los tres vanos metálicos de di-

cha pasarela, (2) el diseño e implementación de un amortiguador de masa sintonizado en el vano más sensible a las vibraciones, (3) la implementación de un amortiguador de masa activo utilizando un excitador electrodinámico, y (4) el desarrollo de pruebas para la verificación del estado de servicio de la pasarela.

Palabras clave: pasarela peatonal, control de vibraciones, sistemas de amortiguamiento, control pasivo, control activo, estado de servicio.

1. INTRODUCCIÓN

Las pasarelas peatonales son estructuras cada vez más habituales en las ciudades como consecuencia de una mayor demanda de nuevas vías de paso por parte de los peatones. Estas estructuras tienen requisitos constructivos menos exigentes en comparación con otros tipos de puentes, lo cual ha facilitado el desarrollo de diseños con nuevos esquemas estructurales, complicadas geometrías y el empleo de nuevos materiales como son los materiales compuestos de resina polimérica (Sobrinó y Pulido, 2002). Esto ha dado lugar a estructuras esbeltas, ligeras y poco amortiguadas. Algunas de estas pasarelas singulares experimentan elevados niveles de vibración al paso de peatones, lo cual puede afectar al estado de servicio y raramente lo hace a la seguridad.



Fig. 1: Pasarela "Millennium Bridge" de Londres. (Williams, 2001)

En general y sin obviar las cargas debidas al viento (Hernández-Vázquez, 2005), la principal fuente de vibraciones en las pasarelas son los propios peatones. En ocasiones, los movimientos armónicos de los peatones (andar, correr, etc.) coinciden con alguna de las frecuencias de vibración de la estructura, pudiendo dar lugar a fenómenos de resonancia que se traducen en altos niveles de vibración. Por otro lado, escenarios de carga excepcionales y que raramente se repiten más de una vez en la vida útil de la estructura, como es el caso del día de la inauguración de la estructura o el transcurso de una manifestación por ella, pueden poner de manifiesto problemas dinámicos debido a las elevadas cargas

a las que puede verse sometida la estructura. La pasarela *Millennium Bridge* de Londres (Fig. 1) es un ejemplo significativo de este tipo de sucesos. El 10 de junio de 2000, día de su inauguración, dicha pasarela experimentó elevadas aceleraciones laterales que provocaron el cierre de la misma y su posterior reparación (Dallard et al., 2001). La reparación consistió en la incorporación de numerosos amortiguadores de masa sintonizados para disminuir las vibraciones verticales y varios amortiguadores viscosos para reducir las vibraciones laterales (Fig. 2). El coste de la reparación de la estructura fue de 5 millones de libras lo que supuso un 20 % del coste final (Russell, 2002). El mismo problema fue detectado un año antes en la pasarela de Solferino en París, lo que provocó tanto la implementación de sistemas de amortiguamiento como un mayor estudio en el modelado de las cargas ejercidas por los peatones (Sétra, 2006). Estos dos ejemplos ponen de manifiesto la importancia de considerar las cargas dinámicas en el diseño de las pasarelas.



Fig. 2: Detalle de los sistemas de absorción de vibraciones de la pasarela "Millennium Bridge": a) amortiguadores de masa sintonizados, b) amortiguador viscoso. (Williams, 2001)

Como respuesta a esta problemática, las normativas actuales prestan cada día más atención a los posibles problemas dinámicos y al estado de servicio de las pasarelas. En general, dichas normativas dan recomendaciones para el diseño y fijan límites de confort tal que se asegure un correcto estado de servicio de estas estructuras a lo largo de su vida útil.

En el presente trabajo se comentan las principales recomendaciones de las normativas en vigor, tanto nacionales como internacionales, y algunas de las guías de diseño de

pasarelas peatonales publicadas hasta la fecha. Posteriormente, se muestran las técnicas que se emplean habitualmente en el estudio experimental del comportamiento dinámico de estas estructuras y se presentan las soluciones más comunes para reducir el nivel de vibración en las pasarelas. Por último, se muestran los trabajos llevados a cabo por personal del centro tecnológico CARTIF en colaboración con las Universidades de Valladolid y Castilla-La Mancha en el análisis y control de vibraciones de la pasarela del Museo de la Ciencia de Valladolid. El grupo de control de estructuras y de diseño estructural del centro tecnológico CARTIF trabaja tanto en análisis dinámico de estructuras civiles como en el diseño de sistemas de absorción vibraciones pasivos y semiactivos para pasarelas peatonales (Casado et al., 2008), pasivos para grúas torre (de Sebastián et al., 2009), adaptativos para viaductos (Casado et al., 2007), y pasivos, activos e híbridos para edificios (Poncela et al., 2007).

2. NORMATIVAS Y GUÍAS DE DISEÑO DE PASARELAS PEATONALES

Las normativas de puentes y pasarelas peatonales prestan cada vez más atención a los posibles problemas dinámicos y al análisis del estado de servicio de dichas estructuras. De forma general, dichas normativas recomiendan evitar que los modos principales de las pasarelas estén dentro de los rangos de frecuencia de paso típicos de los peatones (incluyendo andar y correr), y establecen valores límite de aceleración vertical y lateral tal que se asegure el estado de servicio de la estructura. Por otro lado, en algunas normativas, como es el caso de los Eurocódigos, se formulan diferentes estados de carga que deben ser analizados por el diseñador de la estructura.

En la Tabla 1 se muestran los rangos críticos de frecuencia y los límites de aceleración de las principales normativas nacionales e internacionales. Esta Tabla es una actualización de las tablas presentadas en la guía de diseño de pasarelas de la Federación Internacional para el Hormigón Estructural (FIB, 2005). Las variables f_v y f_h son, respectivamente, la

Normativas	Frecuencias críticas (Hz)		Aceleraciones máximas de confort (m/s ²)	
	Vertical	Lateral	Vertical	Lateral
Eurocódigo 0 – Anejo 2 (EN1990 – Annex A2)	<5	<2.5	0.7	0.2(0.4)
Eurocódigo 1 (EN1991)	<5	<2.5	$\min(0.5\sqrt{f_v}, 0.7)$	$\min(0.14\sqrt{f_h}, 0.15)$
Eurocódigo 2 (ENV1992-2)	1.6 – 2.4	0.8 – 1.2		
Eurocódigo 5 (ENV1995-2)	<5	<2.5	0.7	0.2
RPX95, RPM95 (España)			$0.5\sqrt{f_v}$	
EAE (España)	1.6 – 2.4, 3.5 – 4.5	0.6 – 1.2	$\min(0.5\sqrt{f_v}, 0.7)$	0.2(0.4)
BS 5400 (Reino Unido)	<5		$0.5\sqrt{f_v}$	
Din-Fachberitch 102 (Alemania)	1.6 – 2.4, 3.5 – 4.5		$0.5\sqrt{f_v}$	
SIA 260 (Suiza)	1.6 – 4.5	<1.3		
AASHTO 1997 (USA)	<3			
ONT83 (Canada)			$0.25(\sqrt{f_v})^{0.78}$	
Austroads (Australia)	1.5 – 3			
Normativa de Pasarelas japonesa (1979)	1.5 – 2.3		1	
AISC Guide 11			100x $\left(\frac{\text{Curva base}}{\text{Iso 2631-2}} \right)$	
VDI 2057			$0.6(f_v)$	0.214
ISO 10137	1.7 – 2.3		60x $\left(\frac{\text{Curva base}}{\text{Iso 2631-2}} \right)$	

Tabla 1: Frecuencias críticas y valores de aceleración máximas de confort

frecuencia de los modos verticales y laterales de la estructura.

Como se observa en la Tabla 1, la normativa española propone rangos de frecuencia críticos y valores de aceleración máximos de confort que están recogidos en varios documentos (RPM95, RPX95 y EAE). Así, en la nueva instrucción de acero estructural (EAE, 2010), todavía en fase de proyecto, se recomienda que las pasarelas peatonales eviten que sus modos verticales estén comprendidos en el rango de 1.6 Hz a 2.4 Hz, y en el rango de 3.5 Hz a 4.5 Hz, mientras que se fija la aceleración vertical máxima de confort en $0.5\sqrt{f_v} \text{ m/s}^2$, sin que en ningún caso se supere 0.7 m/s^2 cuando un peatón de 750N de peso camine o corra sobre el tablero. También se aconseja evitar modos de vibración lateral o de torsión situados en el rango de 0.6 Hz a 1.2 Hz. En este caso, las aceleraciones horizontales máximas no deberían superar 0.2 m/s^2 en condiciones de uso normal, y 0.4 m/s^2 en condiciones de aglomeraciones excepcionales. Por otro lado, en las recomendaciones para el proyecto de puentes mixtos (RPX95, 1996) y metálicos (RPM95, 1996) del Ministerio de Fomento se establece $0.5\sqrt{f_v} \text{ m/s}^2$ como valor límite de aceleración vertical y se relaciona este límite en aceleración con la flecha en el centro del vano del puente por medio de una formulación sencilla.

En el caso de España, la legislación actual sólo obliga verificar el estado de servicio en algunos casos y normalmente queda a criterio del diseñador o del propietario de la estructura la realización de las mismas. Así, la Instrucción sobre las acciones a considerar en el proyecto de puentes de carretera (IAP, 2003) establece la realización de pruebas de carga estática antes de la puesta en servicio de cualquier puente con vanos superiores a 12 metros, mientras que las pruebas dinámicas solo son preceptivas para vanos mayores de 60 metros o si se prevé que las vibraciones puedan afectar a la funcionalidad de la estructura. Para la realización de pruebas de carga dinámicas, el Ministerio de Fomento editó en 1999 un documento con las recomendaciones para la realización de pruebas de recepción en puentes de carretera que también es aplicable a pasarelas peatonales (Ministerio de Fomento, 1999). En dicho documento se dan algunas pautas para la realización de las pruebas de carga dinámica en pasarelas.

Además de los valores máximos de aceleración fijados en las normativas ya mencionadas, existen otras normativas que tratan el tema de las vibraciones que afectan a las personas (por ejemplo en edificios) cuantificando el valor de la vibración mediante otros índices, como es el MTVV (*Maximum Transient Vibration Value*) o los dosados de vibración (VDV) (ISO 2631-1, 1997). Aunque estos índices no están incluidos en las normativas referentes a puentes y pasarelas, podrían aportar más conocimiento sobre el estado de servicio de las mismas.

Por otro lado, se han publicado en los últimos años guías de diseño de pasarelas peatonales donde se trata con detenimiento el problema de las vibraciones y se sugieren distintas soluciones para mejorar su respuesta dinámica en el caso de tener un nivel excesivo de vibraciones. Algunas de éstas son las publicadas por la ya mencionada *Federación*

Internacional para el Hormigón Estructural (FIB, 2005), la guía francesa del *Service d'Etudes techniques des routes et autoroutes* (Sétra, 2006) o la guía publicada como resultado del proyecto europeo "*Human induced Vibrations on Steel Structures*" (Hivoss, 2008). En la primera de las guías se trata sobre diversos aspectos del diseño y la construcción de pasarelas, y en el capítulo 5 dedicado a la dinámica de la estructura se resumen los rangos de frecuencia críticos, las aceleraciones límite de confort y los distintos modelos de carga a analizar en la fase de diseño que se encuentran en normativas y publicaciones especializadas. Las otras dos guías se centran exclusivamente en el análisis del comportamiento dinámico frente a las cargas de los peatones y presentan dos metodologías similares para el análisis del grado de confort de las pasarelas peatonales en su etapa de diseño.

En las guías también se remarca la importancia del cliente o propietario de la estructura, el cual es el responsable de definir todos los posibles estados de carga que deben ser analizados en la fase de diseño y el grado de confort deseado para cada uno de ellos. También se presta especial atención al efecto del *lock-in* o de sincronización forzada. Este fenómeno que tuvo lugar tanto en la pasarela de *Solferino* como en la pasarela *Millennium Bridge*, consiste en la excitación del modo de flexión lateral de la estructura cuando los peatones sincronizan su paso con dicho modo. El organismo francés Sétra (Sétra, 2006) y la ingeniería ARUP (Fitzpatrick, 2001) estudiaron, respectivamente, este fenómeno en las pasarelas mencionadas. Los estudios concluyeron que el *lock-in* se caracteriza por generarse a partir de un número crítico de peatones o bien al superar un cierto valor de aceleración crítica ($0.10\text{-}0.15 \text{ m/s}^2$).

3. ANÁLISIS DINÁMICO EXPERIMENTAL Y SOLUCIONES ADOPTADAS

La caracterización experimental del comportamiento dinámico de las pasarelas peatonales puede realizarse en dos niveles de complejidad según sean las características de la estructura y el objetivo del estudio. En un primer nivel se identifican los parámetros dinámicos de la estructura, y en un segundo nivel se realizan medidas de la respuesta dinámica de la estructura frente a diferentes escenarios de carga de peatones.

En el primer nivel de estudio se identifican las frecuencias naturales, los modos de vibración, los coeficientes de amortiguamiento y las masas modales correspondientes a los modos de vibración de la pasarela con el objeto de ajustar los modelos numéricos desarrollados en la etapa de diseño y calcular los parámetros óptimos de los sistemas de absorción de vibraciones en el caso de que fueran necesarios. En general, los parámetros dinámicos se identifican a partir de los registros de aceleración en dirección vertical, lateral y longitudinal en puntos clave del tablero, pilas y otros elementos de la estructura en situaciones de respuesta ambiental, libre o

forzada. Los registros se tratan posteriormente con técnicas como (1) el análisis espectral en el que sólo se calculan las frecuencias naturales de la estructura, (2) el análisis modal clásico (EMA – *Experimental Modal Analysis*), donde se mide la respuesta de la estructura ante una entrada conocida que se genera por medio de dispositivos mecánicos como martillos instrumentados y excitadores electrodinámicos, o (3) el análisis modal operacional (OMA – *Operational Modal Analysis*) cuya principal ventaja frente al anterior es que no es necesario excitar a la estructura de forma controlada. Las dos últimas técnicas identifican además de las frecuencias naturales, los modos y amortiguamientos modales de la estructura. En el caso del EMA los modos obtenidos se pueden normalizar, por lo que es posible estimar las masas modales a partir de ellos. En el caso de las frecuencias naturales, es aconsejable identificar éstas con la estructura vacía y en servicio de forma que se obtenga el rango de frecuencias en el que pueden cambiar los modos principales en cualquier escenario de carga.

En el segundo nivel se evalúa el estado de servicio de la estructura y se correlacionan las respuestas experimentales de la estructura con las obtenidas mediante simulación en la etapa de diseño. La guía de diseño de pasarelas Hivoss (2008) sugiere que estos estudios deberían establecerse como pruebas estándar que se deben realizar una vez finalizada la construcción de cualquier pasarela peatonal flexible y poco amortiguada. Una vez analizados los resultados de estos estudios, el propietario de la estructura es el que decide si es necesario o no modificarla para mejorar su comportamiento dinámico.

Las soluciones que habitualmente se emplean para mejorar el comportamiento dinámico de las pasarelas son: (1) diseñar tal como sugieren las normativas, de forma que se evite que las frecuencias naturales estén dentro del rango de frecuencias de paso típicas de los peatones, (2) aumentar la rigidez de la estructura, lo cual implica modificaciones del diseño original, (3) incrementar el peso de la estructura para reducir la influencia de los peatones en su respuesta y, (4) incrementar el amortiguamiento de la estructura mediante el uso de dispositivos y sistemas de absorción de vibraciones.

En la fase de diseño es posible evaluar la viabilidad de todas estas soluciones, pero si la estructura está construida, el aumento de la rigidez y de la masa es complicado y puede implicar cambios tanto estructurales como no estructurales significativos, por lo que el aumento del amortiguamiento ha resultado ser en la práctica la opción más efectiva y viable. En pasarelas peatonales se emplean generalmente absorbentes pasivos de vibraciones, siendo los más eficientes y comunes los amortiguadores de masa sintonizados o TMDs (*Tuned Mass Damper*) y los amortiguadores viscosos. Otras soluciones menos habituales son los amortiguadores de líquido y columna de líquido sintonizado (TLDs y TLCDs), los amortiguadores visco-elásticos, y los amortiguadores de fricción seca. Un ejemplo de pasarela peatonal con TMD en España es la pasarela de Abandoibarra en Bilbao (Dyna, 1997).

4. CASO PRÁCTICO: ANÁLISIS Y MEJORA DEL COMPORTAMIENTO DE LA PASARELA DEL MUSEO DE LA CIENCIA DE VALLADOLID

A continuación se presentan los trabajos llevados a cabo por el centro tecnológico CARTIF en colaboración con las Universidades de Valladolid y de Castilla-La Mancha para el análisis dinámico y control de las vibraciones en la pasarela peatonal del Museo de la Ciencia (PMC) de Valladolid.

4.1 DESCRIPCIÓN DE LA ESTRUCTURA

La PMC de Valladolid inaugurada en 2004 (Fig. 3) consta de un vano de hormigón de 45 metros y tres vanos metálicos de 51, 111 y 21 metros de luz. De aquí en adelante se identifican estos vanos como vano 1, 2, 3 y 4, respectivamente. La tipología resistente de los vanos metálicos es de entramado triangulado de barras tubulares con sección hexagonal, donde el vano 3, el más largo, cuenta con un sistema de pretensado (Ladret y González, 2005) formado por un conjunto de cables longitudinales y transversales cuyo fin es el de estabilizar dicho vano al paso de los peatones (Gómez, 2004).



Fig. 3: Vista general de la PMC de Valladolid

4.2 ANÁLISIS DINÁMICO EXPERIMENTAL

El objetivo de estos estudios era el de conocer de la forma más fiable posible los parámetros modales de la estructura. En primer lugar se realizó un análisis espectral de los registros de aceleración en dirección vertical y lateral. Las mediciones se realizaron en varios puntos del tablero de los tres vanos metálicos. Una vez analizados los espectros de aceleración se identificaron cuáles de las posibles frecuencias naturales obtenidas en los espectros estaban dentro de los rangos de frecuencia críticas. Así, en la dirección vertical, las frecuencias de 3.5 Hz del vano 2 y de 1.21, 2.55 y 4.67 Hz del vano 3 estaban en el rango de frecuencias críticas (<5 Hz, según EN1990), mientras que en la dirección lateral la frecuencia de 2.3 Hz del vano 2 y la de 1.15 Hz del vano 3 son las únicas que estaban en el rango de frecuencia críticas laterales (<2.5 Hz, según EN1990). En la Fig. 4 se muestran dos de los espectros obtenidos de los registros de aceleración vertical en el centro del vano 2 y del vano 3.

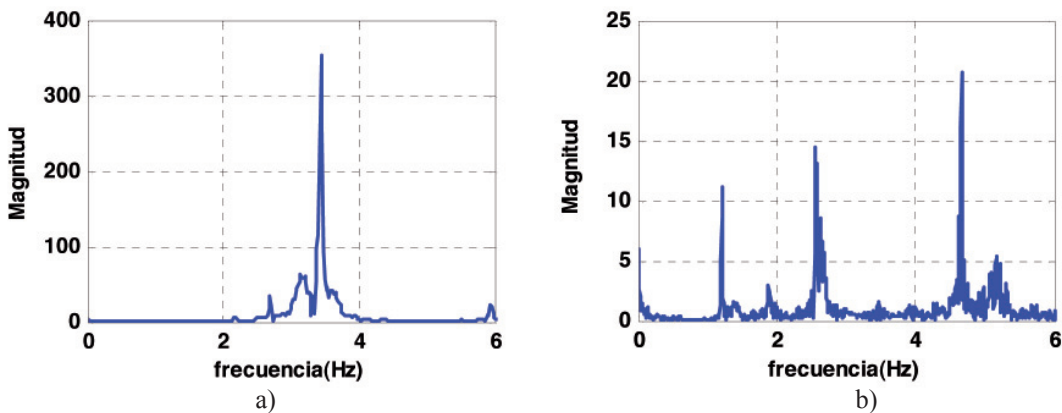


Fig. 4: Ejemplos de espectros de la aceleración vertical en el centro del vano 2 (a) y del vano 3 (b).

Por otro lado se observó que los niveles de vibración en la dirección lateral eran considerablemente menores que en la dirección vertical, y que el nivel de vibraciones del vano 2 era notablemente mayor que el del vano 3 y era relativamente habitual que dicho vano 2 entrara en resonancia al paso de un peatón corriendo. Todo esto se concluyó tras monitorizar durante más de un mes las aceleraciones verticales y laterales en el centro de cada uno de los tres vanos metálicos de la pasarela.

Posteriormente y con el fin de conocer a qué modos de vibración vertical correspondían las frecuencias identificadas en el análisis espectral, se realizó un OMA de la pasarela. Para este análisis se obtuvieron registros de aceleración en dirección vertical en 75 puntos distribuidos a lo largo de los tres vanos metálicos de la pasarela utilizando una frecuencia de muestreo de 100 Hz. Cada registro consistió en la lectura durante 720 segundos de ocho acelerómetros, siendo tres de ellos de referencia (uno por vano). Los parámetros modales se identificaron empleando tres técnicas en el dominio de la frecuencia. Estas son: FDD (*Frequency Domain Decomposition*), EFDD (*Enhanced Frequency Domain Decomposition*) y CFDD (*Curve-Fit Frequency Domain*

Decomposition). Los valores obtenidos con las tres técnicas están recogidos en la Tabla 2.

Por otro lado, en la Fig. 5 se muestran los tres primeros modos de flexión del vano 3 y el primer modo de flexión del vano 2.

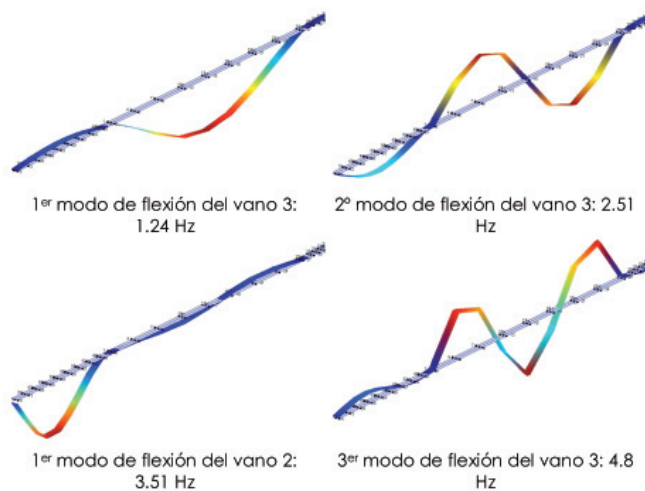


Fig. 5: Primeros modos de flexión de los vanos 2 y 3 de la PMC

FDD		EFDD		CFDD	
Frec. (Hz)	Amort. (%)	Frec. (Hz)	Amort. (%)	Frec. (Hz)	Amort. (%)
Vano 2					
3.516	-	3.514	0.647	3.515	0.636
7.397	-	7.406	0.562	7.399	0.506
9.351	-	9.365	0.552	9.367	0.387
Vano 3					
1.245	-	1.243	1.173	1.257	1.233
2.759	-	2.763	0.563	2.765	0.914
4.785	-	4.792	0.345	4.792	0.327
Vano 4					
8.521	-	8.562	0.568	8.545	0.585
11.5	-	11.36	1.583	11.34	1.11

Tabla 2: Valores de frecuencia y amortiguamiento de los primeros modos de flexión de la PMC obtenidos con el OMA

4.3 AMORTIGUADOR DE MASA SINTONIZADO PARA EL VANO 2 DE LA PMC

Una vez comprobado que las vibraciones verticales del vano 2 de 51 metros eran las de mayor nivel, y que su primer modo de flexión entraba fácilmente en resonancia al paso de peatones corriendo, se decidió diseñar e implementar un amortiguador de masa sintonizado (TMD) para su montaje temporal en el centro del vano.

Un TMD consiste básicamente en una masa acoplada a la estructura por medio de muelles y amortiguadores viscosos cuyo objetivo es la mejora del comportamiento dinámico de la estructura en torno a la frecuencia natural a la que ha sido sintonizado. Habitualmente este dispositivo es pasivo, aunque también hay realizaciones activas y semiactivas que mejoran su eficacia.

Para el diseño del TMD sintonizado al primer modo de flexión del vano 2, fue necesario identificar lo más fiablemente posible sus parámetros modales (frecuencia natural, amortiguamiento y masa modal). La frecuencia natural quedó perfectamente identificada tanto con el análisis espectral como con el OMA. Por otro lado, la cuantificación del amortiguamiento es más complicada y los valores que se obtienen con el OMA son variables y dependientes de los parámetros de la identificación, por lo que fue necesario realizar una identificación más fiable de este parámetro. Para ello se estudió la respuesta amortiguada de la aceleración vertical en el centro del vano tras hacerle entrar en resonancia. A dicha respuesta se le aplicó el método de decremento logarítmico con el que se obtuvo un valor de 0.6%, que en este caso coincidió con los valores estimados en el OMA. Por último, la masa modal se estimó en un valor de 18000 Kg a partir del ajuste de la función de respuesta en frecuencia (FRF) obtenida experimentalmente con un excitador electrodinámico y la medida de la aceleración en el centro del vano.

Una vez conocidos los parámetros modales del primer modo de flexión del vano 2, la masa móvil del TMD se fijó en 185 kg, es decir, aproximadamente el 1% de la masa modal. Esta razón de masa supone teóricamente aumentar el amortiguamiento desde un 0.6% a un 4%, lo que significa

una importante mejora en el comportamiento dinámico del vano. Para el cálculo del resto de los parámetros del TMD, amortiguamiento y frecuencia, se emplearon varias formulaciones de sintonizado óptimo (Connor, 2003) con las que se obtuvo un conjunto de valores iniciales (masa: 185 kg, frecuencia: 3.45 Hz, rigidez: 87015 N/m y amortiguamiento 537 Ns/m) que fueron ajustados in-situ una vez instalado el TMD en la pasarela.

En la Fig. 6 se muestra un esquema del TMD diseñado y posteriormente implementado. En ella se observa como la masa del TMD está formada por una serie de pletinas de acero que descansan sobre una bandeja, la cual se une al bastidor del TMD por medio de cuatro muelles y dos amortiguadores viscosos. Por otra parte, la geometría del conjunto se diseñó teniendo en cuenta el reducido espacio disponible debajo del tablero de la pasarela. En la Fig. 7 se muestra tanto el montaje final del TMD en la PMC como un detalle del mismo.

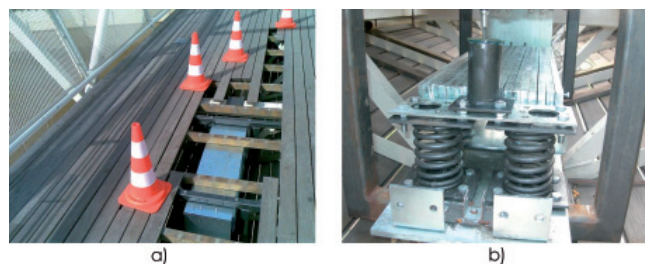


Fig. 7: a) Montaje temporal del TMD en el centro del vano 2 b) Detalle del TMD

Una vez instalado el TMD se realizó un ajuste fino de su masa para optimizar su comportamiento dinámico. En la Fig. 8 se presentan las FRF experimentales entre la aceleración de la estructura y la fuerza de excitación obtenidas en el centro del vano 2 con el TMD ajustado y sin él. En la figura se observa como el modo de flexión de 3.5 Hz que queremos amortiguar se ha desdoblado en dos modos. El objetivo del diseño del TMD y del posterior ajuste fino era el de obtener esos dos modos con la mínima y al mismo tiempo similar amplitud. La distancia entre estos dos modos depende del valor de la razón de masa del TMD (Connor, 2003).

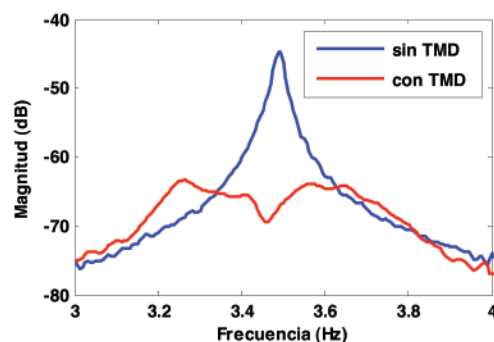
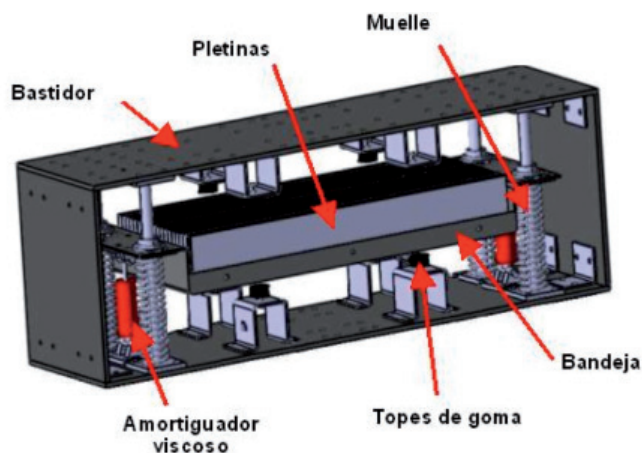


Fig. 6: Prototipo del TMD

Fig. 8: FRF experimental del vano 2 de la pasarela con y sin el TMD en el centro del vano.

4.4 AMORTIGUADOR DE MASA ACTIVO PARA EL VANO 2 DE LA PMC

Con el objetivo de amortiguar las vibraciones en el mismo vano, también se implementó en el centro del vano un actuador de masa inercial como el que se muestra en la Fig. 9, y se diseñó una ley de control basada en la aplicación de una red en retraso a la aceleración de la estructura, la cual se mide directamente con un acelerómetro. El actuador de masa inercial consistió en un excitador electrodinámico comercial, el cual consta de una masa de unos 30 Kg. suspendida por un conjunto de bandas elásticas y cuya posición vertical está

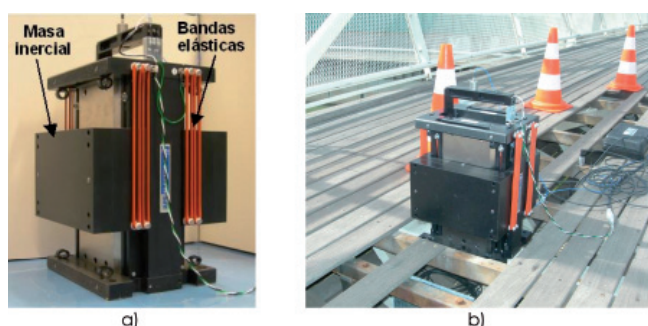


Fig. 9: Excitador electrodinámico (APS 400). a) Detalle del actuador. b) Montaje en el centro del vano 2 de la PMC

controlada por una serie de bobinas eléctricas que generan un campo magnético variable (APS Dynamics).

El funcionamiento de la ley de control es básicamente el mostrado en el diagrama de la Fig. 10. En él se observa como la variable de control, en este caso la aceleración vertical en el centro del vano 2, trata de seguir la señal de referencia, la cual ha sido fijada a un valor nulo. Para ello, el controlador genera una señal “inteligente” de voltaje que comanda al actuador y que se traduce en una fuerza inercial transmitida a la estructura. En Díaz y Reynolds (2010) se pueden encontrar más detalles del diseño de esta ley de control.

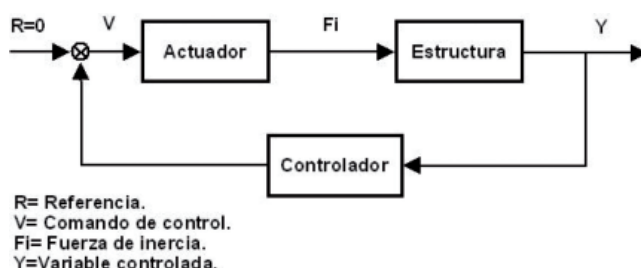


Fig. 10: Esquema de la ley de control del amortiguador de masa activo

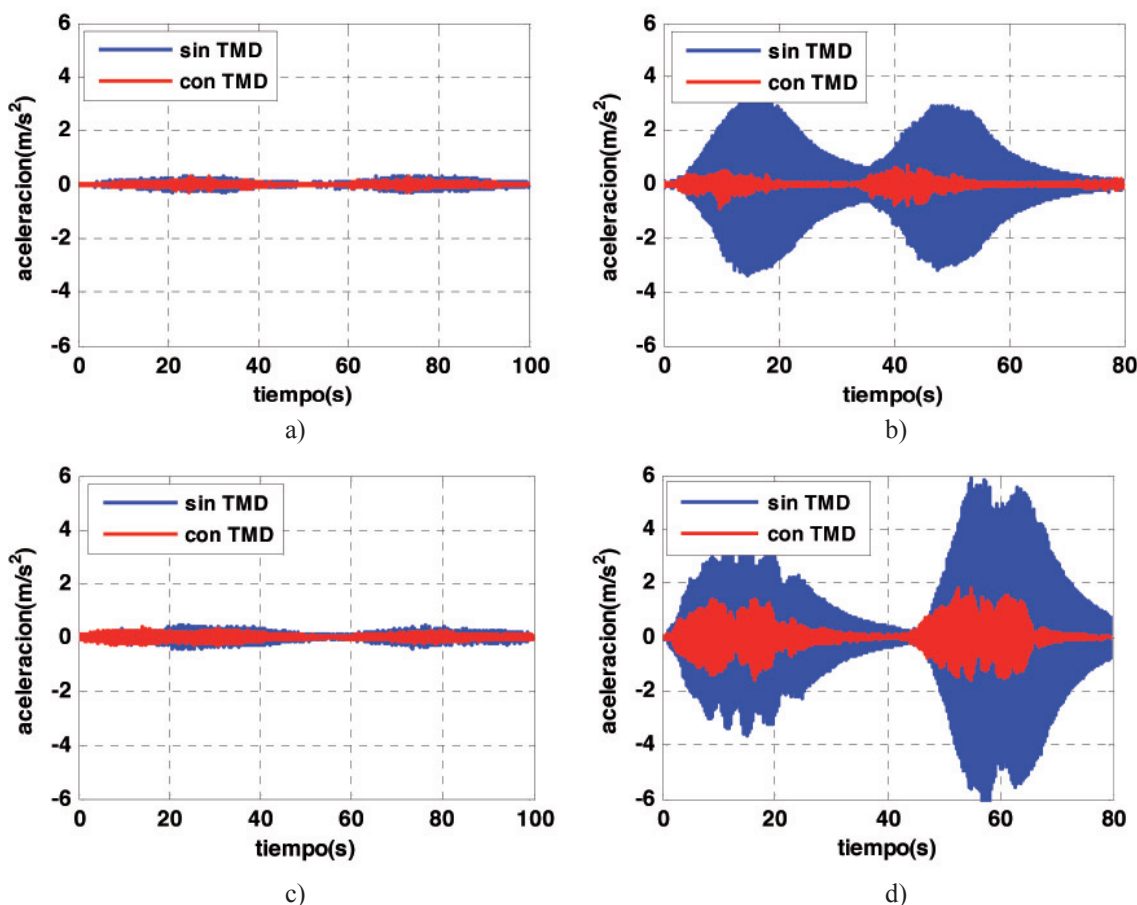


Fig. 11: Pruebas de análisis del estado de servicio del vano 2. Una persona: a) andando a 1.75 Hz, b) corriendo a 3.5 Hz, y un grupo de cuatro personas: c) andando a 1.75 Hz, d) corriendo a 3.5 Hz

4.5 PRUEBAS DE ESTADO DE SERVICIO EN EL VANO 2 DE LA PMC

Por último, se realizaron varios ensayos para cuantificar el desempeño de los sistemas pasivo y activo diseñados. Para ello se analizaron varios estados de carga en los que un peatón y un conjunto de cuatro peatones sincronizaba, con ayuda de un metrónomo, su frecuencia de paso a la primera frecuencia de flexión del vano, la cual es la única que está dentro del rango crítico de frecuencias. De esta forma, se realizaron ensayos tanto con los peatones corriendo a la frecuencia de 3.5 Hz, como andando a la mitad de la frecuencia (1.75 Hz). En este último caso el objetivo de la prueba fue el de evaluar el efecto del segundo armónico de la excitación en la respuesta del vano. En ambas pruebas los peatones realizaban un recorrido de ida y vuelta por el vano en estudio.

En la Fig. 11 se muestran los registros temporales de aceleración vertical en el centro del vano 2 obtenidos en las pruebas con y sin TMD. Este conjunto de pruebas concuerda con los modelos de carga DLM1 (un solo peatón) y DLM2 (un grupo de peatones) definidos en el Eurocódigo 1. En la Fig. 11d. se puede observar la dificultad que tienen cuatro personas para coordinar el paso a la frecuencia de resonancia una vez que el vano tiene un nivel de aceleración notable, y es por ello que no se ha obtenido el mismo nivel de aceleración a la ida que a la vuelta en el caso de la pasarela sin el TMD.

Por último en la Fig. 12 se comparan los valores de aceleración máxima obtenidos en todas las pruebas con los límites de confort propuestos en algunas de las normativas indicadas en la Tabla 1.

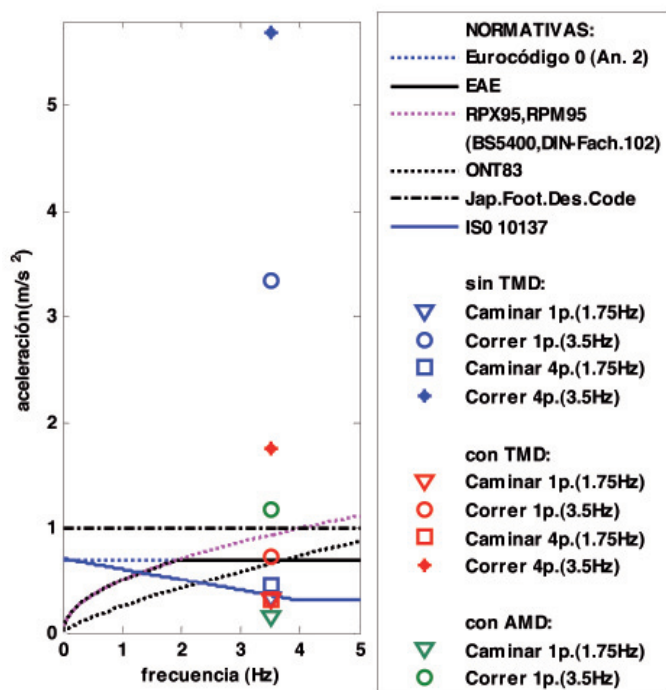


Fig. 12: Verificación del estado de servicio del vano 2 de la pasarela con y sin sistemas de absorción de vibraciones.

Analizando los resultados mostrados en la Fig. 12 para el caso de un peatón, se observa que el vano 2 de la PMC, previo a la implementación de los sistemas de absorción de vibraciones, tiene valores de aceleración máximos muy por encima de la normativa española (EAE) cuando un peatón corre a la frecuencia del primer modo de flexión (3.5 Hz). Una vez que se implementan los sistemas pasivo y activo el valor de aceleración máximo se reduce significativamente. Así, en el caso del TMD se obtiene un valor que cumple críticamente con la normativa española (EAE) y con el eurocódigo empleando el modelo de carga DLM1. Por otro lado el sistema activo consigue menos reducción debido en parte a su menor valor de masa inercial, 30 Kg. frente a los 185 Kg. del sistema pasivo.

Para el caso de cuatro personas corriendo sincronizadas a la frecuencia de resonancia (3.5Hz), el cual puede asemejarse al modelo de carga DLM2 del eurocódigo, se han obtenido niveles de aceleración de la estructura sin control muy por encima de los valores recomendados en la normativa. Con el TMD se ha conseguido una reducción del 70% en el nivel de aceleración, pero no ha sido suficiente para cumplir la normativa.

Para mejorar los resultados obtenidos sería necesario incrementar la masa en el caso del TMD, y optimizar la ley de control y/o aumentar la masa en el caso del sistema activo. En la Fig.12 también se observa que el sistema activo trabaja mejor que el pasivo cuando el nivel de vibraciones es bajo (prueba andando a 1.75 Hz) y que necesita menor valor de masa inercial para conseguir las mismas reducciones que el sistema pasivo. Frente a esto, el sistema pasivo tiene como principal ventaja sobre el activo el ser constructivamente sencillo y tener un mantenimiento mínimo.

5. CONCLUSIONES

Las normativas en vigor tratan de solucionar el problema de las vibraciones en pasarelas peatonales dando recomendaciones en forma de rangos de frecuencia que deben ser evitados por las frecuencias naturales de las pasarelas, y valores máximos de aceleración que aseguren el estado de servicio de la pasarela. Debido a la propia naturaleza de los diseños, alejar los modos de la estructura de los rangos críticos de frecuencia supone grandes modificaciones en la rigidez y masa de las estructuras, lo cual en general es complejo y costoso, por lo que en la práctica la solución más efectiva para cumplir los límites de confort exigidos por las normativas es el aumento del amortiguamiento de la estructura por medio de absorbentes de vibraciones de diferentes tipos. En el presente artículo se ha mostrado de forma práctica, con un ejemplo concreto, que la solución para evaluar y controlar las vibraciones en pasarelas peatonales no es excesivamente compleja, pero necesita del conocimiento de varias técnicas y herramientas para afrontar adecuadamente el problema.

6. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido realizado con la financiación aportada por el Programa de apoyo a proyectos de Investigación de la Junta de Castilla y León (VA019A07) y el Programa de ayudas a la realización de proyectos de investigación, desarrollo e innovación tecnológica en el marco del Plan Nacional de Investigación Científica, Desarrollo e Innovación Tecnológica 2004-2007, correspondientes al Área de Transportes y Construcción, del Ministerio de Fomento (C16/2006). Asimismo, el autor Iván Muñoz Díaz agradece la ayuda económica recibida por la Universidad de Castilla-La Mancha dentro del Programa de Becas para Estancias en otras Universidades o Centros de Investigación.

Los autores agradecen al personal de Museo de la Ciencia de Valladolid su apoyo en las pruebas de campo.

7. BIBLIOGRAFÍA

- APS Dynamics. *Instruction Manual: Electro-seis, model 400 shaker*
- Casado CM, Poncela AV, Lorenzana A. "Adaptive tuned mass damper for the construction of concrete pier" *Structural Engineering International*. 2007. Vol. 17-3 p.252-255
- Connor, JJ. *Introduction to structural motion control*. 1ª edición. New Jersey: MIT-Prentice Hall, 2003. 680p. ISBN: 0-13-009138-3
- Dallard P, Fitzpatrick AJ, Flint A et al. "The London Millennium Footbridge", *The Structural Engineer*. 2001. Vol.79-22 p.17-33
- de Sebastián J, Casado CM, Lorenzana A, Poncela AV. "Sistemas de control de vibraciones para grúas torre". *Dyna Ingeniería e Industria*. 2009. Vol. 84 p.237-244
- Díaz IM, Reynolds P. "Acceleration Feedback Control of Human-induced Floor Vibrations", *Engineering Structures*. 2010 Vol. 32 p.163-173
- Dyna, "La nueva pasarela de Abandoibarra". *Dyna Ingeniería e Industria*. 1997. Vol.72-6 p.15-17
- EAE. *Instrucción de Acero Estructural*. Madrid: Centro de Publicaciones Secretaría General Técnica Ministerio de Fomento, Mayo 2010. 447p.
- FIB. *Bulletin 32: Guidelines for the design of footbridges*. Lausanne: Fédération internationale du béton (FIB), 2005. 154p. ISBN 1-88394-072-X
- Fitzpatrick T. *Linking London: The Millennium Bridge*. London: The Royal Academy of Engineering, 2001. 28p. ISBN: 1-871634-99-7
- Gómez M. "A new and unusual cable-stayed footbridge at Valladolid (Spain)". En: *Proceedings of Steelbridge 2004: Symposium international sur les Ponts Métalliques, (Millau, 23-25 June 2004)*, 2004
- Hernández-Vázquez J. "Estructuras y efectos dinámicos del viento". *DYNA Ingeniería e Industria*. 2005. Vol.80-2 p.9-12
- Hivoss. *Design of Footbridges. Guideline. Human Induced Vibrations of Steel Structure* (Hivoss-RFS2-CT-2007-00033), 2008. 31p.
- IAP. *Instrucción sobre acciones a considerar en el proyecto de puentes de carretera*. 3ª reimpresión. Madrid: Centro de Publicaciones Secretaría General Técnica Ministerio de Fomento, 2003. 79p. ISBN: 84-498-0348-9
- ISO 2631-1:1997, *Mechanical vibration and shock- Evaluation of human exposure to whole-body vibration- part1: General requirements*. 2ª Edition Genève: International Organization for Standardization, 1997. 31p.
- Ladret P, González A. "Pretensado exterior en la pasarela del museo de la ciencia en Valladolid". *Informes de la Construcción*. 2005. Vol.57-497 p.5-11
- Ministerio de Fomento. *Recomendaciones para la realización de pruebas de carga de recepción en puentes de carretera*. Madrid: Centro de Publicaciones Secretaría General Técnica Ministerio de Fomento, 1999. 21p. ISBN: 84-498-0425-6
- Poncela A, Casado C, Baeyens E, Peran JR. "Design of Devices for Protecting Civil Structures using Fixed-Order H_∞ Control". *Journal of Structural Control & Health Monitoring*. 2007. Vol.14-2 p.239-260
- RPM-95. *Recomendaciones para el proyecto de puentes metálicos para carreteras*. 2ª reimpresión. Madrid: Centro de Publicaciones Secretaría General Técnica Ministerio de Fomento, 2003. 214p. ISBN: 84-498-0223-7
- RPX-95. *Recomendaciones para el proyecto de puentes mixtos para carreteras*. 2ª reimpresión. Madrid: Centro de Publicaciones Secretaría General Técnica Ministerio de Fomento, 2003. 257p. ISBN: 84-498-0224-5
- Russell H. "Sway-free footbridge to open at last". *Bridge Design & Engineering*. 2002. Vol.8-26
- Sétra. *Technical guide: Footbridges. Assessment of vibrational behaviour of footbridges under pedestrian loading*. Paris: Service d'Etudes techniques des routes et autoroutes (Sétra), 2006. 127p.
- Sobrino JA, Pulido MD. "Towards advanced composite material footbridges". *Structural Engineering International*. 2002. Vol.2 p.84-86
- Williams M. "Vibrations of the Millennium Bridge". *SECED Newsletter*. November 2001. p.1-3