

Evaluación numérica y experimental de la respuesta dinámica de un faro fabricado mediante polímeros reforzados con fibra (PRF)

Numerical and experimental evaluation of the dynamic response of a fibre reinforced polymers (FRP) lighthouse

José David Jiménez Vicaria^{a,*}, Pablo Sánchez Sierra^b, Eva Martínez Barrigüete^c y Carlo Paulotto^d

^a Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos, Centro Tecnológico ACCIONA Construcción S.A., Investigador en Grupo Diseño Estructural, Madrid, España

^b Ingeniero Industrial, Centro Tecnológico ACCIONA Construcción S.A., Investigador en Grupo Diseño Estructural, Madrid, España

^c Licenciada en Química (esp. Química Orgánica), Centro Tecnológico ACCIONA Construcción S.A., Jefe Grupo Polímeros y Composites, Madrid, España

^d Ingeniero Civil y Doctor en Ingeniería Estructural, Centro Tecnológico ACCIONA Construcción S.A., Jefe Grupo Diseño Estructural, Madrid, España

Recibido el 27 de marzo de 2017; aceptado el 18 de abril de 2017

Disponible en Internet el 31 de mayo de 2017

Resumen

ACCIONA Infraestructuras ha construido un faro de 32 m de altura fabricado en Madrid íntegramente con polímeros reforzados con fibra (PRF) e instalado en solo 2 h en la ampliación norte del puerto de Valencia en febrero de 2015. Una vez instalado el faro, las vibraciones de la estructura inducidas por el viento se registraron por medio de una serie de acelerómetros colocados estratégicamente para determinar su respuesta dinámica. Previamente, se llevó a cabo una simulación numérica de la estructura para determinar sus frecuencias naturales y formas modales, comparándolas con las obtenidas de manera experimental.

© 2017 Asociación Científico-Técnica del Hormigón Estructural (ACHE). Publicado por Elsevier España, S.L.U. Todos los derechos reservados.

Palabras clave: Polímeros reforzados con fibra; Faro; Vibraciones libres; Respuesta dinámica; Simulación numérica

Abstract

A 32-metre high lighthouse, made entirely with fibre reinforced polymers (FRPs), was manufactured by ACCIONA Infrastructure in Madrid, and was installed in only two hours in the northern extension of the Port of Valencia in February 2015. Once the FRP lighthouse was installed, its wind induced vibrations were recorded by a set of accelerometers, strategically placed to determine its dynamic response. Previously, a numerical simulation of the structure was performed to assess its natural frequencies and mode shapes, and compare them with those determined experimentally.

© 2017 Asociación Científico-Técnica del Hormigón Estructural (ACHE). Published by Elsevier España, S.L.U. All rights reserved.

Keywords: Fibre reinforced polymers; Lighthouse; Free vibrations; Dynamic response; Numerical simulation

1. Introducción

En ambientes agresivos, como en las zonas costeras y portuarias, una alternativa atractiva y prometedora a los materiales

tradicionales (como el acero o el hormigón armado con acero) para minimizar los costes de mantenimiento de las estructuras civiles es el uso de materiales duraderos y ligeros, como los polímeros reforzados con fibra (PRF). ACCIONA Construcción es pionera en el uso de estos materiales en obras de ingeniería civil, como puentes [1], pasarelas [2,3], estructuras de hormigón armado con barras de PRF [4], etc. Debido al particular comportamiento mecánico de las estructuras de PRF y al creciente

* Autor para correspondencia.

Correo electrónico: josedavid.jimenez.vicaria@acciona.com
(J.D. Jiménez Vicaria).

interés en esta tecnología, en los últimos años se han llevado a cabo numerosos proyectos de investigación tanto desde el punto de vista experimental como numérico, la mayoría de ellos centrados en la respuesta estática de las estructuras de PRF, pero muy pocos en el campo de la respuesta dinámica [5,6]. En el caso del faro de PRF presentado en este trabajo, la rigidez de los elementos estructurales tiene una influencia importante en la respuesta dinámica de la estructura, por lo que puede calibrarse un modelo numérico adecuado a partir de los resultados experimentales de la respuesta a vibraciones libres de la estructura.

2. Descripción de la estructura

El nuevo faro de PRF (fig. 1) es una estructura de 32 m de altura formada por 5 forjados que apoyan sobre 8 columnas de PRF de carbono cuyos ejes centrales, en el forjado inferior (F1), atraviesan los vértices de un octágono inscrito en una circunferencia de 4,15 m de diámetro, y en el forjado superior (F5), los vértices de un octágono inscrito en una circunferencia de 3,75 m de diámetro. Estas columnas de 32 m de altura son tubos circulares fabricados por pultrusión con resina epoxi (fig. 2a), tienen un diámetro exterior de 250 mm y un espesor de pared del tubo de 20 mm. Los 5 forjados, fabricados por infusión de resina viniléster (fig. 2b), son paneles tipo sándwich de 200 mm de espesor, con pieles de PRF de vidrio de 10 mm de espesor y un núcleo de poliuretano con una densidad de 70 kg/m^3 . Los forjados se ubican distanciados en altura cada 6 m, y cada uno tiene una geometría octagonal diferente dependiendo de su posición en la estructura.

En el centro de la estructura, desde la base hasta el forjado superior, se dispone una escalera de caracol. Los peldaños de la escalera están fabricados mediante el proceso de moldeo por inyección de resina (RTM) y tienen una estructura sándwich con pieles de PRF de vidrio y núcleo de poliuretano (fig. 2c). Cada peldaño tiene una altura de 200 mm y está formado por un anillo con un diámetro interno de 500 mm unido a una plataforma trapezoidal de 900 mm de longitud, con un ancho de huella variable. Los anillos de los peldaños, alineados verticalmente a lo largo del eje central del faro, forman un hueco cilíndrico que está relleno de hormigón armado, proporcionando así un núcleo de rigidización a la estructura.

Para aumentar la rigidez lateral de la estructura, las columnas de PRF de carbono están conectadas entre sí por 4 anillos octagonales colocados de manera equidistante entre cada 2 forjados consecutivos. Cada uno de estos anillos está formado por 8 tubos de PRF de vidrio dispuestos perimetralmente a la estructura. Los tubos de PRF de vidrio, fabricados por pultrusión, tienen un diámetro exterior de 190 mm y un espesor de pared del tubo de 20 mm. Las conexiones entre las columnas y los tubos horizontales de PRF de vidrio se realizan mediante diafragmas de PRF con forma romboidal y que tienen un espesor de 42 mm (fig. 2d).

La base del faro es un cajón de hormigón armado de 4 m de altura con forma prismática octagonal. Los extremos inferiores de las columnas del faro están empotrados en la losa inferior del cajón, de 1,10 m de espesor. La losa de hormigón armado de 0,35 m que forma el techo del cajón presenta unas perforaciones para permitir el paso de las 8 columnas de PRF de carbono y del núcleo central de hormigón armado. Entre las columnas de PRF y esta losa de hormigón, se disponen unos collarines de neopreno para restringir el desplazamiento horizontal de las columnas en este nivel.

3. Simulación numérica

3.1. Descripción del modelo numérico

Se ha realizado un modelo tridimensional de toda la estructura utilizando el programa de cálculo mediante elementos finitos SAP-2000 v16.1.1. Las columnas de PRF de carbono, los tubos de PRF de vidrio y la columna central de hormigón armado se modelan con elementos tipo barra, mientras que los forjados y los diafragmas romboidales se modelan con elementos tipo placa. Cada columna está fijada en su base, mientras que su contacto con la losa superior del cajón de hormigón se modela mediante un conjunto de muelles elásticos lineales conectados radialmente a los elementos tipo barra de las columnas y que tienen una rigidez equivalente a la del collarín de neopreno. Cada elemento estructural se caracteriza por los parámetros elásticos (E_x , E_y , G_{xy} y ν_{xy}) y el peso específico tomados de la tabla 1. Aunque las columnas de PRF de carbono y los tubos de PRF de vidrio están fabricados con materiales ortótropos, el módulo elástico transversal E_y no se utiliza en el modelo, ya que estas

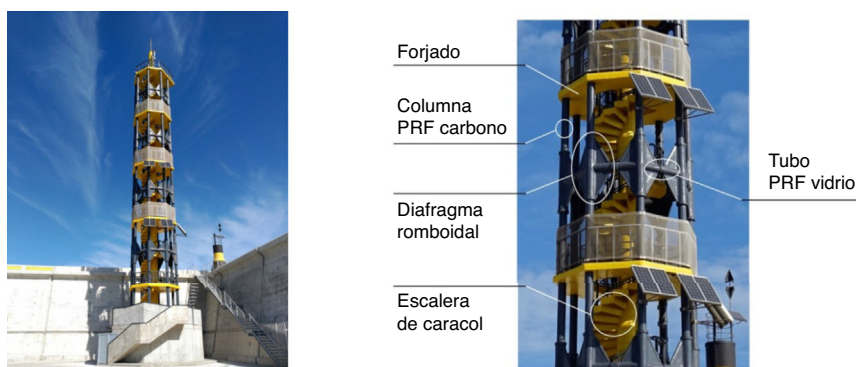


Figura 1. Estructura del faro de PRF.



Figura 2. Elementos del faro durante su fabricación: (a) columnas; (b) forjados; (c) peldaños y descansillos; (d) diafragmas romboidales.

piezas se modelan con elementos tipo barra. Los peldaños de la escalera de caracol no se han modelado, ya que se supone que no contribuyen a la rigidez de la estructura. Sin embargo, sus masas se han considerado añadiéndolas a los elementos tipo barra que modelan el núcleo central de hormigón por debajo del forjado F5.

3.2. Análisis modal

Se realiza un análisis modal del modelo numérico de la estructura para obtener los modos de vibración y las frecuencias correspondientes, con el objetivo de compararlos con los

medidos experimentalmente. Las frecuencias correspondientes a los primeros 10 modos de vibración en el modelo numérico se presentan en la [tabla 2](#).

4. Análisis experimental

4.1. Ensayos estáticos de los elementos estructurales

Las propiedades mecánicas de resistencia y rigidez de cada elemento se determinan experimentalmente mediante pruebas estáticas.

Tabla 1
Parámetros de los elementos estructurales

Elemento	E_x (N/mm ²)	E_y (N/mm ²)	G_{xy} ^a (N/mm ²)	ν_{xy}	ρ (kN/m ³)
Columnas PRF carbono	90.740	—	35.668	0,272	16,69
Tubos PRF vidrio	49.860	—	19.584	0,273	20,27
Forjados	2.493	2.493	308	0,084	2,50
Diafragmas romboidales	25.840	22.430	6.003	0,383	18,33
Núcleo hormigón bajo F5	33.620	—	14.008	0,200	29,50
Núcleo hormigón sobre F5	28.577	—	11.907	0,200	25,00

^a Para los elementos finitos tipo barra, solo se permite una formulación para material isótropo, por lo que el valor del módulo de cortante G se calcula a partir de la expresión $G = E/(2 + 2\nu)$.

Tabla 2
Primeras 10 frecuencias de la estructura obtenidas del modelo numérico

Frecuencias	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5	f_6	f_7	f_8	f_9	f_{10}
Hz	1,193	1,241	2,907	3,628	3,679	6,350	6,378	8,853	9,375	9,619

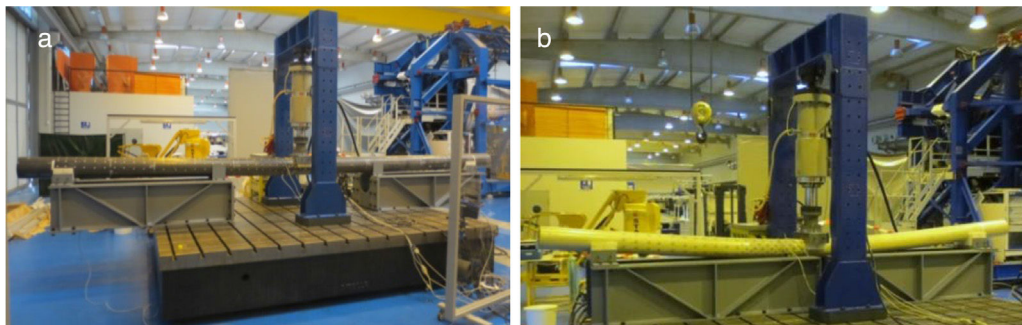


Figura 3. Ensayos estáticos hasta rotura de elementos estructurales: (a) columnas de PRF de carbono; (b) tubos de PRF de vidrio.

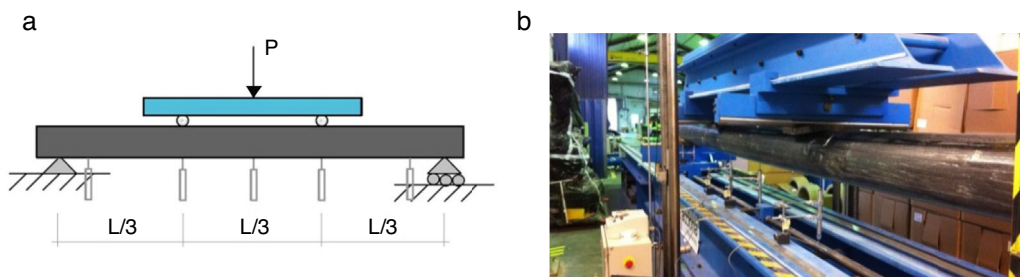


Figura 4. Ensayos estáticos para determinar la rigidez del tubo de PRF carbono: (a) configuración del ensayo; (b) ensayo a flexión del tubo.

4.1.1. Ensayos de flexión hasta rotura

Para determinar la resistencia a flexión de los tubos de PRF de carbono y de PRF de vidrio que forman la estructura del faro, se realiza un ensayo de flexión a 3 puntos hasta rotura con una muestra de cada uno de los tubos, con 6 y 4 m de distancia entre apoyos en cada caso, respectivamente. En la figura 3 se muestran estos 2 ensayos hasta rotura.

El momento resistente del tubo de PRF de vidrio es de $M_{R,FV} = 208,3 \text{ kN m}$, mientras que el momento resistente del tubo de PRF de carbono es de $M_{FC} = 385,5 \text{ kN m}$. Estos valores experimentales de resistencia son muy superiores a los valores de diseño utilizados para la estructura, ya que el parámetro condicionante en el diseño del faro es la rigidez de sus elementos estructurales.

4.1.2. Ensayos de flexión a diferentes distancias entre apoyos

Para una correcta evaluación numérica del comportamiento dinámico del faro de PRF, es necesario conocer de manera precisa el parámetro EI (rigidez a flexión) de los tubos de PRF de carbono a utilizar en el modelo numérico. Sin embargo, la determinación experimental de EI mediante ensayos a flexión de elementos de PRF suele verse afectada por la presencia de una considerable deformación por cortante, debido en este caso al reducido valor del módulo de cortante G de los PRF, obteniendo en dicho caso una rigidez a flexión aparente inferior a la real. Para reducir o eliminar el efecto del cortante en la determinación

de la rigidez a flexión de los tubos de PRF de carbono, se han realizado ensayos a 4 puntos (con puntos de aplicación de la carga a $L/3$) con diferentes distancias L entre apoyos (fig. 4). Este método se basa en la teoría de flexión de vigas de Timoshenko [7] y en la aproximación utilizada por Bank [8] para vigas de PRF. Para esta configuración de ensayo a flexión, el desplazamiento

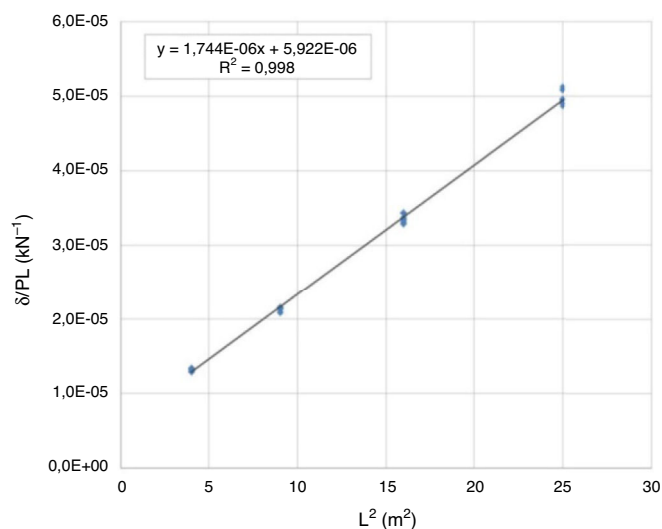


Figura 5. Recta utilizada para determinar la rigidez a flexión del tubo a partir de los resultados de los ensayos a 4 puntos.

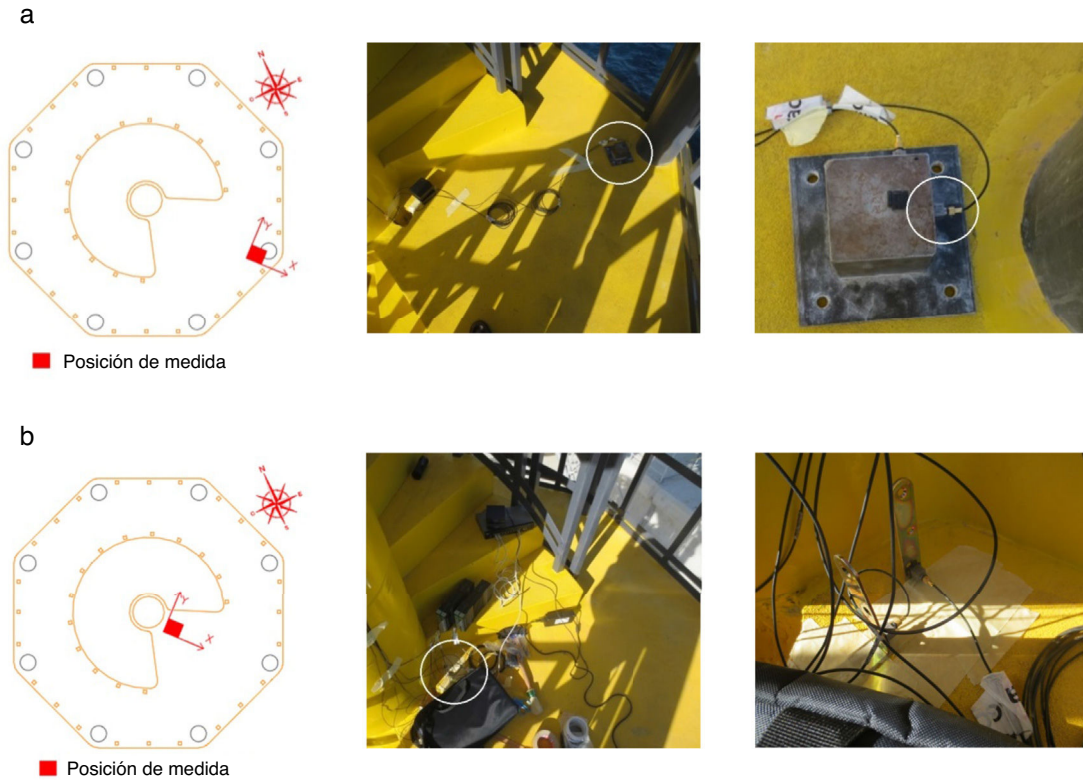


Figura 6. Esquema de instalación de los acelerómetros: (a) forjados F3, F4 y F5; (b) forjado F2.

vertical del tubo bajo los puntos de aplicación de la carga, según la ecuación de Timoshenko, viene dada por la expresión:

$$\delta = \frac{5PL^3}{324EI} + \frac{PL}{6GA^*} \quad (1)$$

Dividiendo los términos de la ecuación (1) por PL , se tiene que:

$$\frac{\delta}{PL} = \frac{C_1}{EI} \times L^2 + \frac{C_2}{GA^*} \quad (2)$$

La ecuación (2) sería la ecuación de una recta con δ/PL la variable dependiente y L^2 la variable independiente. Conocidos los valores de carga-desplazamiento P/δ y el vano L de cada ensayo, se puede dibujar dicha recta, cuya pendiente y ordenada en el origen son inversamente proporcionales a la rigidez a flexión EI y la rigidez a cortante GA^* , respectivamente. Para esta configuración de ensayo, los parámetros considerados han sido $C_1 = 5/324$ y $C_2 = 1/6$. Para el área de cortante A^* se ha adoptado un valor del 50% del área de la sección transversal del tubo.

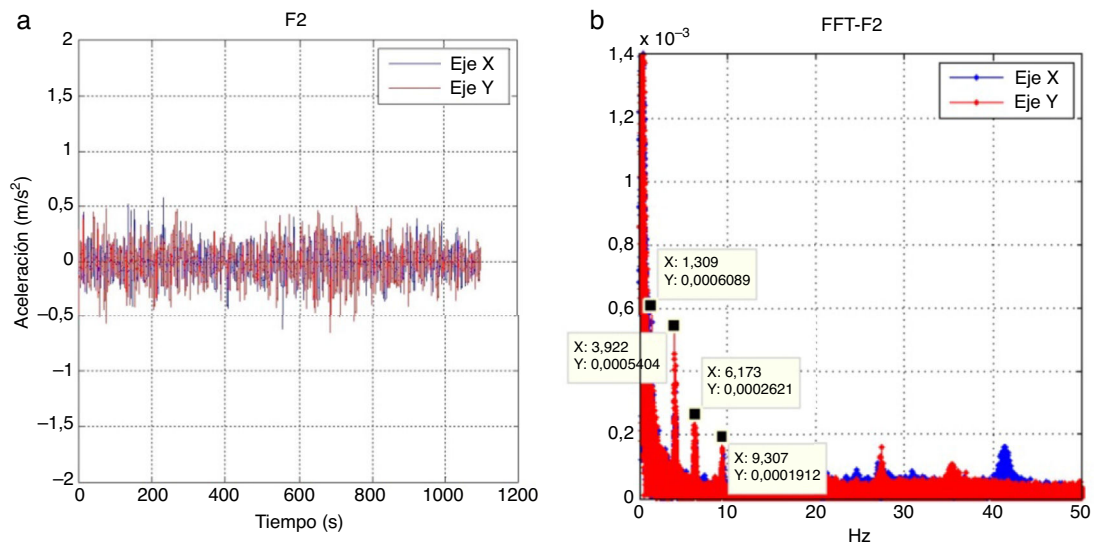


Figura 7. (a) Aceleraciones registradas; (b) transformada rápida de Fourier (FFT) y frecuencias representativas.

Tabla 3
Primeras 10 frecuencias de la estructura obtenidas experimentalmente

Frecuencias	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5	f_6	f_7	f_8	f_9	f_{10}
Hz	1,309	2,979	3,922	6,173	9,307	13,92	20,79	24,41	27,38	35,47

Se han realizado 4 ensayos para cada una de las 4 diferentes distancias L entre apoyos que se han analizado: 2, 3, 4 y 5 m, resultando en un total de 16 ensayos a flexión. Representando para cada hipótesis de carga el valor de δ/PL frente a L^2 en el punto de máxima carga durante el ensayo (que se corresponde con un valor de carga muy inferior al de rotura del tubo, es decir, el material se encuentra en régimen elástico), se obtiene una recta (fig. 5), a partir de cuya pendiente ($a = 1,744 \cdot 10^{-6}$) se calcula el módulo de Young E , obteniendo el valor de $E = 91.904$ MPa, solo un 1% superior al valor teórico (tabla 1) utilizado en el modelo numérico. Por su parte, a partir de la ordenada en el origen ($b = 5,922 \cdot 10^{-6}$) se obtiene el valor experimental del módulo de cortante $G = 3.895$ MPa, un orden de magnitud inferior al valor utilizado en el modelo numérico (tabla 1).

4.2. Prueba dinámica de la estructura

En mayo de 2015, 3 meses después de la instalación del faro, se registran las vibraciones inducidas por el viento en la estructura mediante un conjunto de acelerómetros estratégicamente colocados para determinar su respuesta dinámica. Se utilizan 8 acelerómetros unidireccionales *DeltaTron Tipo 4508*, conectados a su correspondiente adquisidor de datos *Brüel & Kjær LAN-XI 51,2 kHz - Tipo 3050*. En cada forjado, excepto en el más bajo (F1), se colocan 2 acelerómetros unidireccionales, uno orientado a lo largo del eje X y el otro orientado a lo largo del eje Y (fig. 6).

En los forjados F3, F4 y F5, cada par de acelerómetros se fija a un bloque de acero de 5 kg situado sobre la superficie superior del forjado cerca de una de las columnas de PRF de

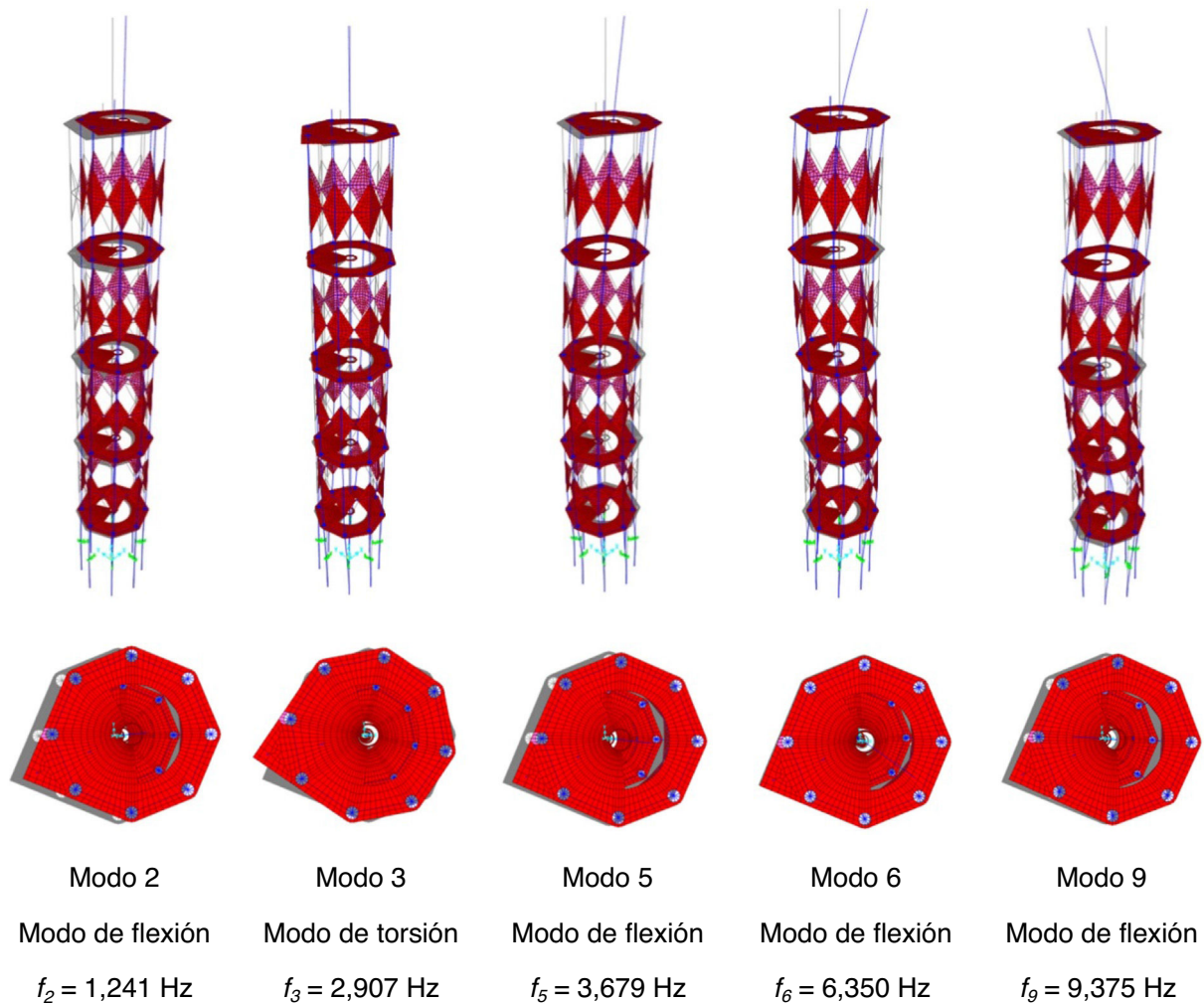


Figura 8. Modos de vibración y frecuencias naturales en el modelo numérico de la estructura correspondientes con los 5 primeros modos obtenidos experimentalmente.

Tabla 4

Comparación entre frecuencias de la estructura obtenidas experimentalmente y numéricamente

Frecuencias	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5	f_6	f_7	f_8	f_9	f_{10}
Experimental	1,309	2,979	3,922	6,173	9,307	13,92	20,79	24,41	27,38	35,47
Numérico	1,193	1,241	2,907	3,628	3,679	6,350	6,378	8,853	9,375	9,619

carbono, tal y como se muestra en la [figura 6a](#). En el forjado F2 los acelerómetros están fijados a unos pequeños perfiles en L unidos a la superficie superior del forjado cerca de la columna central de la estructura ([fig. 6b](#)).

Se realizan diferentes registros de datos con el objetivo de comparar los resultados de cada medición para detectar posibles diferencias aleatorias entre ellos. Las frecuencias de vibración experimentales se obtienen mediante la transformada rápida de Fourier (FFT), que convierte las aceleraciones registradas en el dominio del tiempo al dominio de la frecuencia. Las mediciones se realizan con una frecuencia de muestreo de 100 Hz. La elección de esta frecuencia para el procesamiento de datos se establece después de analizar varias mediciones con una frecuencia inicial mayor y tras observar que no hay frecuencias excitadas en la estructura superiores a 50 Hz. A modo de ejemplo, la [figura 7](#) muestra las aceleraciones registradas y la FFT correspondiente para el par de puntos de medición (eje X y eje Y) en el forjado F2 durante uno de estos registros de datos. Después de procesar todos los registros de datos, se observa que las 10 primeras frecuencias mostradas en la [tabla 3](#) son similares en la mayoría de las mediciones, por lo que se puede suponer que los 10 primeros modos de vibración de la estructura corresponden a estas frecuencias excitadas.

A partir de estos resultados, las primeras 5 formas modales experimentales se pueden comparar con las obtenidas numéricamente. El primer modo de vibración registrado experimentalmente, con una frecuencia de $f_{1,exp} = 1,309$ Hz, corresponde al segundo modo de vibración en el análisis numérico, un modo de flexión con una frecuencia de $f_{2,num} = 1,241$ Hz. El segundo modo de vibración registrado experimentalmente, con una frecuencia de $f_{2,exp} = 2,979$ Hz, corresponde al tercer modo de vibración en el análisis numérico, un modo de torsión con una frecuencia de $f_{3,num} = 2,907$ Hz. Los modos de vibración tercero, cuarto y quinto registrados experimentalmente, con una frecuencia de $f_{3,exp} = 3,922$ Hz, $f_{4,exp} = 6,173$ Hz y $f_{5,exp} = 9,307$ Hz, respectivamente, corresponden al quinto, sexto y noveno modos de vibración en el análisis numérico, correspondientes a modos de flexión con frecuencias de $f_{5,num} = 3,679$ Hz, $f_{6,num} = 6,350$ Hz y $f_{9,num} = 9,375$ Hz, respectivamente. En la [figura 8](#) se presentan los modos de vibración en el modelo numérico con frecuencias similares a las de los 5 primeros modos obtenidos experimentalmente, y se comparan en la [tabla 4](#).

5. Conclusiones

El análisis experimental realizado basado en las medidas de aceleración ha demostrado ser una buena técnica para obtener

información útil sobre el comportamiento estructural del faro a partir de la vibración libre de la estructura.

El análisis de las aceleraciones inducidas por el viento mediante el uso de la FFT permite identificar los 5 primeros modos de vibración de la estructura, siendo las correspondientes frecuencias experimentales de 1,309; 2,979; 3,922; 6,173 y 9,307 Hz. El análisis de las frecuencias se completa con un modelo de elementos finitos, en el que se obtienen frecuencias que solo difieren entre un 1 y un 7% de las obtenidas experimentalmente. Este modelo numérico permite identificar las formas modales experimentales, donde el primer modo corresponde al primer modo de flexión y el segundo al primer modo de torsión, siendo los modos siguientes el segundo, el tercero y el cuarto modo de flexión, respectivamente.

En este caso, en el que los elementos resistentes a flexión (columnas de PRF de carbono) son elementos esbeltos (ratio de esbeltez $L/d = 24$), se puede considerar que para un análisis estructural global resulta suficientemente preciso el uso de leyes constitutivas elásticas lineales de materiales isótropos para los elementos finitos tipo barra (columnas de PRF de carbono, tubos de PRF de vidrio y columna de núcleo central), ya que se comprueba que el valor del módulo de cortante G de los tubos de PRF de carbono apenas afecta al comportamiento dinámico del faro.

El uso de los PRF en la construcción de estructuras singulares en ambientes agresivos es una técnica prometedora que ha sido validada a través de numerosos proyectos en todo el mundo, como por ejemplo el faro presentado en este trabajo. Esta estructura ha cumplido con los requisitos de calidad y estructurales impuestos a este tipo de proyectos, no solo por su comportamiento estático, sino también por su respuesta dinámica.

Agradecimientos

Los autores desean expresar su agradecimiento a los técnicos de laboratorio e ingenieros del Centro Tecnológico de ACCIONA Construcción en Madrid involucrados en este proyecto, por su participación en el diseño, fabricación y ensayo de la estructura.

Cabe destacar que esta estructura ha sido galardonada con un premio en los *JEC World 2016 Innovation Awards* en París en la categoría de Infraestructuras con el título «All-composite lighthouse marine navigation aid».

Bibliografía

- [1] J.D. Jiménez Vicaria, D. Fernández Díaz, C. Paulotto, A. Bansal, An application of the FRP girder bridge technology to cope with logistic difficulties, en: 37th IABSE Symposium: Engineering for Progress, Nature and People, Madrid, 2014.

- [2] M. Areiza Hurtado, S. Primi, C. Paulotto, R. Llago Acero, I. Calvo Herrera, Diseño y fabricación de una pasarela de fibra de carbono sobre el río Manzanares, en: V Congreso ACHE, Barcelona, 2011.
- [3] C. Paulotto, M.A. Hernandez, S. Primi, E. Navarro, Mechanical tests on carbon-fiber-epoxy cables for bridge applications, en: Proceedings of the 7 th International Conference on FRP Composites in Civil Engineering, CICE 2014, Vancouver, Canada, 2014.
- [4] J.D. Jimenez Vicaria, D. Fernandez Diaz, E. Manzano Arroyo, C. Paulotto, Analysis of the technical viability of GFRP reinforced precast concrete piles, en: 16th European Conference on Composite Materials, ECCM 2014, Sevilla, 2014.
- [5] G. Boscato, S. Russo, Free vibration of pultruded FRP elements: Mechanical characterization, analysis and applications, *J. Compos. Constr.* 13 (2009) 565–574.
- [6] R.F. Gibson, Modal vibration response measurements for characterization of composite materials and structures, *Compos. Sci. Technol.* 60 (2000) 2769–2780.
- [7] S. Timoshenko, *Strength of Materials*, Litton Educational Publishing, Inc, New York, 1955, pp. 170–175.
- [8] L.C. Bank, Flexural and shear moduli of full-section fiber reinforced plastic (FRP) pultruded beams, *J. Test. Eval.* 17 (1989) 40–45.