

# RESPUESTA DINÁMICA DE LA PASARELA DE MADERA DE 270 m SOBRE EL RIO GUADALHORCE.

Álvaro Magdaleno González<sup>1</sup>, Julio Vivas Padilla<sup>2</sup>, Juan José Villacorta Calvo<sup>1</sup>, Alvaro Iglesias Pordomingo<sup>1</sup>, Guillermo Fernández Ordóñez<sup>1</sup>, Antolín Lorenzana Ibán\*<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Universidad de Valladolid, España. alvaro.magdaleno@uva.es, ORCID\_0000-0003-2562-0532

<sup>2</sup> Media Madera Ingenieros Consultores, España. julio@mediamadera.com

<sup>1</sup> Universidad de Valladolid, España. juanjose.villacorta@uva.es, ORCID\_0000-0002-8986-8177

<sup>1</sup> Universidad de Valladolid, España. alvaro.iglesias@uva.es, ORCID\_0000-0002-7093-4568

<sup>1</sup> Universidad de Valladolid, España. guillermo.fernandez@uva.es, ORCID

<sup>1</sup> Universidad de Valladolid, España. antolin.lorenzana@uva.es, ORCID\_0000-0003-2562-0532

## RESUMEN

Esta comunicación muestra la metodología que se ha seguido para identificar dinámicamente una pasarela peatonal de 270 m de longitud, 3 m de ancho y siete vanos, así como la evaluación del estado límite de servicio respecto a las vibraciones debidas al tránsito peatonal. Construida por Media Madera Ingenieros Consultores S.L., es el principal hito estructural de la Senda Litoral de Málaga, a su paso por el Paraje Natural de la Desembocadura del Guadalhorce. Además de la cimentación compuesta por 8 soportes de hormigón armado, la estructura emplea 215 toneladas de madera *glulam* de pino silvestre de procedencia escandinava y casi 15 t de acero inoxidable, todo ello adecuado para el ambiente marino donde se emplaza. Tras su puesta en servicio, a principios del 2020, se realizaron ensayos dinámicos para estimar las propiedades modales. La campaña se complementó con tránsitos coincidentes con alguno los modos excitables por un peatón andando o corriendo. Por debajo de 3.7 Hz la estructura presenta 5 modos de flexión y de torsión, todos ellos con amortiguamientos superiores al 1.5%. Tras los tránsitos resonantes de un solo peatón se consiguen valores de aceleración pico del orden de 1.0 m/s<sup>2</sup>, con valores eficaces máximos inferiores a 0.60 m/s<sup>2</sup>, pudiéndose concluir que la estructura es plenamente funcional para su uso previsto (zonas verdes).

## PALABRAS CLAVE

Tránsito peatonal, análisis modal, evaluación de la aptitud al servicio frente a vibraciones.

## 1 INTRODUCCIÓN

Las pasarelas peatonales, como cualquier otra estructura de construcción civil, arquitectónica o residencial, deben satisfacer una serie de criterios descritos en las normativas [1], incluyendo estados límite últimos y de servicio, así como condicionantes medioambientales y estéticos. Aunque el dimensionamiento viene generalmente marcado por criterios de seguridad, también se deben cumplir los condicionantes de comodidad, en su mayoría relacionados con valores de aceleración de las vibraciones bajo condiciones de uso, evaluados con distintas metodologías e indicadores descritos en múltiples normativas [2, 3 y 4]. Cuando el comportamiento tanto del material como de los elementos estructurales y de sus uniones está bien definido, el cumplimiento de los criterios se puede asegurar mediante técnicas computacionales (simulación). Este es generalmente el caso de estructuras bajo comportamiento predominantemente estático donde, para muchas comprobaciones, las cargas dinámicas pueden simplificarse considerando las cuasiestáticas equivalentes. Sin embargo, cuando el comportamiento no está tan bien definido (caso de las estructuras de madera, sus herrajes y su interacción con la cimentación) o las cargas son predominantemente dinámicas (caso del tránsito peatonal), la evaluación por simulación presenta múltiples deficiencias, principalmente debidas al desconocimiento del coeficiente de amortiguamiento a emplear. A esto se añade la posible dependencia de algunas propiedades con factores ambientales tales como humedad y temperatura, así como condiciones de montaje y mantenimiento. Por todo ello, tras el dimensionamiento y comprobación por simulación en base a parámetros estimados, se hace necesario comprobar, tras la instalación, que esas estimaciones son correctas o al menos conservadoras. Para ello se realizan ensayos dinámicos (no destructivos) como los descritos en esta comunicación. Con ellos, además de verificar el cumplimiento de las condiciones de servicio respecto a vibraciones, se obtienen parámetros valiosos en base a los cuales poder calibrar el modelo computacional. De esta manera se podría simular la respuesta de la estructura, para cada temperatura y humedad, ante condiciones difícilmente ensayables, como cargas sísmicas o condiciones de alta ocupación peatonal.

## 2 DESCRIPCIÓN DE LA ESTRUCTURA

En la pasarela, diseñada, construida e instalada por Media Madera Ingenieros Consultores, se identifican (figura 1) siete vanos simétricos, destacando el central, sobre el río, de 66 m, siendo los laterales, secuencialmente, de 55, 31 y 15 m. Además de los dos estribos en los extremos, se apoya en seis pilas intermedias de distintas alturas, cimentadas en el lecho

aluvial. En su estética destacan las formas curvas de los arcos principales y su barandilla envolvente de formas redondeadas. Las uniones entre los arcos y los soportes son articuladas (figura 2.a) y los arcos de mayores dimensiones están divididos en dos mitades que se montan también mediante articulaciones (figura 2.b). El uso de madera tratada en autoclave con sales hidrosolubles y los herrajes de acero inoxidable garantizan una larga vida útil con un mínimo de mantenimiento. Es un proyecto único en Europa dentro de su tipología, resultando un conjunto estructural tan llamativo como respetuoso con el medioambiente y perfectamente integrado en el emplazamiento.



Figura 1. Pasarela en el Paraje Natural de la desembocadura del río Guadalhorce.

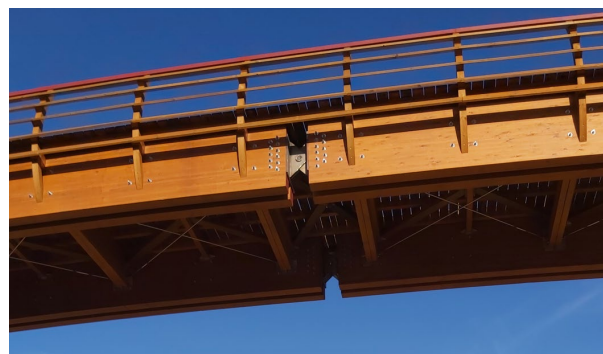


Figura 2. Detalles de las uniones articuladas: (a) a las pilas y (b) entre partes del arco.

### 3 CAMPAÑA EXPERIMENTAL E IDENTIFICACIÓN MODAL

Las técnicas de análisis modal experimental están bien establecidas desde hace décadas [5, 6, 7, 8]. Para su realización se necesitan, en general, medios para registrar las aceleraciones que aparecen en algunos puntos de la estructura cuando se excita con fuerzas conocidas en otros puntos. En este caso, se ha utilizado un equipo autónomo y ligero compuesto por 16 acelerómetros (MMF KS76C.100, 100 mV/g) en dirección vertical y otros 3 (MSI-7114A-0005, 1000 mV/g) en dirección transversal, junto con una placa de fuerza (báscula instrumentada) con la que se puede medir la excitación inducida por el movimiento rítmico de una persona saltando sobre ella. Todas las señales se registran de forma síncrona mediante una tarjeta de adquisición de datos a razón de 1024 datos por segundo. La disposición de los acelerómetros obedece a la pretensión de conocer no solo la previsible respuesta acusada en la dirección vertical sino también posibles modos transversales.

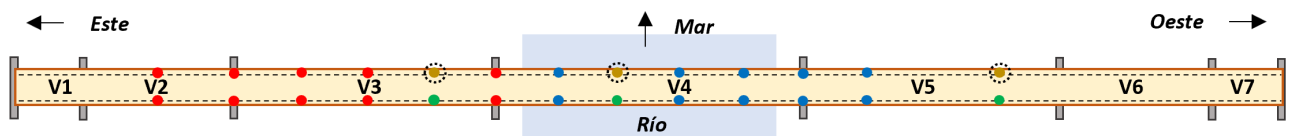


Figura 3. Planta conceptual, indicando la ubicación de los puntos de interés.

La figura 3 muestra un croquis en planta sobre el que se identifican los puntos de excitación y registro. Por su longitud y su simetría se sensorizan solo las secciones indicadas en la figura mediante puntos rojos, verdes, marrones o azules. Se denotan los vanos empezando por el Este, desde V1 hasta V7. Se han seleccionado 13 secciones distribuidas en dos layouts. En cada sección se monitorizan dos puntos, bajo las barandillas, distantes 3 m entre sí. Las secciones corresponden al centro del V2, a las pilas y cuartos del V3, pilas y quintos del V4 y cuartos del V5 (excepto centro). En los puntos de color rojo, marrón y azul se disponen acelerómetros verticales y en los puntos verdes se instalan acelerómetros tanto verticales como transversales (figura 4.a). En resumen, los acelerómetros verticales se ubican por pares en los extremos de cada sección del tablero, con el fin de captar tanto modos de flexión como de torsión, y con los transversales se trata de identificar modos de flexión lateral.

Ambos layouts comparten las posiciones indicadas en verde y marrón. En el primero se consideran además los puntos rojos y en el segundo los azules. Cada layout se compone de 3 setups, dependiendo de dónde se posicione la placa de

fuerza, que siempre se ubica en los puntos marrones. La figura 4.b muestra un instante del ensayo, estando la mesa de control sobre la pasarela, entre V3 y V4. Los 19 canales de aceleración y el canal con la señal de la placa de fuerza se conectan mediante cables a sistema de adquisición de datos (figura 4.b).

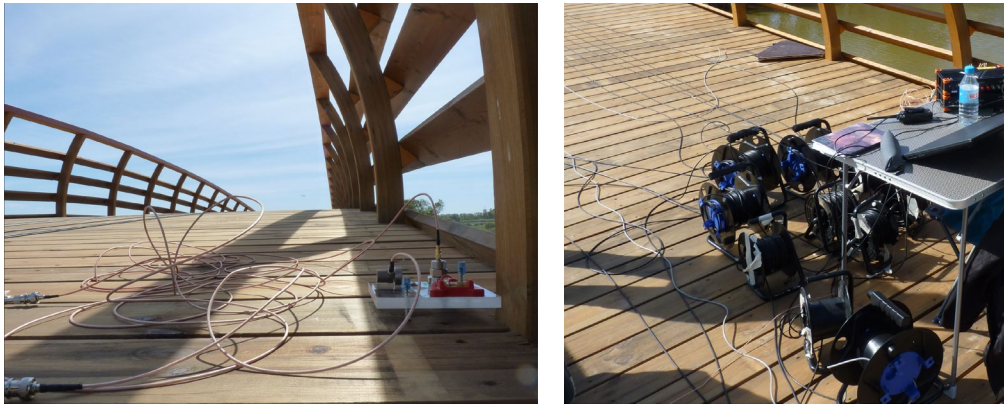


Figura 4. Detalle de (a) uno de los puntos de registro de aceleraciones verticales y transversales y (b) despliegue instrumental.

La figura 5 muestra la magnitud de las funciones de respuesta en frecuencia correspondientes a uno de los *setups* (*layout* 1 excitando en V3), junto con las aspas indicando la aparición de modos más o menos estables (según colores) en función del orden elegido para el ajuste.

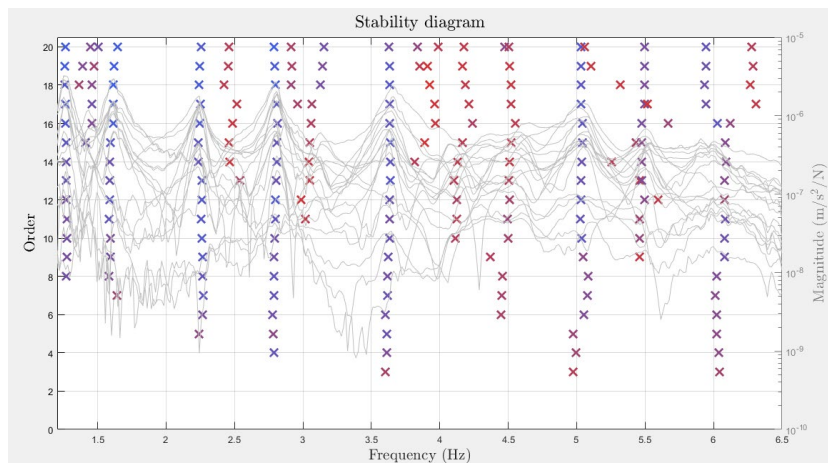


Figura 5. Diagrama de estabilización.

A la vista de todos los diagramas de estabilización disponibles, se decide hacer el ajuste conjunto (de todos los *setups* simultáneamente) hasta orden 20 dentro del rango de interés entre 1.1 Hz y 6.5 Hz. La figura 6 muestra dicho ajuste (línea negra) para una de las múltiples FRFs disponibles.

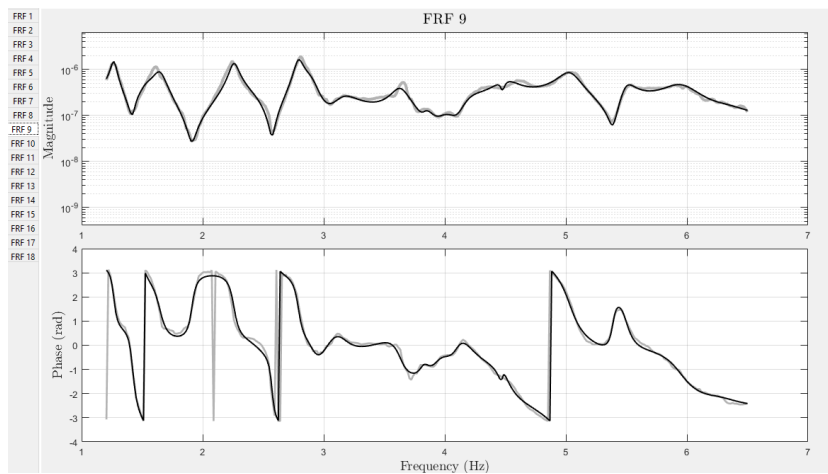


Figura 6. FRF sintética (línea negra) comparada con la experimental (gris claro).

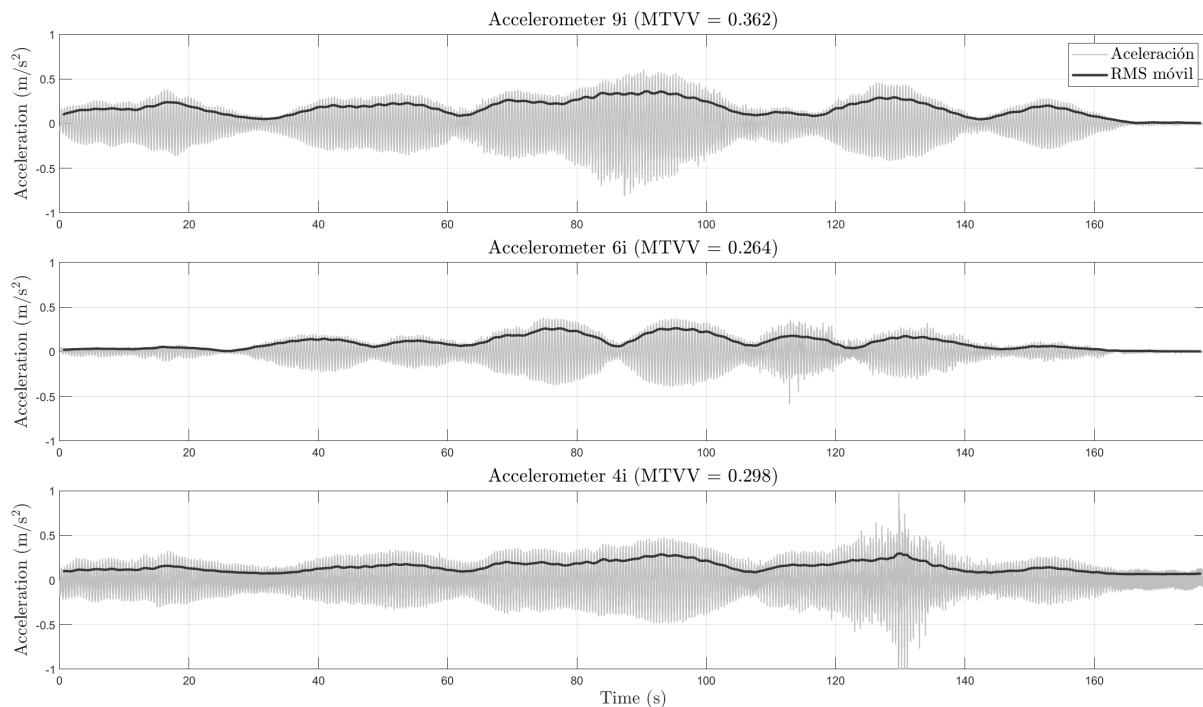
De los 20 modos necesarios para el ajuste, en la tabla 1 se incluyen solo aquellos más representativos dentro del rango de excitación peatonal. Corresponden a modos de flexión vertical (los cuatro primeros) y de torsión (el quinto). No se aprecian, de forma significativa, modos laterales o de flexión combinada con torsión. Se indica no solo el valor de la frecuencia y su forma modal sino también el correspondiente valor del factor de amortiguamiento respecto al crítico.

**Tabla 1.** Frecuencias, amortiguamientos y formas modales.

[Hz]	$\zeta$ [%]	Forma modal
1.263	2.737	
1.624	2.046	
<b>2.238</b>	1.653	
<b>2.800</b>	1.585	
<b>3.622</b>	1.605	

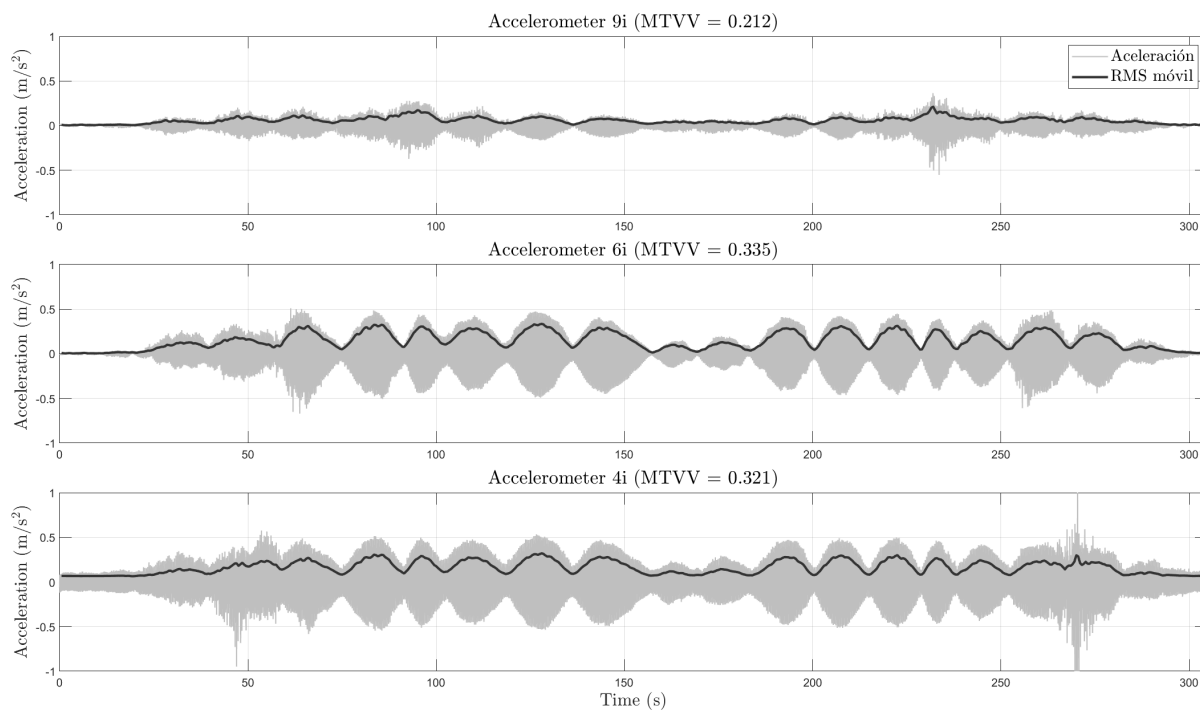
#### 4 EVALUACIÓN DEL ESTADO LÍMITE DE SERVICIO RESPECTO A VIBRACIONES

Adicionalmente se realizan pruebas de tránsito resonante para evaluar la aptitud al servicio respecto a vibraciones. Para ello, la forma habitual de proceder es andar o correr precisamente a las frecuencias identificadas. Los tránsitos los hace con un peatón de 90 kg entrenado que recorre la pasarela, bien por su parte central (pudiéndose excitar los modos de flexión) o por uno de los laterales (para tratar de excitar los de torsión). Se transita a frecuencias de paso coincidentes con todos los modos pero solo los tránsitos coincidentes con el tercer modo de flexión vertical, cuarto de flexión vertical y primer modo de torsión tienen respuestas vibratorias significativas y son los que se muestran en las figuras 7, 8 y 9. De los 16 registros temporales disponibles se seleccionan solo los de los tres acelerómetros verticales ubicados en las posiciones rodeadas (con un círculo negro a puntos) en la figura 3, numerados como 4i, 6i y 9i. En cada caso, se indica en la misma figura la curva RMS\_móvil [2] y los valores MTVV [3].

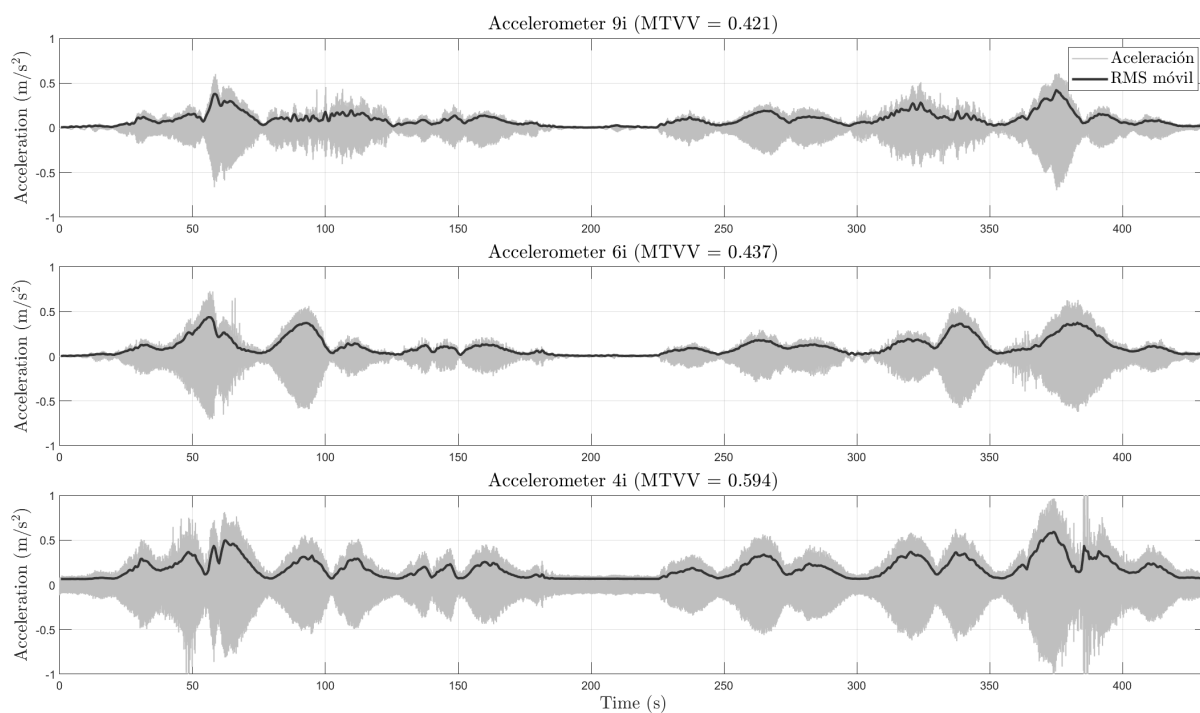


**Figura 7.** Respuestas temporales: ida andando a 134 ppm (2.24 Hz aprox.)

Caminando a 134 pasos por minuto (ppm) se registran respuestas con valores pico del orden de  $0.6 \text{ m/s}^2$  y valores eficaces máximos (MTVV) de  $0.362 \text{ m/s}^2$  (figura 7). Cuando se trata de excitar el cuarto modo de flexión, caminando a 168 ppm, la respuesta alcanza (figura 8) valores pico del orden de  $0.5 \text{ m/s}^2$  y valores eficaces máximos (MTVV) inferiores a  $0.34 \text{ m/s}^2$ . La máxima respuesta registrada corresponde al peatón corriendo a 217 ppm, que excita el primer modo de torsión, alcanzando valores pico del orden de  $1.0 \text{ m/s}^2$  y valores eficaces máximos (MTVV) inferiores a  $0.60 \text{ m/s}^2$ . En todos los casos ensayados se puede clasificar la pasarela dentro del rango de confort normal para el uso previsto (entorno turístico y zonas verdes) donde se permitirían [4] aceleraciones máximas de entre  $1.78 \text{ m/s}^2$  y  $2.4 \text{ m/s}^2$ , con valores medios de  $1.01$  y  $1.31 \text{ m/s}^2$  respectivamente.



**Figura. 8.** Respuestas temporales: ida y vuelta andando a 168 ppm (2.80 Hz aprox.)



**Figura. 9.** Respuestas temporales: ida y vuelta corriendo a 217 ppm (3.62 Hz aprox.)

Adicionalmente se ha tratado de excitar lateralmente tanto el vano V4 como el vano V3, sin éxito, por lo que no se prevén problemas de sincronización lateral entre los peatones y la pasarela, como los que originaron el conocido problema de la pasarela Millennium Bridge de Londres [9]. También se ha intentado alcanzar altos niveles de aceleración (para comprobar la vulnerabilidad a actos vandálicos) mediante saltos a resonancia en varios puntos y a varios modos. Sin embargo la respuesta estructural no ha superado los valores pico y MTVV obtenidos mediante los tránsitos mostrados en las figuras 7, 8 y 9.

Por último, es interesante comentar que los valores indicados podrían verse incrementados para casos sincronizados de grupos de peatones o flujo peatonal. No obstante, se considera que la elevada masa de la estructura y el amortiguamiento superior al 1.5% en todos los modos harán difícil la sincronización, dificultando superar significativamente respuestas elevadas que se pudieran catalogar como incómodas para los usuarios. Asimismo, en condiciones de alta ocupación el amortiguamiento aumentará significativamente, dificultando aún más la posible sincronización.

## 5 CONCLUSIONES

Se ha demostrado que para estructuras esbeltas y mediante equipos portátiles, fácilmente transportables por dos personas, se puede llevar a cabo de forma satisfactoria tanto la identificación modal como la evaluación del estado límite de servicio respecto a vibraciones. Para la pasarela bajo estudio, mediante técnicas de análisis modal experimental y con la instrumentación indicada, se han identificado 4 modos de flexión vertical y uno de torsión en el rango excitable por los peatones. Tratando de excitar todos ellos mediante tránsitos de un solo peatón se consiguen respuestas estructurales de tan solo  $1 \text{ m/s}^2$  (valor pico) o  $0.6 \text{ m/s}^2$  (MTVV), concluyéndose que la pasarela está dentro de los límites de comodidad para su uso previsto. Durante todos los tránsitos realizados, tanto a ritmos de paso coincidentes con los modos identificados como mediante marchas sin ritmo definido (tránsito peatonal aleatorio) no se han registrado aceleraciones laterales que evidencien una respuesta transversal significativa, pudiéndose concluir que estos posibles modos laterales están alejados del rango frecuencial de la excitación peatonal. Para tránsitos grupales o flujo peatonal, dada la gran masa de la pasarela y los altos valores de los amortiguamientos modales, se considera improbable que los niveles de sincronización que se puedan alcanzar provoquen respuestas significativamente mayores que aquellas obtenidas por un solo peatón.

Como conclusión adicional, cabe destacar la adecuación de la madera como material de construcción para este tipo de infraestructuras de gran envergadura, consiguiendo satisfacer los requerimientos normativos junto a otras consideraciones valorables como son aquellas de tipo medioambiental y estético.

## AGRADECIMIENTOS

The authors wish to acknowledge to the AEI, Spanish Government (10.13039/501100011033), and to “ERDF A way of making Europe”, for the partial support through the grant PID2022-140117NB-I00.

## REFERENCIAS

- [1] UNE-EN 1995-2:2010. Eurocódigo 5: Proyecto de estructuras de madera. Parte 2: Puentes. AENOR, 2010.
- [2] ISO. “Mechanical vibration and shock. Evaluation of human exposure to whole-body vibration. I: General requirements.” ISO 2631-1, AENOR, Madrid, Spain, 1997.
- [3] International Standard ISO 10137: 2007(E), Bases of for design of structures - Serviceability of buildings and walkways against vibrations. ISO 10137:2007, International Organization for Standardization, 2007.
- [4] SETRA. Technical guide - footbridges - Assessment of vibrational behavior of footbridges under pedestrian loading, Service d'Etudes Techniques des Routes et Autoroutes, 2006.
- [5] D. J. Ewins, Modal testing: theory, practice, and application. Research Studies Press, 2000.
- [6] N. M. M. Maia and J. M. M. Silva, Theoretical and Experimental Modal Analysis. Research Studies Press, 1997.
- [7] E. Shahabpoor, A. Pavic, V. Racic, and S. Zivanovic. Effect of group walking traffic on dynamic properties of pedestrian structures. *Journal of Sound and Vibration*, 387:207–225, 2017.
- [8] J. Sebastian, I. M. Diaz, C. M. Casado, A. V. Poncela, and A. Lorenzana. Evaluación de la predicción de aceleraciones debidas al tránsito peatonal en una pasarela en servicio. *Informes de la Construcción*, 65(531):335–348, 2013.
- [9] SH. Strogatz, DM. Abrams, A. McRobie, B. Eckhardt, E. Ott. Crowd synchrony on the Millennium Bridge. *Nature*, 438 (7064), 43-44, (2005)