

Respuesta dinámica de la pasarela de madera de 270 m sobre el río Guadalhorce

Serviceability assessment of the 270 m timber footbridge over Guadalhorce river

Álvaro Magdaleno González 

Julio Vivas Padilla 

Juan José Villacorta Calvo 

Álvaro Iglesias Pordomingo 

G. Fernández Ordóñez 

Antolín Lorenzana Ibán 

ITAP, Universidad de Valladolid, Valladolid. España.

Media-Madera Ingenieros Consultores S.L, Carreño. España.

ITAP, Universidad de Valladolid, Valladolid. España.

ITAP, Universidad de Valladolid, Valladolid. España.

ITAP, Universidad de Valladolid, Valladolid. España.

ITAP, Universidad de Valladolid, Valladolid. España.

Autor de contacto: antolin.lorenzana@uva.es

RESUMEN

Este trabajo presenta la metodología utilizada para la identificación dinámica de una pasarela peatonal de 270 m, parte de la Senda Litoral de Málaga, en el Paraje Natural de la Desembocadura del Guadalhorce. Diseñada por Media Madera Ingenieros Consultores S.L., la estructura cuenta con 215 toneladas de madera *glulam* de conífera y casi 15 toneladas de acero inoxidable, adaptadas para resistir el ambiente marino. Tras su puesta en servicio en 2020, se llevaron a cabo ensayos dinámicos para estimar sus propiedades modales. Se identificaron cinco modos de flexión y torsión por debajo de los 3.7 Hz, todos con amortiguamientos superiores al 1.5 %. Los tránsitos peatonales resonantes generaron aceleraciones pico de hasta 1.0 m/s², con valores eficaces máximos por debajo de 0.60 m/s². Estos resultados permiten concluir que la estructura es completamente funcional y adecuada para su uso previsto en entornos de zonas verdes.

Palabras clave: pasarela peatonal de madera; tránsito peatonal; análisis modal; evaluación de la aptitud al servicio frente a vibraciones.

ABSTRACT

This paper presents the methodology used for the dynamic identification and the vibration serviceability assessment of the 270 m pedestrian footbridge in the Desembocadura del Guadalhorce Natural Park, Málaga, Spain. Designed by Media Madera Ingenieros Consultores S.L., the structure comprises 215 tonnes of glulam timber and almost 15 tonnes of stainless steel, adapted to withstand the marine environment. After its commissioning in 2020, dynamic tests were carried out to estimate its modal properties. Five bending and torsional modes below 3.7 Hz were identified, all with damping ratios above 1.5 % and prone to be excited by the standard pedestrian activity. The resonant pedestrian transits generated peak accelerations of up to 1.0 m/s², with maximum RMS values below 0.60 m/s². These results lead to the conclusion that the structure is fully functional and suitable for its intended use in green space environments.

Keywords: timber footbridge; vibration serviceability assessment; modal analysis; pedestrian gait.

Cómo citar este artículo/Citation: Álvaro Magdaleno González, Julio Vivas Padilla, Juan José Villacorta Calvo, Álvaro Iglesias Pordomingo, Guillermo Fernández Ordóñez, Antolín Lorenzana Ibán (2025). Respuesta dinámica de la pasarela de madera de 270 m sobre el río Guadalhorce. Informes de la Construcción, 77 (580): 7107. <https://doi.org/10.3989/ic.7107>

Copyright: © 2025 CSIC. Este es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos de la licencia de uso y distribución Creative Commons Reconocimiento 4.0 Internacional (CC BY 4.0)

Recibido/Received: 04/09/2024

Aceptado/Accepted: 04/08/2025

Publicado on-line/Published on-line: 22/01/2026

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. Además de los criterios estéticos, el dimensionamiento viene generalmente marcado por los criterios de seguridad, pero 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, 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 (modelado numérico y 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 [5], así como condiciones de montaje y mantenimiento, por no mencionar posibles fenómenos de interacción.

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 este trabajo. Con ellos, además de verificar el cumplimiento 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.

Para el caso bajo estudio, los objetivos de este trabajo son: en primer lugar, realizar una identificación modal de la estructura; y, en segundo lugar, conocidos los modos susceptibles de ser excitados por la acción peatonal, realizar la correspondiente evaluación del estado límite de servicio respecto a vibraciones.

2. DESCRIPCIÓN DE LA ESTRUCTURA

En la pasarela bajo estudio se identifican (Figura 1) siete vanos simétricos, destacando el central, sobre el río Guadalhorce, 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



a)



b)

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

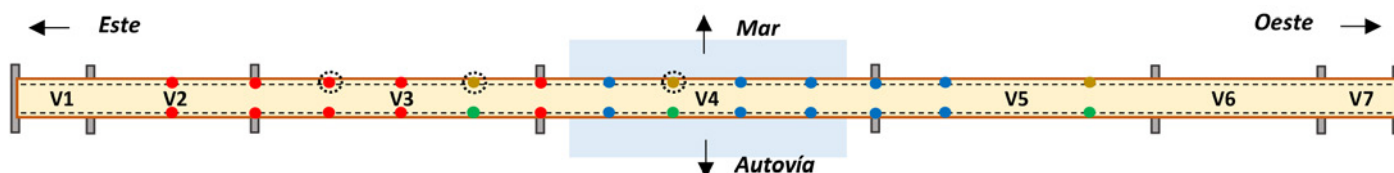


Figura 3. Planta conceptual, indicando la ubicación de los sensores

3. CAMPAÑA EXPERIMENTAL E IDENTIFICACIÓN MODAL

Las técnicas de análisis modal experimental están bien establecidas desde hace décadas [6, 7]. Para su realización se necesitan, en general, medios para registrar las aceleraciones que aparecen en algunos puntos de la estructura cuando se excita ésta 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 (*bouncing* rítmico, *heel-drops* u otras actividades) de una persona saltando sobre ella. Todas las señales se registran (aceleración y fuerza) de forma síncrona mediante una tarjeta de adquisición de datos (*Sirus STG*, *Dewesoft*) 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.

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 instalan acelerómetros solo en 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). 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, mientras que con los transversales se trata de identificar modos de flexión lateral.



Figura 4. Detalle de uno de los puntos de registro de aceleraciones verticales y transversales

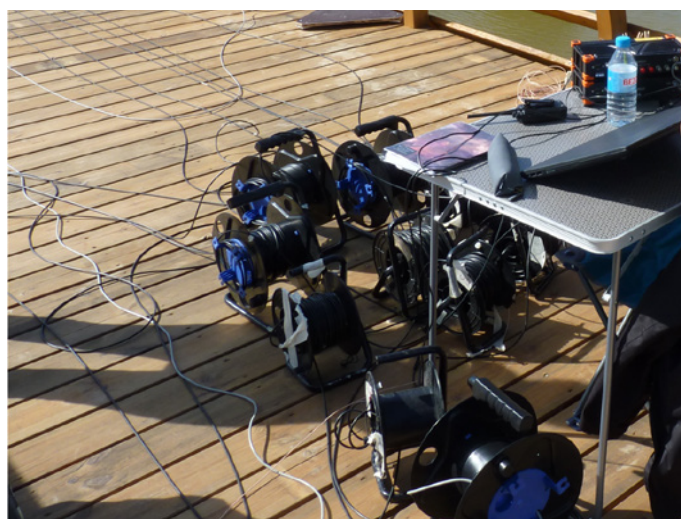


Figura 5. Detalle de la instrumentación utilizada

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 5 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 (también presente en la Figura 5) se conectan mediante cables al sistema de adquisición de datos.

La Figura 6 muestra la magnitud de las funciones de respuesta en frecuencia (FRF) correspondientes a uno de los *setups* (*layout* 1 excitando en V3), junto con las aspas, las cuales indican la aparición de modos más o menos estables (estando codificados según su color) en función del orden elegido para el ajuste realizado.

A la vista de todos los diagramas de estabilización disponibles, se decide hacer el ajuste conjunto (de todos los *setups* simultáneamente) desde orden 3 hasta el orden necesario para estimar todos los modos dentro del rango de interés (entre 1.1 Hz y 6.5 Hz). En la Figura 6 se aprecia cómo a medida que se incrementa el orden, se van consolidando los modos identificados. El ajuste consiste en buscar los valores ω_r (frecuencia natural), ζ_r (factor de amortiguamiento crítico) y Φ_r (vector de forma modal), para cada modo r , de tal manera que se minimice el error (mínimos cuadrados) entre la curva

experimental y el modelo matemático [6] dado por la expresión (1), donde j es la unidad imaginaria y n el orden del modelo empleado:

$$(1) \quad h_k(j\omega) = \sum_{r=1}^n \left(\frac{\phi_{rk} \phi_{rk}}{j\omega - s_r} + \frac{\phi_{rk}^* \phi_{rk}^*}{j\omega - s_r^*} \right)$$

$$s_r = -\omega_r \zeta_r + j\omega_r \sqrt{1 - \zeta_r^2}$$

Para valorar visualmente la bondad del ajuste realizado, la Figura 7 compara dicho ajuste (línea roja) para una de las múltiples FRFs experimentales. Esta comparación corresponde a $n = 20$, y en ella se aprecia una precisión suficiente, no siendo necesario incrementar el orden para los propósitos de este trabajo.

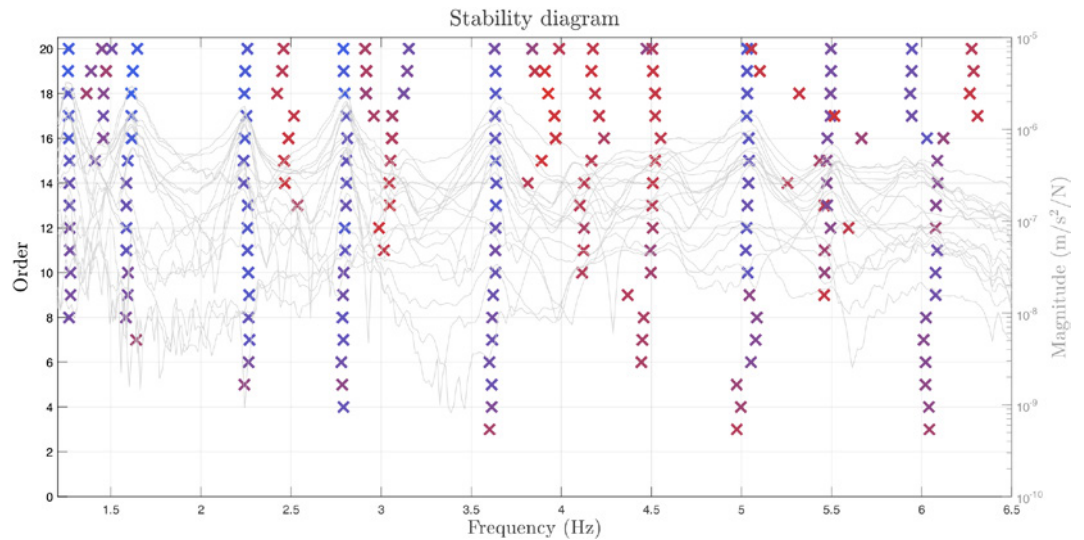


Figura 6. Diagrama de estabilización

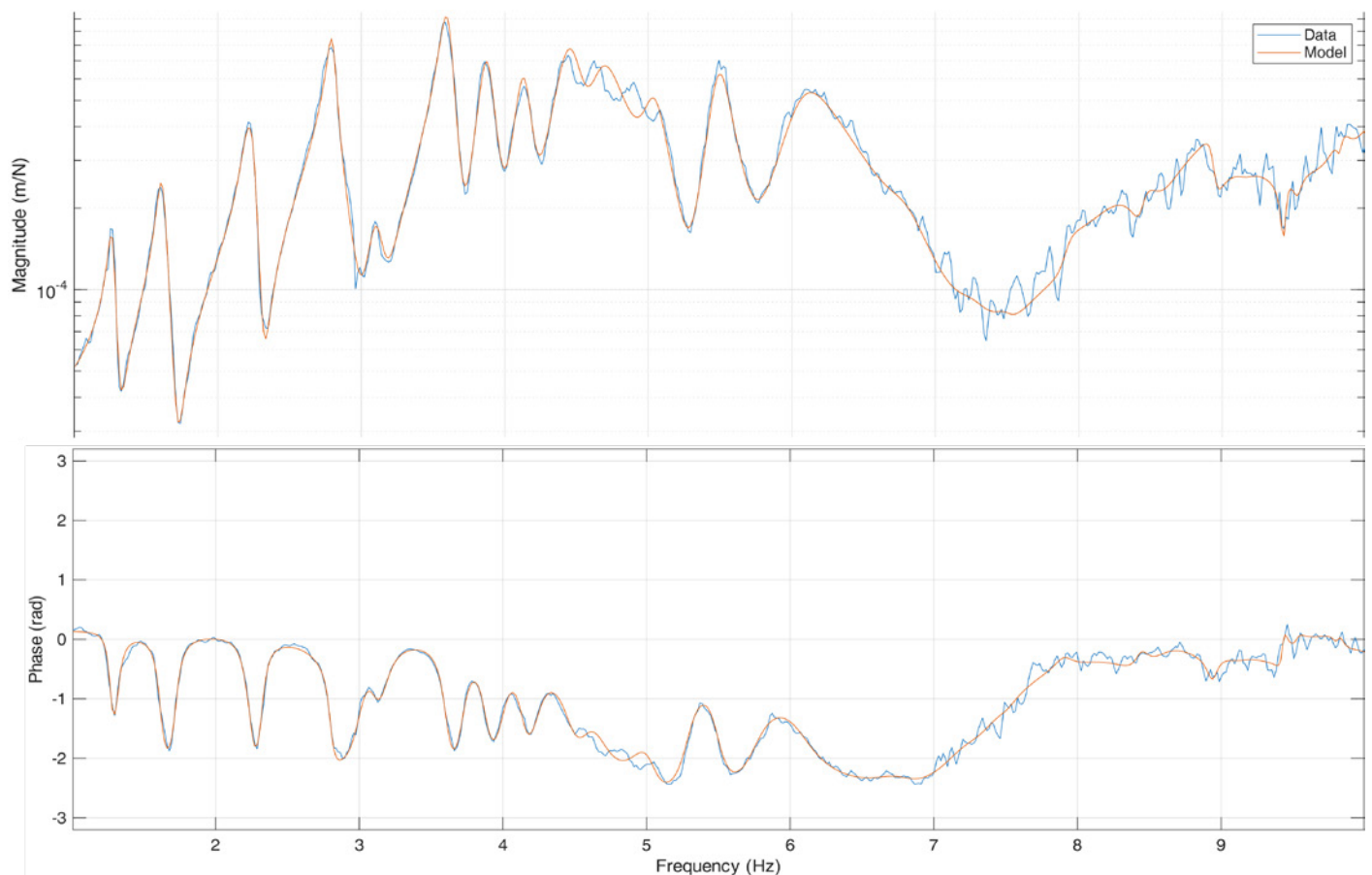


Figura 7. Ejemplo de FRF experimental (línea azul) y ajustada (línea roja)

De los 20 modos resultantes del 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 ζ respecto al crítico (en porcentaje). Todos los resultados experimentales obtenidos se usan en el proceso de *model updating* tras el cual se consigue un modelo computacional suficientemente realista, del que se han obtenido las formas modales indicadas también en la Tabla 1.

4. EVALUACIÓN DEL ESTADO LÍMITE DE SERVICIO RESPECTO A VIBRACIONES

Uno de los objetivos del trabajo es evaluar la aptitud al servicio respecto a vibraciones, siguiendo metodologías similares a las llevadas a cabo en [8] y [9]. Para ello, la forma habitual de proceder es andar o correr a las frecuencias identificadas (con ayuda de un metrónomo). Los tránsitos se hacen 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 (indicados en negrita en la Tabla 1) tienen respuestas vibratorias significativas (superiores a 0.2 m/s²) y son los que se muestran en las Figuras 8, 9 y 10. 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].

Caminando a 134 pasos por minuto (ppm) se registran respuestas con valores pico del orden de 0.6 m/s² y valores eficaces máximos (MTVV) de 0.362 m/s² (Figura 8). Cuando se trata de excitar el cuarto modo de flexión, caminando a 168 ppm, la respuesta (Figura 9) alcanza valores pico del orden de 0.5 m/s² y valores eficaces máximos (MTVV) inferiores a 0.34 m/s². 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 m/s² y valores eficaces máximos (MTVV) inferiores a 0.60 m/s² como se aprecia en la Figura 10. 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 m/s² y 2.4 m/s², con valores medios entre 1.01 y 1.31 m/s².

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 [10]. También se ha intentado alcanzar altos niveles de aceleración (para comprobar la vulnerabilidad a actos vandálicos) mediante saltos resonantes a frecuencias coincidentes con las identificadas en varios puntos (vientres de las correspondientes formas modales). Sin embargo, la respuesta estructural provocada por un único peatón no ha superado los valores pico y MTVV obtenidos mediante los tránsitos mostrados en las Figuras 8, 9 y 10. La razón de la mínima respuesta ante estos fenómenos se debe buscar en la acertada tipología estructural y en los altos niveles de amortiguamiento conseguidos.

Por último, es interesante comentar que los valores indicados podrían verse incrementados para casos sincronizados de grupos de peatones o flujo peatonal [4, 10]. No obstante, se considera que la elevada masa de la estructura y el relativamente alto 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.

Tabla 1. Frecuencias, amortiguamientos y formas modales

[Hz]	ζ [%]	Forma modal
1.263	2.737	
1.624	2.046	
2.238	1.653	
2.800	1.585	
3.622	1.605	

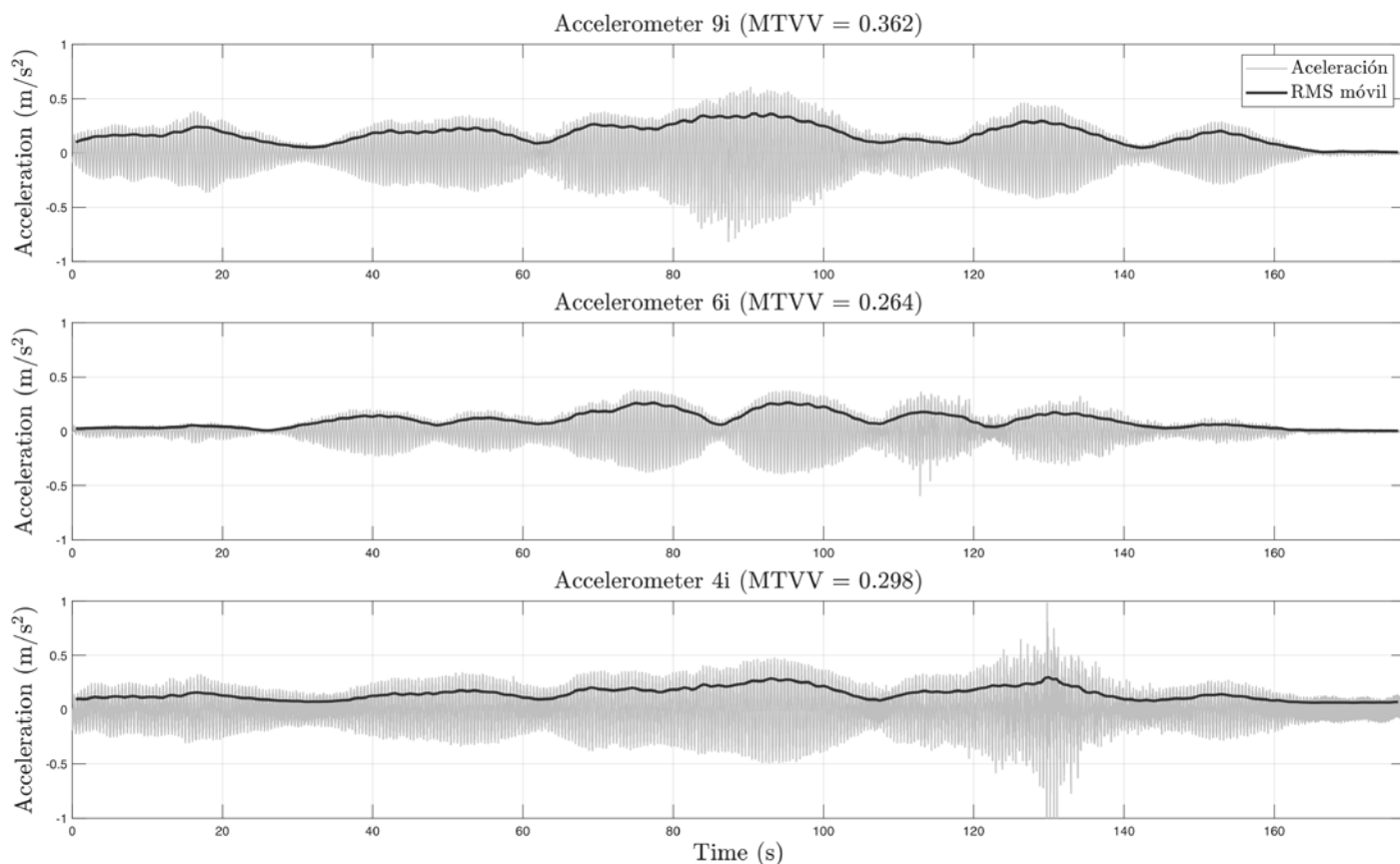


Figura 8. Respuestas temporales: ida andando a 134 ppm

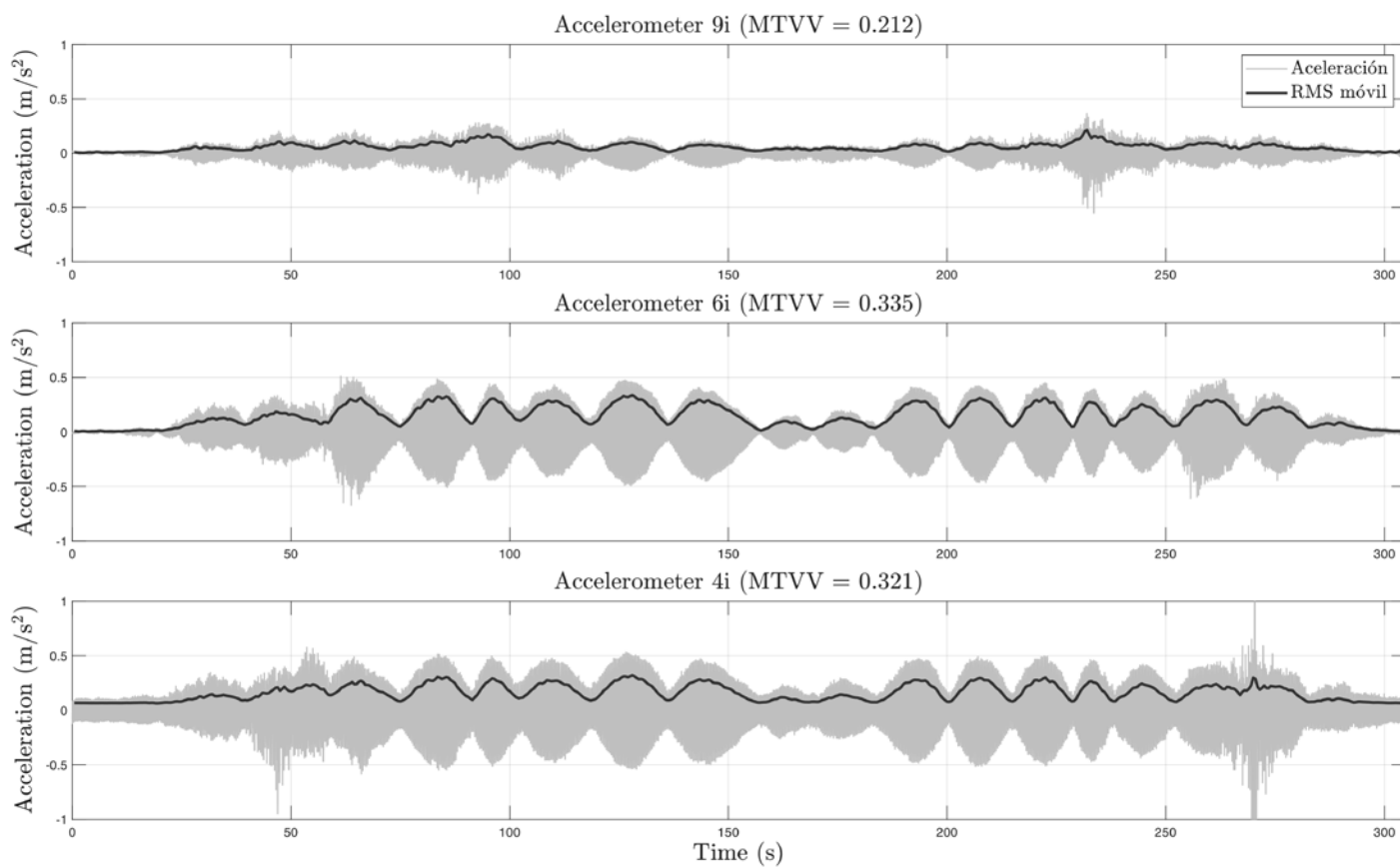


Figura 9. Respuestas temporales: ida y vuelta andando a 168 ppm

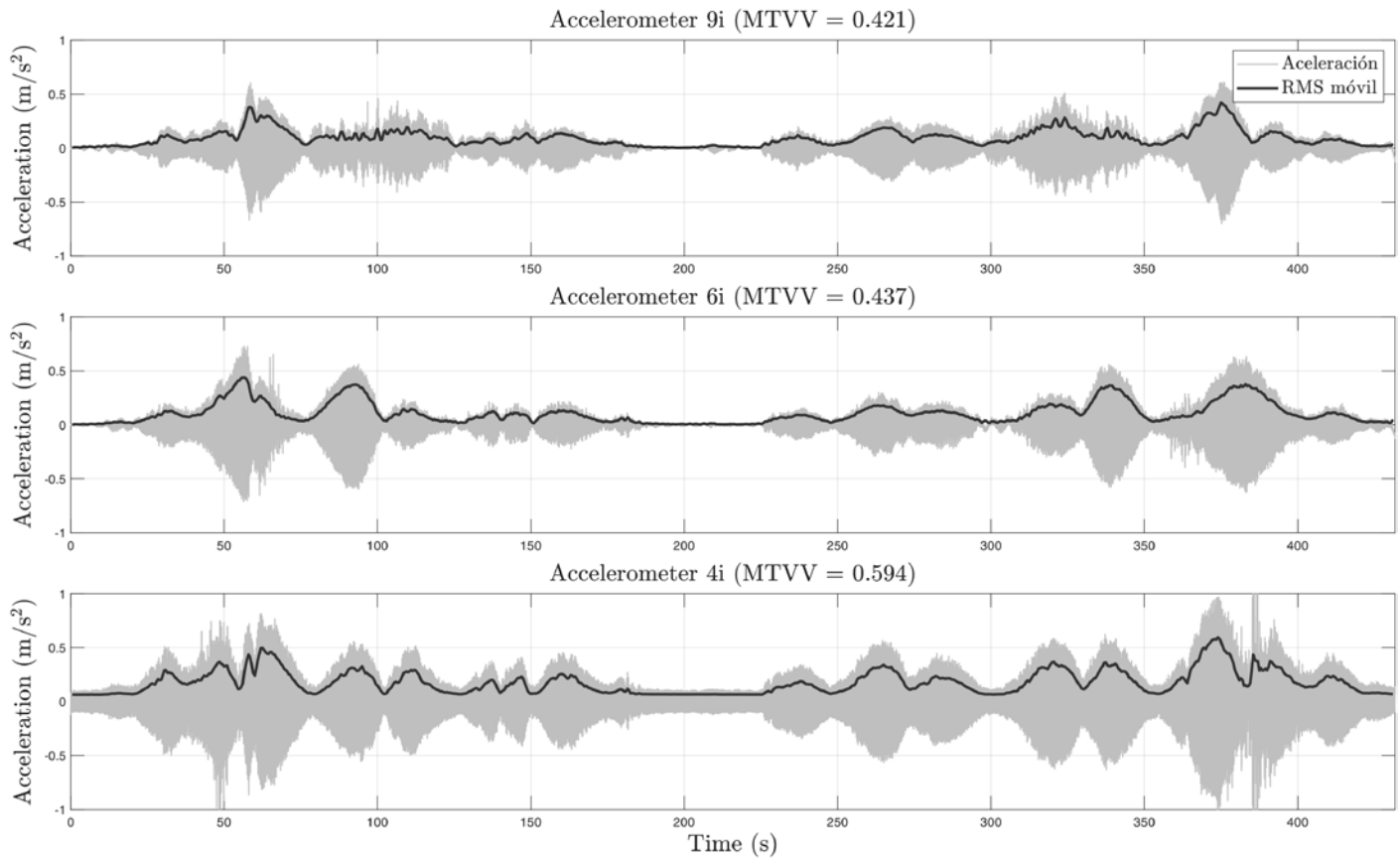


Figura 10. Respuestas temporales: ida y vuelta corriendo a 217 ppm

5. CONCLUSIONES

Se ha constatado experimentalmente 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, permitiendo proponer una metodología novedosa en el ámbito de las pruebas de campo en ingeniería estructural.

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 movilizar cada uno de ellos mediante tránsitos de un solo peatón se consiguen respuestas estructurales de “tan solo” 1 m/s^2 (valor pico) o 0.6 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 aquellos 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.

Los resultados presentados corresponden a un escenario concreto. Este tipo de estructuras pueden sufrir cambios significativos por razones ambientales [5] (como la humedad y la temperatura) o por deformaciones debidas a que la madera es un material natural que evoluciona con el paso del tiempo (envejecimiento). Estos cambios podrían justificar la necesidad de repetir los ensayos realizados en otros escenarios y correlacionar las diferencias en la respuesta con indicadores de dichas alteraciones, trazando de esta manera el estado de salud de la estructura a lo largo del tiempo.

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

Los autores agradecen al MCIN/AEI, Gobierno de España (10.13039/501100011033), y a la Unión Europea, por su apoyo parcial a través de las ayudas PID2022-140117NB-I00. Asimismo, se agradece el apoyo recibido por parte del Ministerio de Universidades a través de la ayuda FPU (referencia FPU21/03999) y “Programa InvestigO CP23-174 – Financiado por la UE, NextGenerationEU”.

DECLARACIÓN DE CONFLICTO DE INTERESES

Los autores de este artículo declaran no tener conflictos de intereses financieros, profesionales o personales que pudieran haber influido de manera inapropiada en este trabajo.

DECLARACIÓN DE CONTRIBUCIÓN DE AUTORÍA

Álvaro Magdaleno González: Conceptualización, Curado de datos, Metodología, Redacción – borrador original. Redacción – revisión y edición.
Julio Vivas Padilla: Investigación, Metodología, Validación.
Juan José Villacorta Calvo: Conceptualización, Software, Supervisión, Análisis formal.
Álvaro Iglesias Pordomingo: Curado de datos, Metodología, Software
Guillermo Fernández Ordóñez: Metodología, Redacción – revisión y edición.
Antolín Lorenzana Ibán: Administración, Financiación, Supervisión.

REFERENCIAS

- [1] UNE-EN 1995-2:2010: *Eurocódigo 5: Proyecto de estructuras de madera. Parte 2: Puentes*. Madrid, España: AENOR, 2010.
- [2] ISO 2631-1: *Mechanical Vibration and Shock – Evaluation of Human Exposure to Whole Body Vibration – Part 1: General Requirements*. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization, 1997.
- [3] ISO 10137:2007(E): *Bases for Design of Structures – Serviceability of Buildings and Walkways Against Vibrations*. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization, 2007.
- [4] SETRA, *Technical Guide – Footbridges: Assessment of Vibrational Behavior of Footbridges Under Pedestrian Loading*. Bagneux, France: Service d'Etudes Techniques des Routes et Autoroutes, 2006.
- [5] J. H. Neilson et al., "Experimental and Numerical Dynamic Properties of Two Timber Footbridges Including Seasonal Effects," *International Journal of Civil Engineering*, vol. 19, pp. 1239–1250, Oct. 2021, doi: 10.1007/s40999-021-00624-w.
- [6] D. J. Ewins, *Modal Testing: Theory, Practice and Application*. Somerset, UK: Research Studies Press, 2006.
- [7] N. M. M. Maia and J. M. M. Silva, *Theoretical and Experimental Modal Analysis*. Somerset, UK: Research Studies Press, 1997.
- [8] E. Shahabpoor et al., "Effect of group walking traffic on dynamic properties of pedestrian structures," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 387, pp. 207–225, Jan. 2017, doi: 10.1016/j.jsv.2016.10.017.
- [9] J. de Sebastián et al., "Evaluación de la predicción de aceleraciones debidas al tránsito peatonal en una pasarela en servicio," *Informes de la Construcción*, vol. 65, no. 531, pp. 335–348, Sept. 2013, doi: 10.3989/ic.12.025.
- [10] S. H. Strogatz et al., "Crowd synchrony on the Millennium Bridge," *Nature*, vol. 438, no. 7064, pp. 43–44, Nov. 2005, doi: 10.1038/438043a.