

Ensayos seccionales en túnel de viento para el estudio del comportamiento aeroelástico de puentes

Sectional tests in wind tunnel for the study of bridge aeroelastic behavior

José Ángel JURADO ALBARRACÍN

Doctor ingeniero industrial
Universidade da Coruña
Profesor titular
jjurado@udc.es

Santiago HERNÁNDEZ IBÁÑEZ

Doctor ingeniero de caminos canales y puertos
Universidade da Coruña
Catedrático
hernandez@udc.es

Félix NIETO MOURONTE

Doctor ingeniero de caminos canales y puertos
Universidade da Coruña
Profesor titular
fnieto@udc.es

Arturo Norberto FONTÁN PÉREZ

Doctor ingeniero de caminos canales y puertos
Universidade da coruña
Profesor contratado doctor
afontan@udc.es

RESUMEN

Los fenómenos aeroelásticos causados por el viento son determinantes en proyectos de grandes puentes y estructuras esbeltas. El flameo es una condición crítica que puede evaluarse computacionalmente, identificando previamente en un túnel de viento 18 funciones que caracterizan las fuerzas en el tablero. Por otro lado, la excitación por torbellinos provoca frecuentemente en muchos casos de estructuras flexibles de bajo amortiguamiento vibraciones inaceptables. Este artículo explica ambos fenómenos y describe con ejemplos los ensayos de modelos seccionales que se llevan a cabo en el túnel de viento de la Escuela de Caminos de la Universidade da Coruña.

ABSTRACT

Wind aeroelastic phenomena are of major concern for design of long span bridges and slender structures. Flutter is a critical condition that can be computationally evaluated with a previous experimental identification of 18 functions for the deck in a wind tunnel. On the other hand, vortex shedding excitation frequently induces unacceptable vibrations on flexible structures with low damping. This paper explains both phenomena and describes using examples the tests of sectional models carried out in the wind tunnel of the School of Civil engineering at the Universidade da Coruña.

PALABRAS CLAVE: puentes, túnel de viento, aeroelasticidad, flameo, excitación por torbellinos.

KEYWORDS: bridges, wind tunnel, aeroelasticity, flutter, vortex induce vibration.

1. Ensayos seccionales en el túnel de viento

Para evitar la realización de ensayos del puente completo, que requiere un túnel de viento de grandes dimensiones y que por tanto son complejos y costosos, resulta conveniente la utilización de métodos híbridos para el análisis de fenómenos aeroelásticos. Estos métodos son computacionales, pero utilizan parámetros y funciones obtenidas experimentalmente en un túnel de viento aerodinámico. Es suficiente con una cámara de ensayos de alrededor de un metro

cuadrado de sección para obtener los coeficientes aerodinámicos y las funciones de flameo de la sección del tablero del puente. Los coeficientes aerodinámicos se obtienen con el modelo seccional fijo, anclado a unas células de carga que miden las fuerzas de arrastre D y sustentación L , así como el momento aerodinámico M que ejerce el flujo de aire. Un cuestión importante es la dependencia de estas fuerzas con el número de Reynolds ($Re = \rho UB/\mu$; ρ : densidad del aire, μ : viscosidad del aire; U : velocidad del viento, B : anchura del tablero). Sus valores cambian con la velocidad de viento, pero a partir de un cierto valor de velocidad los coeficientes son bastante estables. Por tanto es esencial escoger adecuadamente la velocidad de realización de los ensayos.

Con respecto a las funciones de flameo y de acuerdo con la formulación de Simiu and Scanlan que se explica detalladamente en Jurado et al. [1], las fuerzas aeroelásticas se linealizan mediante funciones de los movimientos y velocidades para los grados de libertad vertical w , lateral v y la rotación alrededor del eje del tablero ϕ_x (Figura 1). Las relaciones pueden escribirse como

$$\mathbf{f}_a = \begin{Bmatrix} D_a \\ L_a \\ M_a \end{Bmatrix} = \frac{1}{2} \rho U^2 K B \cdot \begin{pmatrix} P_1^* & -P_5^* & -BP_2^* \\ -H_5^* & H_1^* & BH_2^* \\ -BA_5^* & BA_1^* & B^2 A_2^* \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{v} \\ \dot{w} \\ \dot{\phi}_x \end{Bmatrix} + \frac{1}{2} \rho U^2 K^2 \cdot \begin{pmatrix} P_4^* & -P_6^* & -BP_3^* \\ -H_6^* & H_4^* & BH_3^* \\ -BA_6^* & BA_4^* & B^2 A_3^* \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} v \\ w \\ \phi_x \end{Bmatrix} \quad (1)$$

$$\mathbf{f}_a = \mathbf{C}_a \dot{\mathbf{u}} + \mathbf{K}_a \mathbf{u}$$

donde $K = B\omega/U$ es la frecuencia reducida con ω la frecuencia de la respuesta, y $P_i^*(K)$, $H_i^*(K)$, $A_i^*(K)$ $i = 1...6$ son las funciones de flameo que son funciones de K . \mathbf{K}_a y \mathbf{C}_a son la denominadas matrices aeroelásticas.

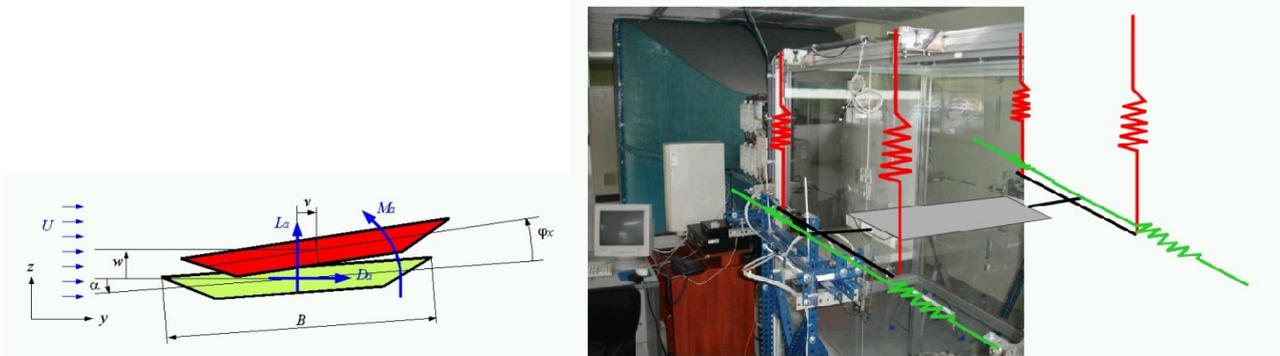


Figura 1. Fuerzas y movimientos aeroelásticos y modelo seccional soportado por muelles.

Durante el ensayo el modelo está elásticamente sustentado por muelles, cuatro u ocho verticales y cuatro horizontales. La frecuencia de vibración del sistema depende de la rigidez de los muelles, que junto con la velocidad de viento en el túnel determina la frecuencia reducida K . Cambiando la velocidad de viento en el túnel y la rigidez de los muelles, se puede obtener un amplio rango de frecuencias reducidas a las que ensayar. La ecuación de equilibrio dinámico para el modelo seccional es

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}} + (\mathbf{C} - \mathbf{C}_a)\dot{\mathbf{u}} + (\mathbf{K} - \mathbf{K}_a)\mathbf{u} = \mathbf{0} \quad (2)$$

Multiplicando por \mathbf{M}^{-1} y denotando $\mathbf{C}_m = \mathbf{M}^{-1}(\mathbf{C} - \mathbf{C}_a)$ y $\mathbf{K}_m = \mathbf{M}^{-1}(\mathbf{K} - \mathbf{K}_a)$ se llega a

$$\ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{C}_m \dot{\mathbf{u}} + \mathbf{K}_m \mathbf{u} = \mathbf{0} \quad (3)$$

Para obtener las funciones de flameo, todos los términos de las matrices \mathbf{C}_m y \mathbf{K}_m son evaluados a partir de las historias temporales de los movimientos del modelo en vibración libre. Para ello previamente es necesario evaluar la frecuencia ω y el amortiguamiento ξ de cada grado de libertad. Denotando K_{ij}^U y C_{ij}^U a los términos obtenidos con una velocidad de viento U y K_{ij}^0 y C_{ij}^0 a los términos correspondientes a velocidad nula $U = 0$, que corresponden con matrices aeroelásticas nulas ($\mathbf{K}_a = \mathbf{C}_a = \mathbf{0}$), se puede calcular cualquier punto de la función de flameo mediante una resta (ver Jurado et al. [2]). Por ejemplo, A_2^* se obtiene como

$$A_2^*(K) = -\frac{2I}{\rho B^4 \omega} (C_{22}^0 - C_{22}^U) \quad (4)$$

Donde I es el momento polar de inercia del tablero que aparece en la matriz de masas. Existen varios métodos de identificación que sirven para determinar los términos de las matrices \mathbf{C}_m y \mathbf{K}_m . En estos estudios [2] se han empleado el método modificado de Ibrahim en el dominio del tiempo (MITD), propuesto por Sarkar et al. [3] y el método de mínimos cuadrados iterativos propuesto por Chowdhury y Sarkar [4]. Como ejemplo, en las figuras 2 se muestra el modelo seccional del tablero de hormigón del puente atirantado de Talavera de la Reina, mientras que en la figura 3 se muestran las funciones de flameo con respecto a la velocidad reducida $U^* = 2\pi/K$.

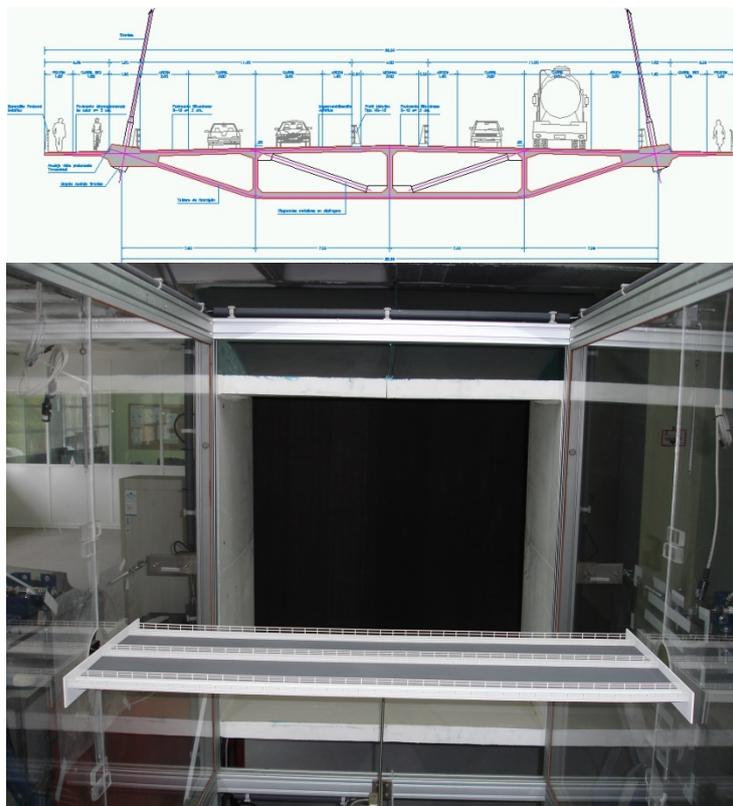


Figura 2. Sección del puente de Talavera de La Reina y modelo seccional en el túnel de viento.

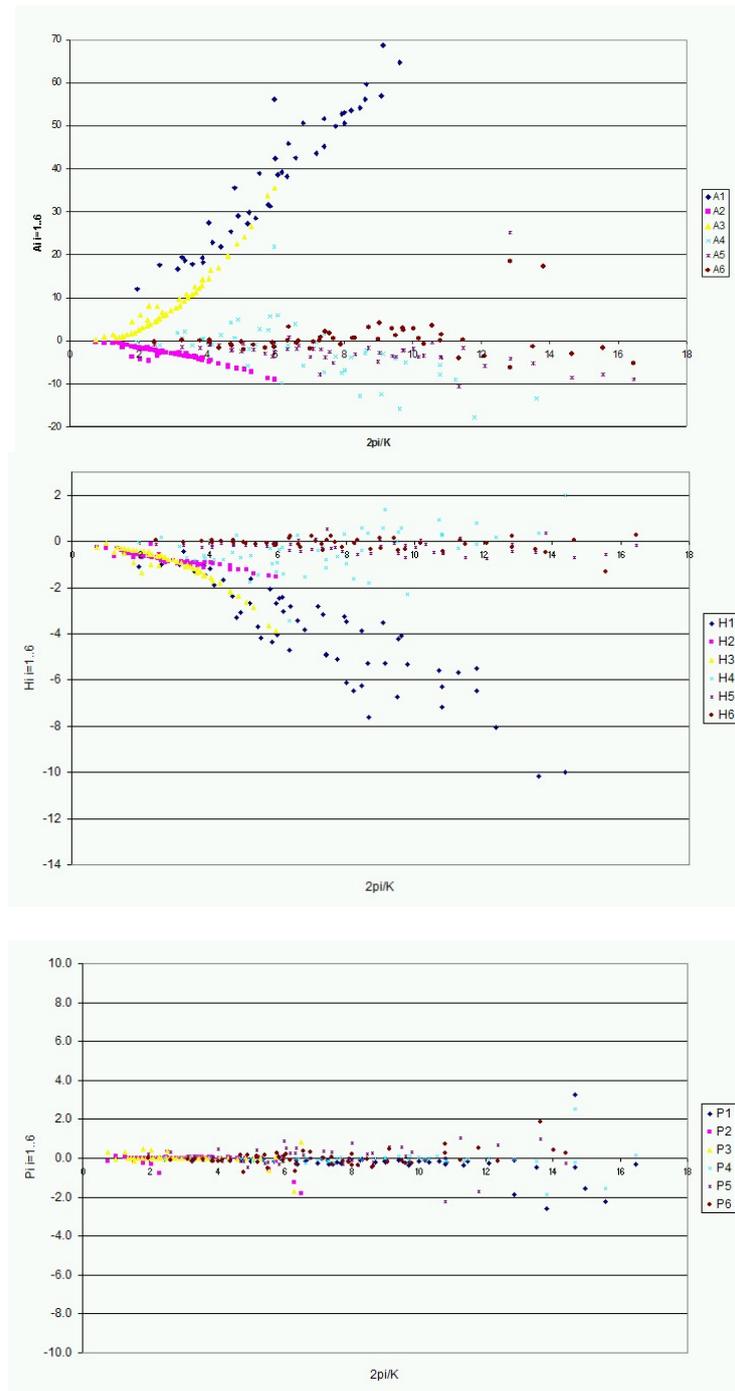


Figura 3. Funciones de flameo de la sección del puente de Talavera de La Reina.

2. Análisis del flameo

El software para llevar a cabo la parte computacional del método que permite analizar la inestabilidad por flameo en puentes ha sido desarrollado por el grupo de mecánica de estructuras de la Universidade da Coruña y se denomina FLAS. Como se explica en Jurado [5] el análisis es multimodal y resuelve un problema asociado de valores propios. La formulación parte de la ecuación de equilibrio dinámico (2) aplicada al puente completo, por tanto las matrices y vectores deben ensamblarse para la estructura completa del puente. Mediante análisis modal se aproximan los movimientos de la estructura como combinación de los más importantes modos de vibración. Se construye la matriz modal Φ con los modos en columnas y los movimientos se pueden

expresar como $\mathbf{u} = \Phi \mathbf{q}$. Cada elemento del vector \mathbf{q} representa la participación de cada modo en el vector de movimientos \mathbf{u} .

$$\mathbf{I}\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}_R \dot{\mathbf{q}} + \mathbf{K}_R \mathbf{q} = \mathbf{0} \quad (5)$$

Donde $\mathbf{C}_R = \Phi^T (\mathbf{C} - \mathbf{C}_a) \Phi$, $\mathbf{K}_R = \Phi^T (\mathbf{K} - \mathbf{K}_a) \Phi$ y $\Phi^T \mathbf{M} \Phi = \mathbf{I}$, usando los modos normalizados a la masa. Sabiendo que la solución tiene la forma de una oscilación armónica atenuada $\mathbf{q}(t) = \mathbf{w} e^{\mu t}$, se llega a

$$\left(\mu^2 \mathbf{I} \mathbf{w} + \mu \mathbf{C}_R \mathbf{w} + \mathbf{K}_R \mathbf{w} \right) e^{\mu t} = \mathbf{0} \quad (6)$$

Que se transforma en un problema de valores propios añadiendo la identidad $-\mu \mathbf{I} \mathbf{w} + \mu \mathbf{I} \mathbf{w} = \mathbf{0}$:

$$\left[\mu \begin{pmatrix} \mathbf{I} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{I} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mu \mathbf{w} \\ \mathbf{w} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \mathbf{C}_R & \mathbf{K}_R \\ -\mathbf{I} & \mathbf{0} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mu \mathbf{w} \\ \mathbf{w} \end{pmatrix} \right] e^{\mu t} = \mathbf{0} \quad (7)$$

o en forma compacta

$$(\mathbf{A} - \mu \mathbf{I}) \mathbf{w}_\mu e^{\mu t} = \mathbf{0} \quad (8)$$

Su solución son valores propios μ complejos conjugados. Su parte imaginaria es la frecuencia de la respuesta, mientras que la parte real está asociada al amortiguamiento. La condición de flameo corresponde a la más baja velocidad de viento con la que se obtiene un amortiguamiento nulo, es decir una parte real nula (ver figura 5). Sin embargo el problema (8) es no lineal y debe resolverse iterando. Ello se debe a que la matriz \mathbf{A} depende del resultado de frecuencia, puesto que contiene a matrices aeroelásticas que son funciones de K .

Es imprescindible trabajar con un modelo tridimensional de elementos finitos del puente para obtener los modos y frecuencias naturales de vibración. El análisis multimodal del flameo será preciso si se emplean un número suficiente de modos de vibración. Muchos autores trabajan únicamente con el primer modo vertical y el primero de torsión, en lo que se llama "clasical flutter". Este análisis simplificado puede dar buenos resultados en puentes cortos, pero cuando se trata de puentes de gran longitud de vano, como el proyecto de Messina de 3300 m de vano, se ha constatado que los resultados solo son correctos si se consideran múltiples modos de vibración, incluyendo modos laterales y varios verticales y de torsión. En la figura 4 aparece un modelo estructural del puente de Messina realizado con el programa ABAQUS, en la tabla 1 las frecuencias naturales de los modos utilizados y en la figura 5 la evolución con la velocidad de la parte real e imaginaria de los valores propios que determina la velocidad crítica en la que aparece la inestabilidad y la frecuencia a la que aparece. En el ejemplo de análisis mostrado la velocidad es 102.72 m/s y la frecuencia reducida de respuesta 0.245964.

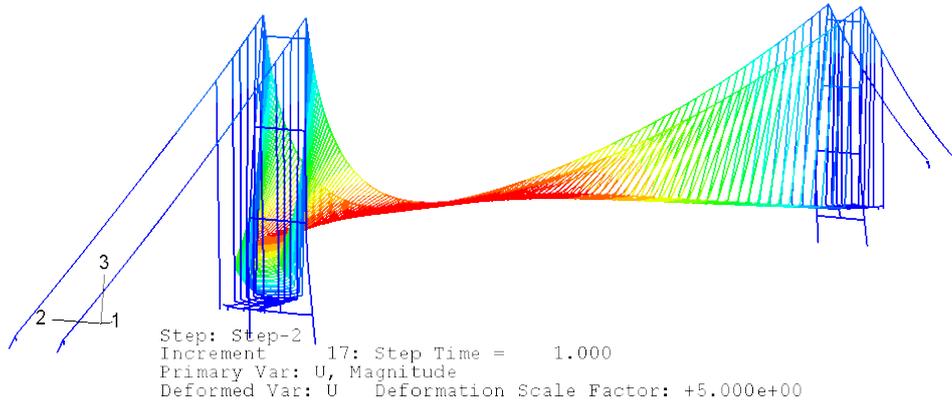


Figura 4. Modelo estructural del puente de Messina.

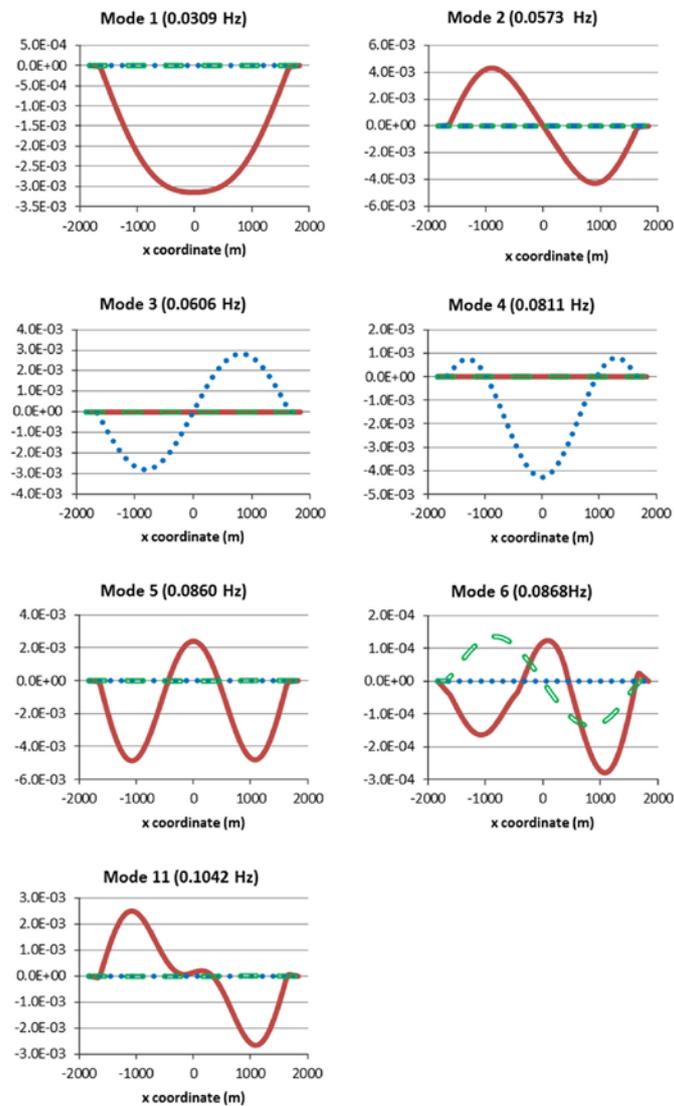


Figura 5. Modos y frecuencias naturales.

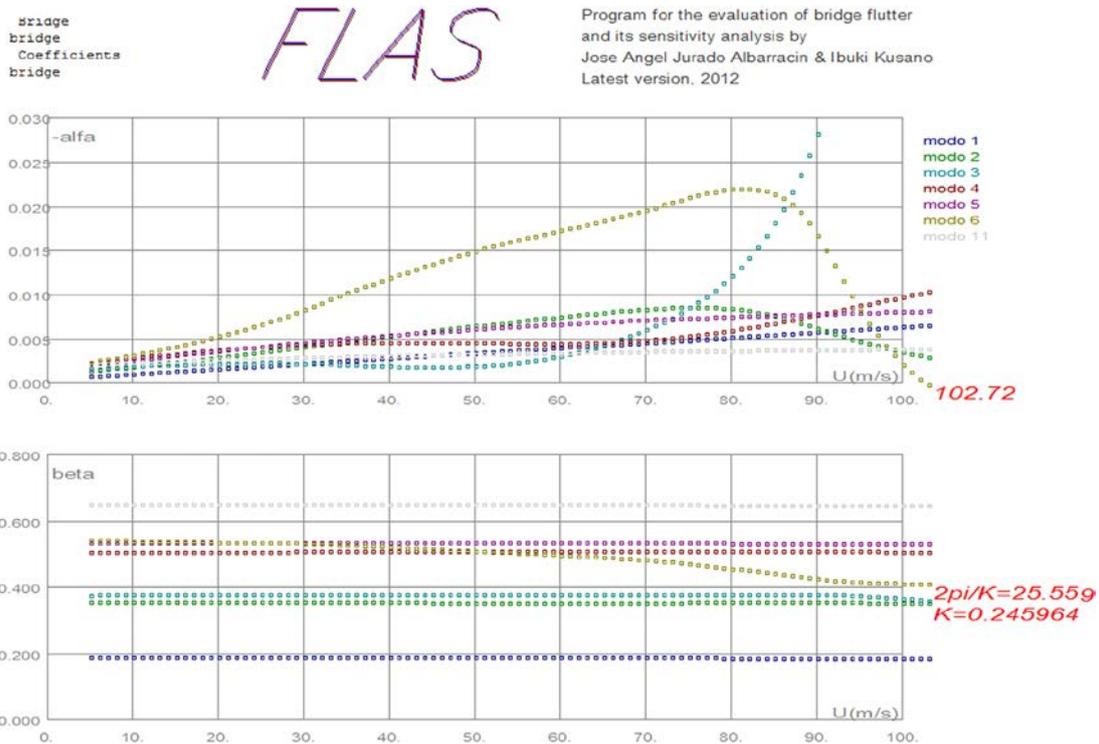


Figura 5. Evolución de las partes real e imaginaria de los valores propios con la velocidad de viento.

3. Experimentos de excitación por vórtices

Históricamente han sido mucho los puentes que han sufrido la excitación por vórtices. Un destacable caso fueron las claras oscilaciones verticales que experimentó el puente de Tacoma los días previos a su colapso causado por la inestabilidad de flameo. Otro puente veterano como el Golden Gate también tenía oscilaciones verticales apreciables y tuvo que ser reforzado rigidizando su tablero con la celosía de barras inferior. También puentes más modernos han padecido este problema, como el puente atirantado de Kessock en Escocia o el puente colgante del Great Belt en Dinamarca. Pero no solo puentes soportados por cables, sino también puentes de vigas continuas como el puente sobre el río Niterói en Brasil incluso en España los arcos de Alconétar sufieron grandes oscilaciones por este fenómeno durante su construcción.



Figura 6. De izquierda a derecha: Kessock Brige, Great Belt Bridge, Niterói Bridge, Alconétar Bridge

En el túnel de viento aerodinámico de la ETS de Ingenieros de Caminos de la Universidade da Coruña se han llevado a cabo varios estudios sobre la excitación por vórtices en puentes y estructuras esbeltas como pasarelas peatonales, véase Jurado [6]. Para la determinación del número de Strouhal $St=nD/U$ de la sección del tablero que relaciona de forma adimensional la velocidad de viento U con la frecuencia de los vórtices en la estela n considerando el canto de la

sección D , se ensaya un modelo seccional (figura 7) soportado por un sistema rígido de barras que se conectan a células de carga (figura 6). La transformada de Fourier de las fuerzas verticales alternantes permite identificar el pico correspondiente a las fuerzas que producen los vórtices y el pico correspondiente a la frecuencia natural del sistema. En la situación de Lock-in ambos picos coinciden y se producen las amplitudes de fuerza más elevadas. La pendiente de la línea que relaciona las frecuencias a las que se producen los picos de la fuerza de los vórtices con los valores U/D determina el número de Strouhal.

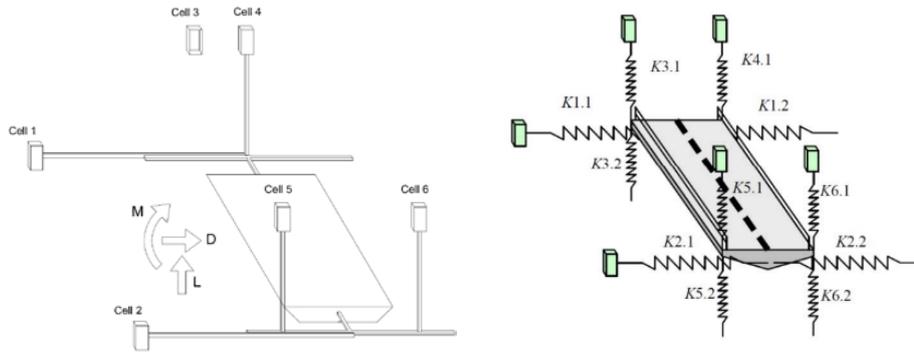


Figura 6. Soporte rígido y flexible para el estudio del modelo seccional.

Cuando el modelo se soporta con muelles se busca simular en el túnel la frecuencia reducida que corresponde con la primera frecuencia natural vertical de la estructura en el rango de velocidades de viento en el que se quiere investigar la excitación. Si existe excitación por vórtices se observará un incremento repentino de la amplitud de los movimientos verticales. Este fenómeno deberá ser corregido mediante actuaciones que mejoren la aerodinámica de la sección, o bien con la colocación de amortiguadores de masa sincronizados que modifiquen la respuesta dinámica en ese rango de velocidades.

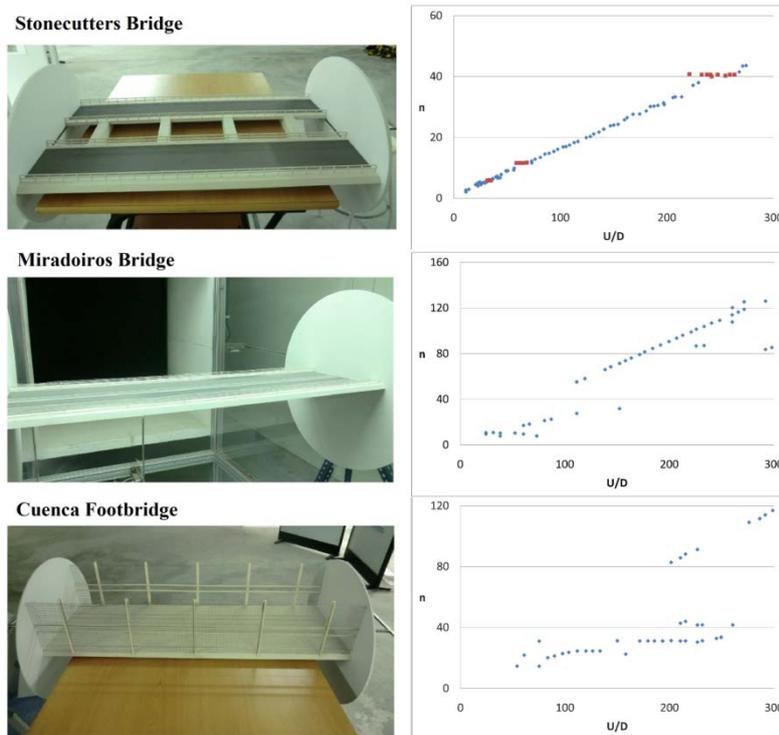


Figura 7. Modelos seccionales estudiados en en la Universidad da Coruña.

4. Conclusiones

Los ensayos seccionales de tableros de puentes son de gran utilidad para estudiar fenómenos aeroelásticos en puentes de gran vano. Los métodos híbridos en Aeroelasticidad que obtienen parámetros aerodinámicos de la sección del tablero mediante ensayos seccionales y calculan con ellos computacionalmente el comportamiento del puente completo son los que ofrecen resultados más fiables con un coste aceptable.

El fenómeno de flameo es determinante en el diseño puentes de gran vano o estructuras muy esbeltas. El análisis multimodal garantiza un resultado preciso a diferencia del análisis que solo considera el primer modo vertical y de torsión.

La excitación por vórtices se puede dar en cualquier estructura esbelta de poca rigidez y es importante analizarla en puentes de gran vano.

5. Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por la Xunta de Galicia incluyendo fondos FEDER con la ayuda de referencia GRC2013-05 y por el Ministerio de Economía y Competitividad (MINECO) con los proyectos de referencia BIA2013-41965-P y BIA2016-76656-R. Los autores agradecen profundamente estas ayudas recibidas.

6. Referencias

- [1] Jurado J.Á., Hernández S., Nieto F., Mosquera A. (2011). Bridge Aeroelasticity: Sensitivity Analysis and Optimal Design. WIT press. ISBN 978-1-84564-056-9.
- [2] Jurado J.Á., Sánchez R., Hernández S., Nieto F. (2014). PCTUVI. Wind tunnel control software for aerodynamic and aeroelastic sectional model tests. CWE 2014, 6 International Symposium on Computational Wind Engineering, Hamburg Germany 8-12 June.
- [3] Sarkar P. P., Jones N. P. y Scanlan R. H. (1992) System identification for estimation of flutter derivatives, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 41-44 1243-1254.
- [4] Chowdhury A.G. and Sarkar P.P., (2003). A new technique for identification of eighteen flutter derivatives using a three-degree-of-freedom section model. Engineering Structures, 25 (14), p1763-1772
- [5] Jurado J.Á., Kusano I., Hernández S., Nieto F. (2013) Improvement of multimodal flutter analysis code, FLAS. EACWE 2013. European and African Congress in Wind Engineering Cambridge, U.K.; July,7-11.
- [6] Jurado J.Á., Sánchez R., Hernández S., Nieto F., Kusano I. (2012) A review of cases of vortex shedding excitation in bridges: Sectional models testing. The Seventh International Colloquium on Bluff Body Aerodynamics and Applications (BBAA7) Shanghai, China; September 2-6.