

Identificación dinámica de puentes de Sevilla mediante sus respuestas a cargas de servicio

P. Galvín, M. Solís, A. Romero, J. Domínguez

Departamento de Mecánica de Medios Continuos, Teoría de Estructuras e Ingeniería del Terreno. Universidad de Sevilla
{pedrogalvin,msolis,aro,jose}@us.es

Resumen

En los últimos años se han construido en Sevilla varios puentes de diseño singular, suficientemente rígidos para soportar sus cargas de servicio, pero con un compartimiento dinámico que, en algunas ocasiones, alerta a los peatones que los cruzan. Un claro ejemplo es el Puente del Alamillo, de estética bien conocida, en el que el tráfico rodado induce vibraciones caracterizadas por las frecuencias naturales de la estructura comprendidas entre 0.4 y 3.32 Hz. El método más fiable para obtener los parámetros modales de las estructuras que controlan su manera de vibrar son los ensayos in situ. Los resultados de estos ensayos permiten, además de verificar que el nivel de las vibraciones inducidas en la estructura está por debajo del que permite la normativa, validar los modelos numéricos desarrollados para el diseño y cálculo de la estructura, y también realizar un seguimiento de la integridad de la estructura mediante la comparación de las propiedades dinámicas obtenidas antes de la puesta en servicio de la estructura con las obtenidas en estados sucesivos. En este trabajo se presentan los resultados de los ensayos dinámicos realizados en tres puentes localizados en Sevilla: el Puente de la Barqueta, la Pasarela de La Cartuja y el Puente El Guardián del Castillo. El análisis de los resultados experimentales ha permitido estudiar el efecto de la temperatura ambiente en las frecuencias naturales de las estructuras obtenidas mediante los datos medidos y la identificación de estados de daño.

INTRODUCCIÓN

En horas punta se suelen formar embotellamientos sobre alguno de los puentes que cruzan la dársena del río Guadalquivir en Sevilla. Dada la esbeltez de estos puentes, su comportamiento dinámico está controlado por sus bajas frecuencias naturales, que provocan que las personas que están situadas sobre ellos sientan las vibraciones inducidas en la estructura. Un claro ejemplo es el Puente del Alamillo, de estética bien conocida, en el que sus frecuencias naturales están comprendidas entre 0.4 y 3.32 Hz [1].



Fig. 1. El Puente del Alamillo.

El método más fiable para obtener los parámetros modales de las estructuras que controlan su manera de vibrar son los ensayos in situ [2][3][4][5]. Los resultados de estos ensayos permiten, además de verificar que el nivel de las vibraciones inducidas en la estructura está por debajo del que permite la normativa, validar los modelos

numéricos desarrollados para el diseño y cálculo de la estructura, y también realizar un seguimiento de la integridad de la estructura mediante la comparación de las propiedades dinámicas obtenidas antes de la puesta en servicio de la estructura con las que se puedan obtener en estados futuros.

En este trabajo se presentan los resultados de los ensayos dinámicos realizados en tres puentes localizados en Sevilla: el Puente de la Barqueta, la Pasarela de La Cartuja y el Puente El Guardián del Castillo. El análisis de los resultados experimentales ha permitido estudiar el efecto de la temperatura ambiente en las frecuencias naturales de las estructuras obtenidas mediante los datos medidos y la aplicación de técnicas de detección de daño.

ENSAYOS

Las propiedades dinámicas de las estructuras analizadas han sido obtenidas a partir del análisis de las vibraciones inducidas por sus cargas de servicio. Esta técnica, conocida como análisis modal operacional, es más simple que el análisis modal clásico para estructuras civiles ya que no se requiere de excitadores y, además, la estructura puede continuar en servicio durante el ensayo.

El programa experimental que se presenta en este trabajo se inició en el año 2005 y se concluyó en el año 2010. Durante el mes de julio de 2005 se realizó el primer ensayo en el puente de la Barqueta y durante el mes de octubre de 2006 el segundo ensayo en la misma estructura. Días antes de su apertura, en marzo del 2007, se estudió el puente El Guardián del Castillo. Finalmente, durante los meses de mayo de los años 2009 y 2010 se llevaron a cabo los ensayos en la Pasarela de La Cartuja.



Fig. 2. Acelerómetros usados durante los ensayos.

Las respuestas de las estructuras fueron medidas con dos tipos de acelerómetros: acelerómetros piezoeléctricos Endevco de sensibilidad nominal igual a 1000 mV/g y con una frecuencia límite de aproximadamente 0.1 Hz, y acelerómetros triaxiales Kinemetrics de sensibilidad nominal igual a 1250 mV/g. Los acelerómetros Kinemetrics se sincronizan vía GPS no siendo necesario el uso de cables.

La posición en la que se colocaron los acelerómetros en las tres estructuras fue determinada mediante el análisis previo de modelos numéricos basados en el método de los elementos finitos. Debido a que sólo estaban disponibles nueve acelerómetros Endevco y dos acelerómetros Kinemetrics, las respuestas de la estructura en los diferentes puntos se tomaron mediante diferentes configuraciones, dejando en todas ellas un acelerómetro de referencia situado en la misma posición. De este modo, las medias registradas en las diferentes configuraciones se pueden relacionar. La posición del acelerómetro de referencia fue cuidadosamente elegida de tal forma que no coincidiera con ningún nodo de los modos de vibración estudiados en los puentes.

La respuesta de las estructuras a sus cargas de servicio fue medida durante veinte minutos en cada punto usando como frecuencias de muestreo 64 Hz en el puente de La Barqueta y en el puente El Guardián del Castillo, y 200 Hz en la pasarela de La Cartuja. Posteriormente, las medidas fueron decimadas para llevar a cabo la identificación de los parámetros dinámicos de la estructura en el rango de frecuencias de 0 a 10 Hz.

Los parámetros modales de las estructuras han sido obtenidos empleando cuatro técnicas complementarias [4]: Peak-Picking (PP), Averaged Normalized Power Spectral Densities (ANPSDs), Enhanced Frequency Domain Decomposition (EFDD) y Stochastic Subspace Identification (SSI). Para ello se han usado los programas MATLAB [6] y ARTEMIS [7].

CASOS ESTUDIADOS

El Puente de la Barqueta

El Puente de la Barqueta fue construido en 1992 con motivo de la Exposición Universal y se ha convertido en una obra indispensable del paisaje urbano de Sevilla. El puente de acero de tipo bowstring presenta una estructura innovadora diseñada por J. J. Arenas y M. Pantaleón [8], que incluye un arco central elevado que nace y muere en los vértices de sendos pórticos triangulares. Con una luz de 168 m sobre el río Guadalquivir, el puente se apoya en cuatro soportes verticales distanciados 30 m en sentido transversal. Las secciones transversales tanto del arco como de los pies inclinados incluían surcos profundos que, además de calidad estética, producen suficiente inercia local para evitar cualquier tipo de rigidizador longitudinal interno.



Fig. 3. El Puente de la Barqueta.

La sección del tablero se muestra en la Figura 4. La sección tiene 16 m de ancho y 2.4 m de canto. La anchura total del puente es igual a 21 m con dos aceras en voladizo. La sección transversal del tablero incluye dos almas verticales espaciadas 1 m entre las cuales se anclan los cables. Los cables tienen una inclinación variable. En los extremos, el tablero lo soportan dos vigas transversales de canto variable que se apoyan en los cuatro soportes verticales.

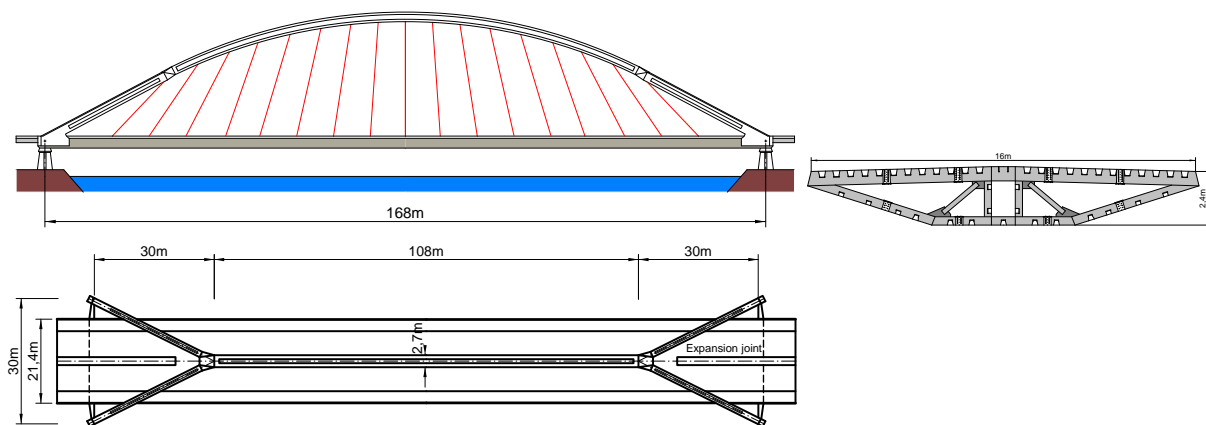


Fig. 4. Alzado, planta y sección transversal de El Puente de la Barqueta.

De acuerdo con los resultados obtenidos en los ensayos dinámicos realizados, el comportamiento dinámico del puente está gobernado por modos de vibración de flexión y de torsión en el rango de frecuencias comprendido entre 0 y 6 Hz (Figura 5). En la Tabla 1 se muestran las frecuencias y los coeficientes de amortiguamiento correspondientes a los diez modos de vibración que se han identificado experimentalmente en dicho rango de frecuencias. También se muestran las frecuencias naturales obtenidas con un modelo numérico que ha sido desarrollado empleando elementos finitos.

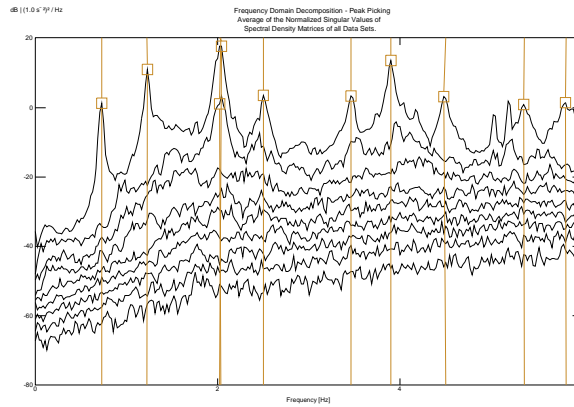


Fig. 5. Descomposición en valores singulares de las matices de densidad espectral. Puente de La Barqueta.

Tabla 1. Frecuencias naturales y coeficientes de amortiguamiento obtenidas experimentalmente y numéricamente.

$f_{exp} [Hz]$	$\xi_{exp} [\%]$	$f_{num} [Hz]$
0.727	1.032	0.751
1.232	0.7081	1.110
2.030	0.4778	2.002
2.032	1.211	2.144
2.490	0.5717	2.066
3.456	0.8789	3.234
3.895	0.3202	3.817
4.485	0.4263	5.054
5.348	1.065	6.871
5.833	1.137	5.509

Los modos de vibración obtenidos experimentalmente y numéricamente se muestran en las Figuras 6 y 7, en las que se puede apreciar un buen grado de acuerdo como indica el MAC [9] presentado en la Figura 8.

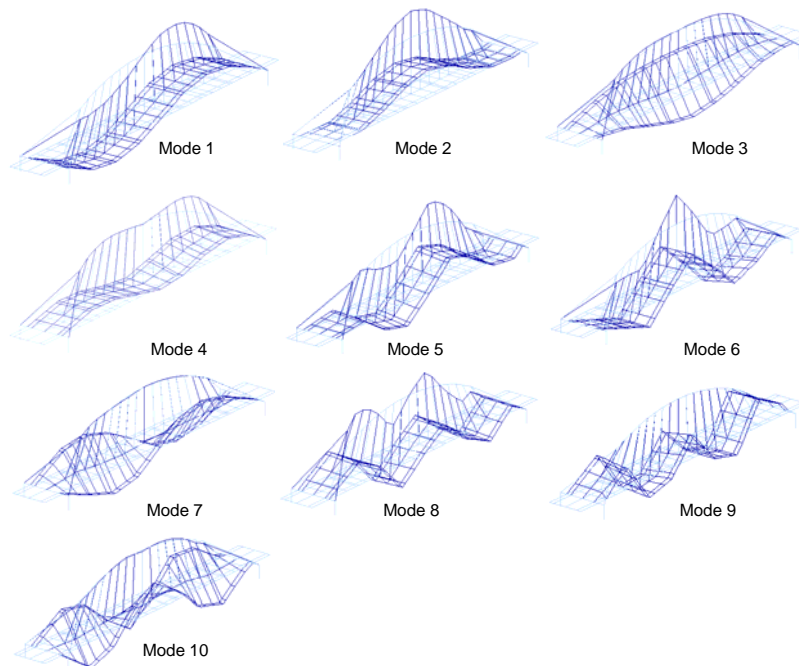


Fig. 6. Modos de vibración identificados experimentalmente. Puente de La Barqueta.

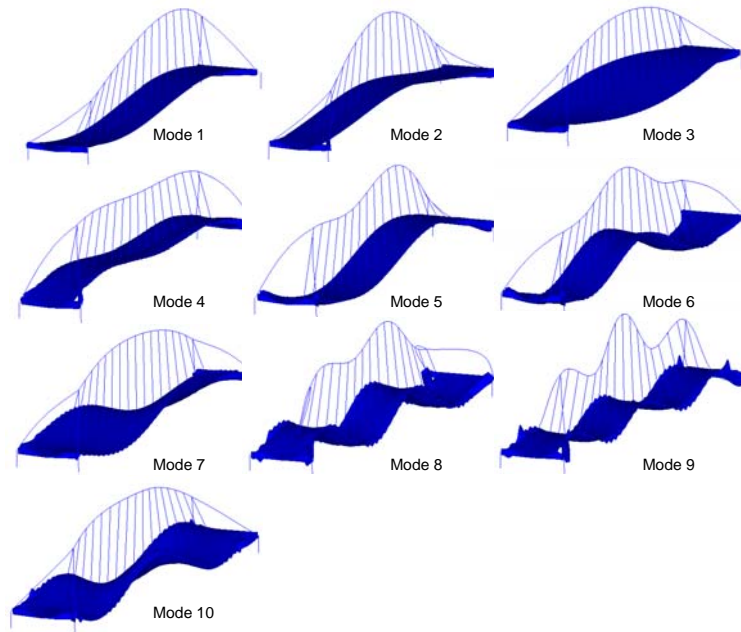


Fig. 7. Modos de vibración calculados numéricamente.

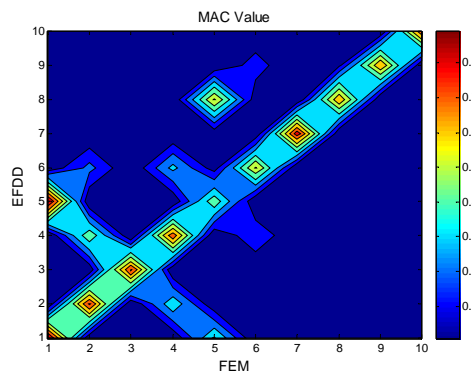


Fig. 8. Matriz MAC calculada usando los valores numéricos y experimentales

Los parámetros modales de la estructura se volvieron a identificar con un lapso de tiempo de un año y se compararon con el fin de detectar posibles daños en la estructura usando el Índice de daño [10] basado en la energía de deformación modal. La Figura 9 muestra los resultados obtenidos, siendo el índice de daño igual a 1 en prácticamente todos los puntos lo cual quiere decir que los resultados obtenidos en ambos ensayos son prácticamente idénticos y, por lo tanto, la estructura no ha modificado su integridad durante el tiempo transcurrido entre ambos ensayos.

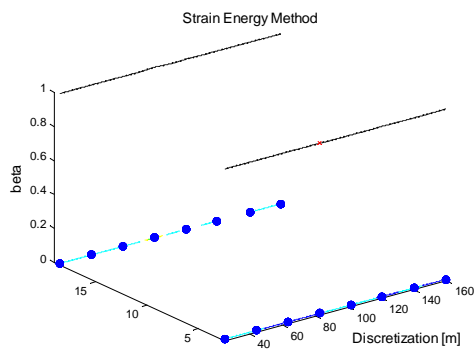


Fig. 9. Índice de daño.

La Pasarela de La Cartuja

La pasarela de la Cartuja fue diseñada por Fritz Leonhardt y Luis Viñuelas. La estructura se compone de un tablero de acero de gran esbeltez y morfología aparentemente simple, diseñada para no restar protagonismo a su entorno. Su situación próxima al Monasterio de Santa María de las Cuevas, condicionó que se buscara un diseño funcional y no ostentoso, que no restara protagonismo en el entorno al monasterio. El tablero tiene una longitud de 238 m y una anchura de 11 m, presentando dos apoyos intermedios asimétricos.



Fig. 10. La Pasarela de La Cartuja.

El puente se diferencia del resto de puentes construidos en Sevilla sobre la dársena del Guadalquivir para la Exposición Universal de 1992, ya que los otros presentan diseños atirantados. Desde el año 2004, se encuentra abierto al tráfico rodado

Durante 4 días del mes de mayo de 2009 y 4 días del mes mayo de 2010 se registraron las vibraciones inducidas en el puente por sus cargas de servicio usando acelerómetros triaxiales sincronizados vía GPS. La temperatura máxima medida durante las medidas fue de 39.3°C y la mínima 23.7°C. El comportamiento dinámico de la estructura viene dado por modos de vibración de flexión verticales y transversales y modos de vibración de torsión en el rango de frecuencias comprendido entre 0 y 8 Hz (Figura 11). En la Tabla 2 se muestran las frecuencias y los coeficientes de amortiguamiento correspondientes a los ocho modos de vibración que se han identificado experimentalmente en dicho rango de frecuencias.

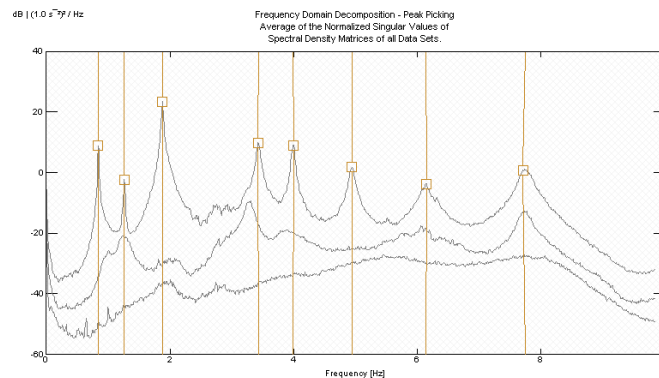


Fig. 11. Descomposición en valores singulares de las matrices de densidad espectral. Pasarela de La Cartuja.

Tabla 2. Frecuencias naturales y coeficientes de amortiguamiento obtenidas experimentalmente.

f_{exp} [Hz]	ξ_{exp} [%]
0.842	0.781
1.261	0.787
1.878	0.560
3.431	0.795
3.993	0.499
4.949	0.755
6.142	1.839
7.748	1.135

Dado que estudios previos [11] han demostrado que las frecuencias naturales de las estructuras se ven afectadas por la temperatura ambiente, en este estudio se ha evaluado este efecto para el primer modo de flexión vertical, para el primer modo de flexión transversal y para el primer modo de torsión. La Figura 12 muestra los resultados obtenidos. Se aprecia como para todos los casos estudiados se produce una disminución de las frecuencias naturales a medida que aumenta la temperatura ambiente de la estructura.

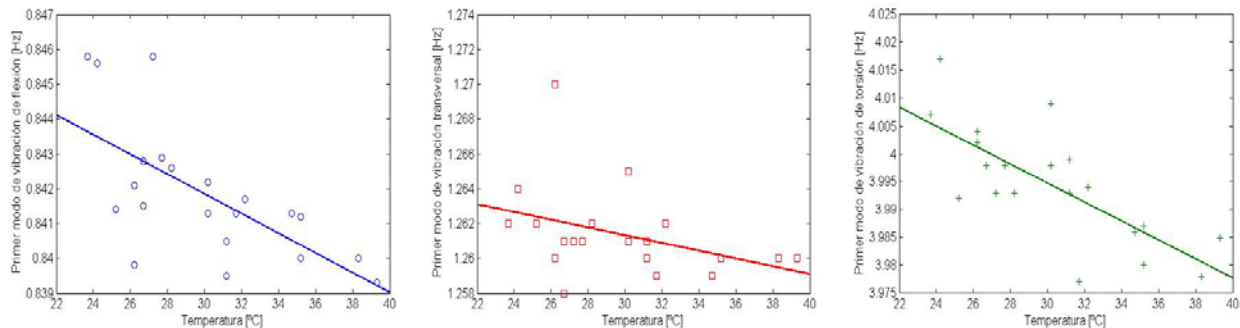


Fig. 12. Variación de las frecuencias naturales con la temperatura ambiente.

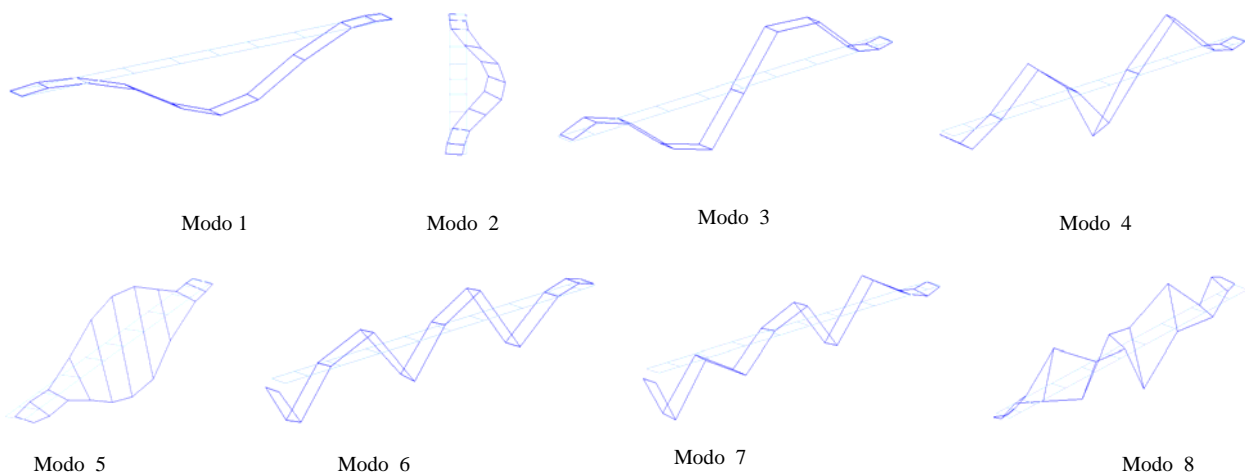


Fig. 13. Modos de vibración identificados experimentalmente. Pasarela de La Cartuja.

Si se comparan los parámetros modales de los tres puentes que cruzan el cauce del Guadalquivir, el puente del Alamillo [1], el puente de la Barqueta y la pasarela de La Cartuja (véase la Figura 13), se aprecia como el Puente del Alamillo presenta la primera frecuencia natural, correspondiente a un modo de vibración de flexión, más baja, mientras que la pasarela de La Cartuja presenta la más alta. Lo mismo se puede decir de la frecuencia natural correspondiente al primer modo de vibración de torsión, igual a 1.155 Hz en el puente del Alamillo. Puede concluirse que, a pesar de que la pasarela de La Cartuja es el puente de diseño más sencillo, presenta una mayor rigidez dinámica y los niveles de vibración observados ante cargas de servicio han sido menores.

El Guardián del Castillo

El tercer caso estudiado corresponde al puente que cruza el río Guadaira a la altura de la localidad sevillana de Alcalá diseñado por José Luis Manzanares. Con el diseño se pretendió convertir al puente en un elemento más del parque sobre el que se construyó, lo cual se intentó realizar con este diseño singular.

El puente está constituido por una estructura de 123 m de longitud con dos arcos circulares de 43 m de luz y dos medios arcos hasta los estribos de 18,5 m cada uno. La solución estructural la conforma una viga central de hormigón armado con calzadas voladas a ambos lados. La sección transversal sobre el puente está formada por dos calzadas de 7 m, dos Acerados de 2,5 m y una mediana central de 3 m de ancho. La estructura emula un dragón que sale del terreno, cruzando el río Guadaira, a los pies de “El Castillo de Alcalá”.



Fig. 14. El Guardián del Castillo.

En marzo de 2007 se llevaron a cabo diversos ensayos dinámicos en la estructura para caracterizarla dinámicamente y para medir el nivel de vibraciones inducido en ella como consecuencia del paso de vehículos circulando a diferentes velocidades (Figura 14).

En esta estructura, dada la rigidez que aportan los arcos y la viga central, el comportamiento dinámico de la estructura está gobernado por sus modos de vibración de torsión, comprendidos entre 1.65 Hz y 5.15 Hz (Tabla 3 y Figura 15).

Tabla 3. Frecuencias naturales y coeficientes de amortiguamiento obtenidas experimentalmente. El Guardián del Castillo.

$f_{exp} [Hz]$	$\xi_{exp} [\%]$
1.650	2.73
2.782	1.97
3.957	1.27
5.153	1.05

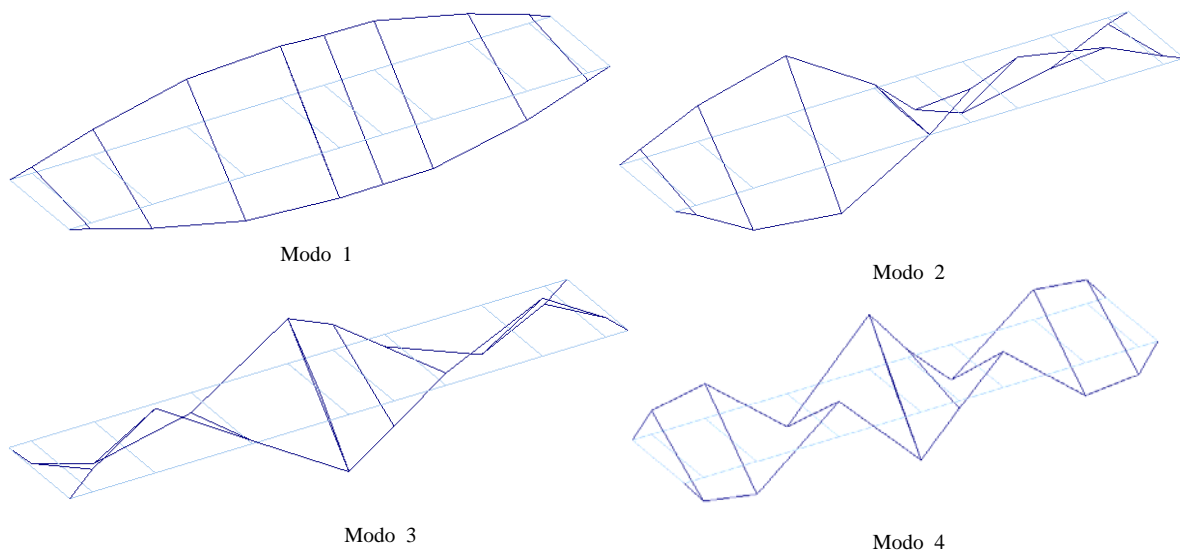


Fig. 15. Modos de vibración identificados experimentalmente. El Guardián del Castillo.

CONCLUSIONES

En este trabajo se han presentado los resultados de los ensayos dinámicos realizados en tres puentes localizados en Sevilla: el Puente de la Barqueta, la Pasarela de La Cartuja y el Puente El Guardián del Castillo. El análisis de los resultados experimentales ha permitido evaluar su comportamiento dinámico, estableciendo un estado de referencia para posibles aplicaciones futuras de técnicas de detección de daño, tal y como ya se ha presentado en el caso del puente de la Barqueta. Además, se ha analizado la correlación existente entre las frecuencias naturales y la temperatura ambiente en el caso de la Pasarela de la Cartuja.

REFERENCIAS

- [1] J.R. Casas, *Full-scale dynamic testing of the Alamillo cable-stayed bridge in Seville (Spain)*, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* 24 (1995), 35-51.
- [2] R. Brincker, L. Zhang, P. Andersen, *Modal Identification of Output-Only Systems using Frequency Domain Decomposition*, *Smart Materials and Structures* 10 (2001) 441-445.
- [3] C. Gentile, F. Martínez y Cabrera, *Dynamic performance of twin curved cable-stayed bridges*, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* 33 (2003), 15-34.
- [4] P. Galvín, J. Domínguez, *Dynamic analysis of a cable-stayed deck steel arch bridge*. *Journal of Constructional Steel Research* 63 (2007) 1024–1035.
- [5] K. Liu, E. Reynders, G. De Roeck, G. Lombaert, *Experimental and numerical analysis of a composite bridge for high-speed trains*, *Journal of Sound and Vibration* 320 (2009) 201-220.
- [6] <http://www.matlab.com>.
- [7] <http://www.svibs.com>.
- [8] J.J. Arenas, M.J. Pantaleón, *Puente de Barqueta, Sevilla, España*, *Structural Engineering International* 2 (1992), 251-252.
http://www.arenasing.com/espanol/menu_1/proyectos/ficha.php?id=55&dato=info&mas=completo
- [9] R. J. Allemang, D. L. Brown, *Correlation coefficient for modal vector analysis*, *Proceedings of the 1st International Modal Analysis Conference*, EE.UU. (1983) 110-116.
- [10] N. Stubbs, J. T. Kim, C. J. Farrar, *Field Verification of a Non-destructive Damage Localization and Severity Estimation Algorithm*, *Proceedings of the 13th International Modal Analysis Conference*, EE.UU. (1995).
- [11] B. Peeters, J. Maeck, G. De Roeck, *Dynamic monitoring of the Z24-bridge: separating temperature effects from damage*, *Proceedings of the European COST F3 Conference on System Identification and Structural Health Monitoring*, Spain (2000) 377-386.