

Original

Ensayos de viento para el Puente de la Constitución de 1812 sobre la Bahía de Cádiz

Wind studies for the Constitución de 1812 Bridge over Cadiz Bay

Óscar Ramón Ramos Gutiérrez^{a,*}, Miguel Ángel Astiz Suárez^b, Svend Ole Hansen^c,
José María Terrés Nícoli^d y José Meseguer Ruiz^{e,†}

^a Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos, APIA XXI-LB IDC, Universidad de Cantabria, Santander, España

^b Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Madrid, Carlos Fernández Casado SL, Madrid, España

^c PhD Wind Engineering, M.Sc. Civil Engineer, Svend Ole Hansen ApS, Copenhagen, Dinamarca

^d Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos, Oritia & Boreas, Universidad de Granada, Granada, España

^e Dr. Ingeniero Aeronáutico, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España

Recibido el 10 de diciembre de 2015; aceptado el 20 de abril de 2016

Disponible en Internet el 10 de junio de 2016

Resumen

El Puente de la Constitución de 1812 sobre la Bahía de Cádiz ha sido objeto de estudios y ensayos de viento propios de un puente de esta naturaleza, según las metodologías más avanzadas entre las que comprende el estado del arte. Se han realizado ensayos aeroelásticos en túnel de viento de capa límite de modelos de puente completo y durante las fases constructivas, no observándose riesgos de inestabilidades para las velocidades de cálculo consideradas. Igualmente se realizaron ensayos seccionales estáticos y dinámicos, así como un estudio exhaustivo de la acción del viento sobre los vehículos que han permitido, entre otros, cuantificar los efectos favorables para el tráfico de la presencia de la pantalla antiviento.

© 2016 Asociación Científico-Técnica del Hormigón Estructural (ACHE). Publicado por Elsevier España, S.L.U. Todos los derechos reservados.

Palabras clave: Aeroelasticidad; Túnel de viento; Acción del viento sobre el tráfico; Pantalla antiviento

Abstract

The 1812 Constitution Bridge over the Cádiz Bay has been subjected to several wind studies and tests using the most advanced methodology and techniques that the current state of the art allows. Full aeroelasticity tests in a boundary layer tunnel have been carried out, taking into account the whole configuration of the bridge during the in-service state, and also considering the most critical stage during the construction. No risk of aerodynamic instability has been found for the design wind speed. Furthermore, static section model tests for determination of static load coefficients for drag, lift and moment, and dynamic section model tests for simulation of the vertical and torsional vibrations of the bridge induced by vortex shedding and buffeting were also carried out. An exhaustive tests program was also developed to investigate the wind action on reference vehicles, evaluating the good performance of the windshield.

© 2016 Asociación Científico-Técnica del Hormigón Estructural (ACHE). Published by Elsevier España, S.L.U. All rights reserved.

Keywords: Aeroelasticity; Wind tunnel; Wind action on traffic; Windshield

* Autor para correspondencia.

Correos electrónicos: oramos@apiaxxi.es, oramos@louisberger.com (Ó.R. Ramos Gutiérrez).

† .

1. Introducción

En los puentes de luces medias y grandes es frecuente que el modo de vibración de flexión lateral del tablero se sitúe como uno de los modos principales (si no el fundamental) del puente, pudiendo movilizar cargas horizontales de viento significativas [1].

Es este uno de los primeros motivos por los que, desde una etapa temprana, la preocupación en la mejora del comportamiento dinámico es una de las tareas principales del diseño de puentes atirantados o colgantes de similar naturaleza al que nos ocupa. Así, se busca reducir el coeficiente aerodinámico de arrastre del tablero con actuaciones tales como reducir su canto efectivo, cuidar las formas de los ejes de ataque o, incluso, el detalle de los mismos.

Igualmente, se persigue preservar la rigidez torsional del conjunto de la estructura, y mantener la debida separación entre las frecuencias de torsión y flexión vertical. De esta forma se puede asegurar que la inestabilidad a aleteo se alcance para velocidades de viento superiores a las de diseño para estados límites últimos.

En este sentido se puede observar también una tendencia en los puentes actuales de grandes luces a diseñar tableros formados a partir de varios cajones en los que la separación hueca entre los mismos es calibrada para una mejor aerodinámica, o apéndices de cuerpos fuselados en los extremos para mejorar la estabilidad aerodinámica.

Si bien los modelos numéricos y la capacidad de cálculo han avanzado notablemente en los últimos años, es preciso el estudio detallado de la interacción dinámica fluido-estructura mediante modelos físicos. Esto es así fundamentalmente debido al notable efecto de la turbulencia atmosférica en la interacción con estas infraestructuras de marcada tridimensionalidad y envergadura. La calibración fiable de los modelos de turbulencia numéricos precisa un conocimiento o validación de la física de los mecanismos de la interacción dinámica responsables de los diversos fenómenos aeroelásticos. Así, la metodología fundamental de estudio de los efectos del viento en puentes como este se fundamenta en un programa experimental [2].

El estudio de los efectos del viento debe abarcar, por un lado, la determinación de cargas estáticas equivalentes distribuidas para el diseño y, por otro, la evaluación de la estabilidad global aerodinámica frente a fenómenos aeroelásticos. Estos últimos incluyen la vibración inducida por vórtices en sus distintos modos, el galope, la divergencia torsional y el aleteo, todos ellos relativos al puente en su globalidad o a elementos específicos. Los tirantes, por ejemplo, requieren un estudio específico con respecto al galloping en seco y combinado con la acción de la lluvia, la interferencia de estela y la propia excitación paramétrica a través de la excitación del tablero y las torres [3].

Finalmente, y dado el emplazamiento concreto de este puente en zona de exposición abierta y a una gran altura sobre el agua, se deberá tener en cuenta el efecto del tráfico modificando la propia aerodinámica del tablero, así como la acción del viento afectando a la seguridad y confort de los conductores que transitan por el puente.

En el Puente de la Constitución de 1812 sobre la Bahía de Cádiz se ha llevado a cabo un estudio de los efectos del viento fundamentado en los ensayos de un modelo seccional y un modelo aeroelástico completo. Los detalles de cada estudio se describen más adelante.

2. Estudios de viento realizados en la fase de redacción de proyecto

Los ensayos planteados durante la fase de proyecto estuvieron encaminados a conocer los aspectos más relevantes del comportamiento del puente frente al viento. Estos incluyeron la determinación de las acciones aerodinámicas sobre el tablero, la investigación de posibles problemas de inestabilidad aeroelástica y la seguridad del tráfico rodado bajo la acción del viento lateral y, por consiguiente, la eficacia del sistema de barreras antiviento proyectado. Los ensayos se llevaron a cabo en las instalaciones del Instituto Ignacio da Riva, dependiente de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Aeronáuticos de la Universidad Politécnica de Madrid.

Los ensayos se realizaron sobre un modelo seccional a escala 1/60, con una longitud equivalente a 57 m en el prototipo. El modelo se construyó en torno a un bastidor de madera muy aligerado, de tal manera que se pudiera posteriormente ajustar la masa y la inercia del modelo respetando las escalas de semejanza. En la [figura 1](#) se muestran diversas fases de la construcción del modelo, así como el modelo terminado incluyendo las placas de los extremos, que se colocan para asegurar un flujo bidimensional alrededor de la maqueta.

Los ensayos planteados a nivel de proyecto se describen en la [tabla 1](#).

Los coeficientes aerodinámicos están en todos los casos referidos a la anchura, B, del puente (34,8 m en el caso de los ensayos de proyecto) y a dos sistemas de ejes alternativos, los definidos por la dirección del viento y los definidos por la maqueta, tal como muestra la [figura 2](#). La variación de los distintos coeficientes aerodinámicos en función del ángulo de ataque se muestra en la [figura 3](#), correspondiente a la configuración con barreras.

La estabilidad del tráfico se estudió a través de un modelo de vehículo pesado dotado de 24 sensores de presión que permite medir distribuciones de presiones a lo largo de su superficie, e integrarlas para obtener acciones globales sobre el vehículo. Como consecuencia de estas medidas, se pudo evaluar el coeficiente de resistencia del vehículo frente al viento lateral en función de su situación en la sección transversal (barlovento o sotavento), y dependiendo de si hay barreras contra el viento o no. Los resultados se resumen en la [tabla 2](#), en la que se puede apreciar la reducción importante de las cargas que se consigue gracias a la presencia de las barreras.

La determinación del número de Strouhal es importante en sí misma y porque permite identificar fenómenos de vibración causados por el desprendimiento de torbellinos. Esta determinación se llevó a cabo bajo la acción de un flujo con muy baja turbulencia y, posteriormente, en los ensayos dinámicos, se vigiló especialmente el rango de velocidades correspondiente al desprendimiento de torbellinos, no encontrándose en ningún caso episodios de vibración significativos. Ello es debido a que el

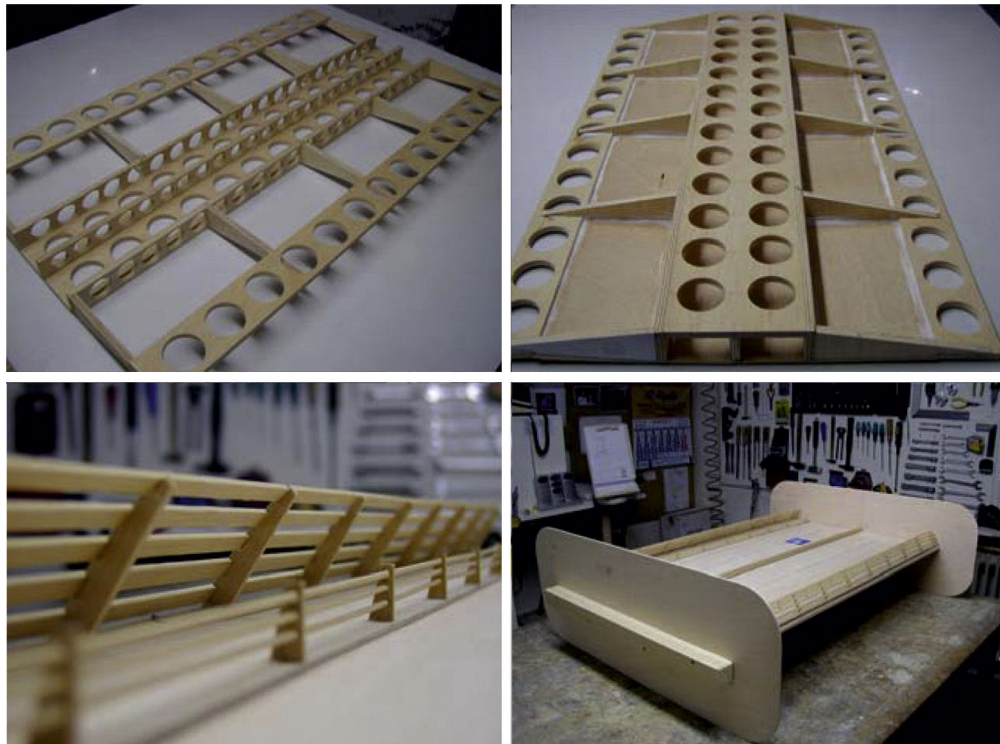


Figura 1. Maqueta del modelo seccional realizado en fase de proyecto.

Tabla 1
Ensayos seccionales planteados en fase de proyecto

Objetivo del ensayo	Configuraciones y ángulo de ataque	Tipo de ensayo
Determinación de los coeficientes aerodinámicos de la sección	Modelo de puente con y sin barrera ($-6^\circ/+6^\circ$)	Estático
Determinación de la carga de viento sobre el tráfico rodado	Modelo de puente con y sin barrera (0°)	Estático
Determinación del número de Strouhal de la sección	Modelo de puente con y sin barrera (0°)	Estático
Determinación de las fuerzas aerodinámicas no estacionarias y de las derivadas de estabilidad	Modelo de puente con y sin barrera ($-6^\circ, 0^\circ, +6^\circ$)	Dinámico
Determinación de las velocidades críticas de flameo para las distintas configuraciones y para diversos valores del amortiguamiento estructural	Modelo de puente con y sin barrera ($-6^\circ, 0^\circ, +6^\circ$)	Análítico (comparación con los resultados de los ensayos)
Análisis de sensibilidad a la turbulencia en cuanto a la estabilidad del modelo	Modelo de puente con y sin barrera (0°)	Dinámico

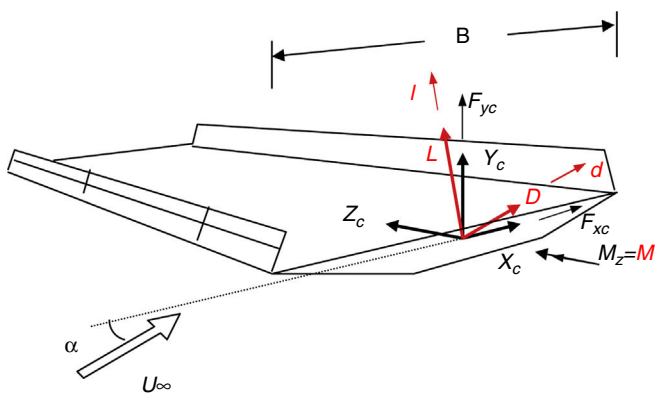


Figura 2. Definición de ejes y nomenclatura para la obtención de los coeficientes aerodinámicos.

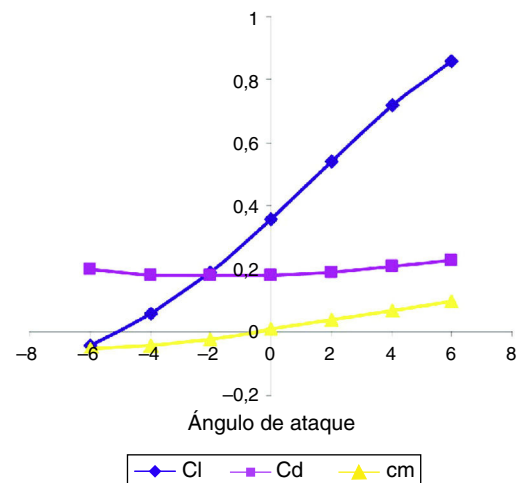


Figura 3. Coeficientes aerodinámicos con barreras.

Tabla 2
Coeficiente de resistencia del vehículo frente al viento lateral

	Barlovento		Sotavento	
	Sin barreras	Con barreras	Sin barreras	Con barreras
C_d	1,78	0,42	1,14	0,41

número de Scrouton es elevado (superior a 100) y también, en cierto modo, a la forma aerodinámica del tablero. El valor del número de Strouhal se mueve para esta sección entre 0,13 para la configuración con barreras y 0,10 sin ellas.

Los ensayos dinámicos se llevaron a cabo montando la maqueta sobre un conjunto de muelles, de forma que se pudieran reproducir las frecuencias de vibración principales de flexión y torsión del tablero. Las ocho derivadas de estabilidad [4] se obtuvieron para las dos configuraciones (con y sin barreras) y para tres ángulos de ataque (-6° , 0° y $+6^\circ$). Asimismo, en estos mismos ensayos se incrementó la velocidad del viento en el túnel hasta alcanzar condiciones de inestabilidad. La obtención de las derivadas de estabilidad permite también realizar un cálculo analítico de la estabilidad, de donde se puede obtener la velocidad crítica [2], que se puede comparar con la obtenida en el ensayo. Todos estos resultados se resumen en la [tabla 3](#), en la que las velocidades críticas se han transformado a la escala del prototipo para una mejor comprensión. Los valores reales de las velocidades de inestabilidad son superiores cuando se considera el comportamiento tridimensional del puente, como se ha hecho en los ensayos que se describen a continuación.

3. Estudios de viento realizados en la fase de obra con la configuración final del puente

Tal como se ha descrito en el apartado anterior, los estudios de viento realizados durante la fase de redacción de proyecto no anticiparon ningún tipo de comportamiento anómalo del puente frente a la acción del viento.

En cualquier caso, la Dirección General de Carreteras estimó oportuno completar la información de proyecto con una campaña más exhaustiva de análisis y ensayos, realizados ya con la configuración finalmente construida de cada uno de los elementos del puente.

APIA XXI fue la empresa encargada de planificar y coordinar estos nuevos estudios, dentro de un contrato algo más amplio que engloba también la realización de diversos estudios estructurales y la redacción del plan de inspección y mantenimiento [5].

Los nuevos estudios de viento comprendieron las siguientes actuaciones:

- Ensayo en túnel de viento del modelo aeroelástico del puente completo (con configuración de máximo voladizo en construcción y configuración de servicio).
- Ensayo en túnel de viento del modelo de sección (estacionario y dinámico).
- Estudio en túnel de viento de la acción del viento sobre vehículos.
- Estudio de vibraciones en cables (desprendimiento de vórtices, galope, vibraciones inducidas por lluvia y viento, y excitación paramétrica).

Por su relevancia e interés trataremos de describir someramente en este artículo los ensayos realizados en túnel de viento.

3.1. Ensayo aeroelástico integral

El modelo aeroelástico se construyó a una escala de 1:265 respecto al prototipo. Los ensayos se llevaron a cabo en condiciones de flujo tridimensional de capa límite atmosférica en el Laboratorio BLWTL de la Universidad de Western Ontario (Canadá), y el trabajo fue desarrollado por el propio laboratorio BLWTL Oritia y Boreas (O & B).

El estudio recoge la siguiente información:

- Información de la estabilidad global del puente en condiciones de viento hasta alta intensidad y dirección variable para el puente completo y para una fase de construcción crítica seleccionada.
- Determinación de las características de la respuesta del modelo aeroelástico para viento turbulento tridimensional en un amplio rango de velocidades del viento.
- Definición del comportamiento del puente debido a la naturaleza turbulenta del viento (buffeting) en vientos consistentes para las condiciones esperadas en el sitio del proyecto.
- Determinación de la respuesta del puente para viento de baja turbulencia tridimensional con el fin de confirmar la posibilidad de formación de vibración inducida por desprendimiento de vórtices y la inestabilidad por aleteo (flutter) para el puente completo y para la fase de construcción en voladizo seleccionada.
- Análisis de la respuesta del puente para el puente completo y la fase de construcción en voladizo para vientos perpendiculares y esviados según el eje del puente.

3.1.1. Descripción del modelo

Tal y como se muestra en la [figura 4](#), se ha ensayado un modelo a escala 1:265 de la parte atirantada del Puente sobre la Bahía de Cádiz, en concreto, el tramo de puente comprendido

Tabla 3
Velocidades de inestabilidad según los ensayos seccionales en fase de proyecto

Ángulo de ataque	-6°		0°		$+6^\circ$	
	Sin barreras	Con barreras	Sin barreras	Con barreras	Sin barreras	Con barreras
U_{cr} calculada (m/s)	65,7	59,1	63,0	53,5	62,5	49,0
U_{cr} medida (m/s)	64,8	60,9	61,4	51,9	63,3	50,0

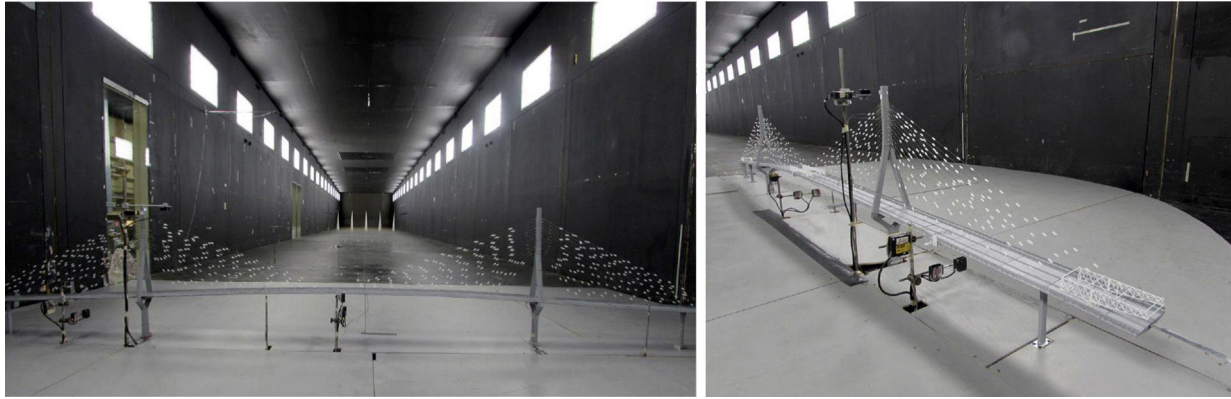


Figura 4. Maqueta para el modelo aeroelástico integral. A) Situación de servicio. B) Situación de construcción.

entre las pilas P10 y P15. En P15 se ha introducido una rigidez equivalente que simula la continuidad del puente hacia el tramo del hormigón.

El modelo consta, tanto en tablero como en mástiles, de una espina estructural central de aluminio cuya rigidez fue dimensionada y calibrada para simular el comportamiento de los distintos modos de vibración de flexión vertical, lateral y torsión. La espina estructural está recubierta modularmente para formar la geometría definitiva del puente, que es la que gobierna la aerodinámica de la estructura. La rigidez de los tirantes está simulada mediante micromuelles convenientemente calibrados.

Para obtener los resultados del ensayo, el modelo se encuentra instrumentado. La instrumentación consta de los siguientes tipos de sensores:

- Acelerómetros, tanto para medir aceleraciones verticales como rotacionales. Se instrumentan las secciones de centro de luz y 1/4 del vano central, el centro de luz del vano lateral y la cabeza de los mástiles.
- Galgas extensométricas. Permiten deducir los momentos flectores y torsores en las secciones instrumentadas. Se instrumentan las secciones de centro de luz y 1/4 del vano central, el centro de luz del vano lateral, así como los mástiles.
- Transductores de desplazamiento láser miniaturizados, que permiten medir flechas. Están ubicados en el centro de luz del vano central y lateral, y en cabeza de uno de los mástiles.
- Tubos de pitot, para determinar la velocidad del flujo del viento.

3.1.2. Configuraciones de ensayo

En cuanto al régimen del viento, se consideraron dos condiciones de flujo: una en la que se reprodujeron las condiciones de turbulencia y estructura especial (capa límite) esperadas en el sitio, y una segunda en la que se reprodujeron flujos de baja turbulencia adecuados para la identificación de posibles inestabilidades.

Igualmente, se analizaron cinco direcciones de viento: a) 90° (viento del Norte, perpendicular al eje del puente), b) 270° (viento del Sur, perpendicular al eje del puente), c) 0° (viento a lo largo del eje del puente proveniente del Este), d) 60° (viento del Noreste), y e) 300° (viento del Sureste).

En cuanto a la configuración del puente, los ensayos han sido realizados tanto para la situación de puente totalmente terminado en fase de servicio, como para la última fase de construcción (máximo voladizo del tablero antes del cierre en centro de luz), modelando también los propios carros de izado de dovelas (tal como se muestra en la figura 4).

A modo ilustrativo, en la figura 5 se muestran los resultados de los momentos en la sección de centro de luz del tablero en el vano atirantado según los 3 ejes coordenados (*lift*, *torque* y *drag*) para un ángulo de incidencia de 60° , en condiciones de alta turbulencia y capa límite atmosférica.

3.1.3. Conclusiones de los ensayos

A continuación describimos las principales conclusiones de los ensayos realizados:

Puente completo

- No se ha observado inestabilidad de flutter en ninguno de los ensayos realizados en baja turbulencia para la configuración de puente completo, hasta una velocidad media del viento a escala real a la altura del tablero de 91 m/s. Esto significa más de 1,5 veces la velocidad media horaria del viento de 55,3 m/s en la altura del tablero para un periodo de retorno de 100 años.
- No se observan inestabilidades de flutter ni vibración inducida por vórtices en la configuración de flujo esperada en el sitio, hasta una velocidad media horaria a escala real de 66 m/s a la altura del tablero.
- No se han encontrado picos de respuesta inducida por vórtices en ninguno de los ensayos realizados en baja turbulencia y para condiciones de flujo de capa límite atmosférica.
- La respuesta debida a la naturaleza turbulenta del viento (buffeting) resulta proporcional al nivel de intensidad de turbulencia. La respuesta en flexión lateral (arrastre) resulta proporcional a la componente longitudinal, mientras que la flexión vertical (sustentación) es proporcional a la componente vertical.
- Los ratios de amortiguamiento obtenidos para los modos fundamentales en la configuración de puente completo han sido de 0,10% y 0,40%. Estos valores se consideran inferiores, y por tanto conservadores, comparados con un valor de 0,8% que se

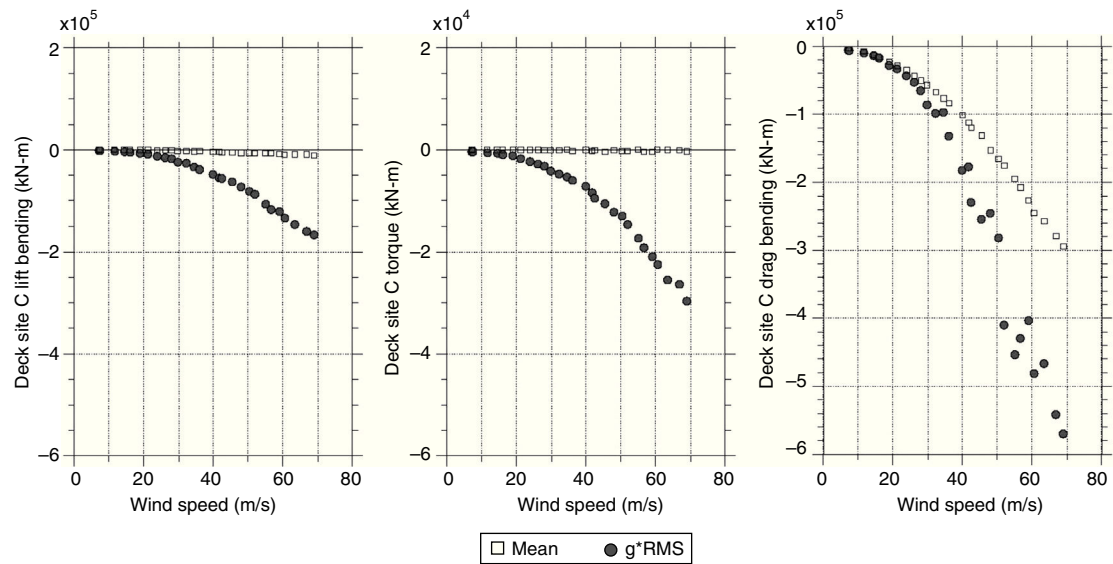


Figura 5. Resultados del modelo aeroelástico para la sección central del tablero del vano atirantado.

podiera anticipar para una estructura como la del Puente de la Constitución de 1812 sobre la Bahía de Cádiz.

Puente en fase de construcción

Los ensayos realizados no mostraron, igualmente, ningún signo de respuesta inducida por vórtices durante la fase crítica del proceso constructivo. Igualmente, la inestabilidad de flutter se situó muy por encima de las velocidades consideradas en el cálculo para periodos de retorno típicos de una fase constructiva.

3.2. Ensayos seccionales

Los ensayos en secciones en túnel de viento se llevaron a cabo en el túnel de capa límite de los laboratorios de Svend Ole Hansen Aps en Copenhague (Dinamarca). La escala del modelo es 1:50, siendo su longitud de 1,7 m. De esta forma, el ancho entre las 2 impostas es de 0,72 m y el canto, de 0,06 m. El modelo está construido con un emparrillado de aluminio constituido por perfiles cuadrados, lo que asegura la rigidez del modelo. Por otro lado, es posible añadir masa en el interior con el fin de calibrar las frecuencias de vibración vertical, torsional y vertical asimétrica.

Se han llevado a cabo tanto ensayos estáticos como dinámicos. Los ensayos estáticos sirven para determinar los coeficientes de arrastre, sustentación y vuelco, mientras que los dinámicos proporcionan resultados sobre las vibraciones causadas por desprendimiento de vórtices, buffeting o flutter [3].

Se han empleado dos tipos de tráfico, llamados tráfico A y B. La configuración A se emplea para la investigación sobre desprendimiento de vórtices, y está compuesta por una sucesión de vehículos de 16,6 m de largo y 3,85 m de alto, separados 2,5 m. La configuración B se emplea para los análisis estáticos y está compuesta por una sucesión alterna de vehículos de 16,6 m de largo y 3,85 m de alto, y vehículos de 11,9 m de largo y 3,05 m de alto.

3.2.1. Ensayos estáticos

En los ensayos estáticos, realizados en condiciones de flujo turbulento con intensidad del 11-13%, se han determinado los coeficientes de arrastre C_D en la dirección del viento, de sustentación C_L perpendicular a la dirección del viento y de vuelco C_M bajo las configuraciones indicadas en la tabla 4.

Los resultados de los coeficientes estáticos medios medidos en los ensayos para la configuración S1 se muestran en la figura 6. Igualmente, la tabla 5 muestra los resultados máximos en el entorno de ángulos de incidencia entre -2° y 2° . Los valores de los coeficientes de sustentación y de vuelco están escalados con respecto a la anchura del puente (34,3 m), mientras que los coeficientes de arrastre están escalados con respecto al canto del tablero (3,0 m).

3.2.2. Ensayos dinámicos

En la tabla 6 se indican los ensayos dinámicos realizados en el modelo seccional.

En la configuración B1 se escogen los dos primeros modos de torsión y flexión vertical, y en la configuración B2, los siguientes modos de torsión y flexión vertical.

Los ensayos muestran que la sección del puente es estable para velocidades de hasta 60 m/s para el ratio de frecuencias de los modos 9 y 3 (primeros modos de torsión y flexión vertical), y de hasta 72 m/s para el ratio de frecuencias de los modos 13 y 8 (siguientes modo de torsión y flexión vertical).

Tabla 4 Ensayos seccionales estáticos realizados sobre la configuración final del puente			
Ensayo	Configuración	Tráfico	Ángulo [°]
Coeficientes de carga estáticos	S1	Sin tráfico	0, ±1, ±2, ±4, ±6, ±8, ±10
	S2	Tráfico B	0, ±1, ±2, ±4, ±6, ±8, ±10

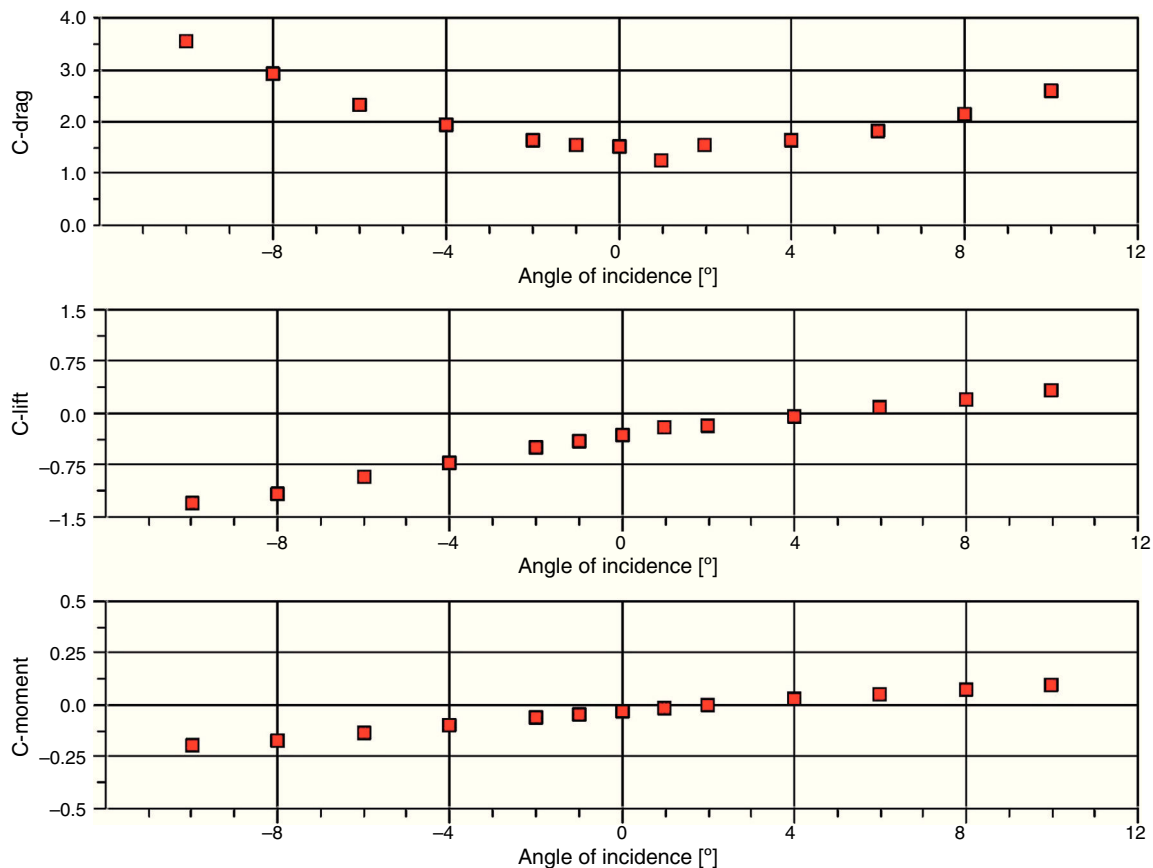


Figura 6. Coeficientes aerodinámicos según los ensayos seccionales con la configuración final del puente para la configuración S1.

Tabla 5

Coeficientes aerodinámicos según los ensayos seccionales con la configuración final del puente

Configuración	Arrastre, C_D	Sustentación, C_L	$dC_L/d\alpha$	Vuelco, C_M	$dC_M/d\alpha$
S1	1,642	-0,501	7,191	-0,059	1,142
S2	1,861	-0,416	6,105	-0,063	0,667

Igualmente, se deduce a partir de los ensayos realizados que para velocidades inferiores a 65 m/s no se producen inestabilidades por flutter.

Asimismo, los ensayos muestran que las vibraciones inducidas por desprendimiento de vórtices no afectan a la sección del puente con todo tipo de barreras y pantallas antiviento, y con un decremento logarítmico por debajo de 0,8% para vibraciones verticales, y en el rango de 1,1 a 1,3% para vibraciones de torsión.

Tabla 6

Ensayos seccionales dinámicos realizados sobre la configuración final del puente

Ensayo	Configuración	Tráfico	Ángulo [°]
Buffeting/flutter	B1	Sin tráfico	0, ± 3
	B2	Sin tráfico	0, ± 3
Vibración inducida por vórtices	V1	Sin tráfico	0
	V2	Tráfico A	0
	V3	Tráfico B	0

3.3. Estudio de la acción del viento sobre los vehículos

Se han realizado estudios en túnel de viento para caracterizar la acción del viento sobre los vehículos, partiendo del mismo modelo utilizado para los estudios seccionales, y con la configuración final realmente construida de la pantalla antiviento.

Uno de los principales objetivos de este ensayo es caracterizar el efecto favorable que ofrece la pantalla antiviento para la seguridad y confort del tráfico. El uso de pantallas antiviento, si bien aún no está totalmente generalizado, sí está suficientemente extendido y recomendado para el caso de puentes situados en zonas con una gran exposición al viento como la que nos ocupa. En este caso, tal como puede verse en la [figura 7](#), la pantalla es una estructura metálica formada por postes verticales separados cada 5 m y cinco lamás horizontales distribuidas de forma equidistante a lo largo de la altura de los postes. Los postes están conformados mediante perfiles en T, y las lamás son perfiles tubulares rectangulares de 300 × 100 mm. La altura total de la pantalla antiviento es de aproximadamente 3,0 m.

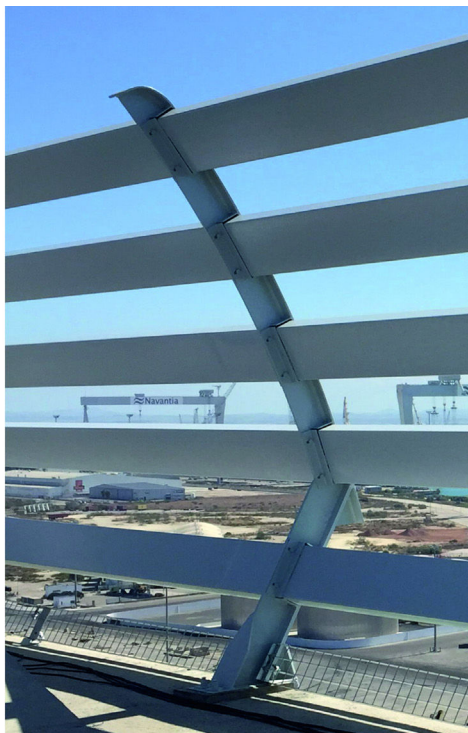
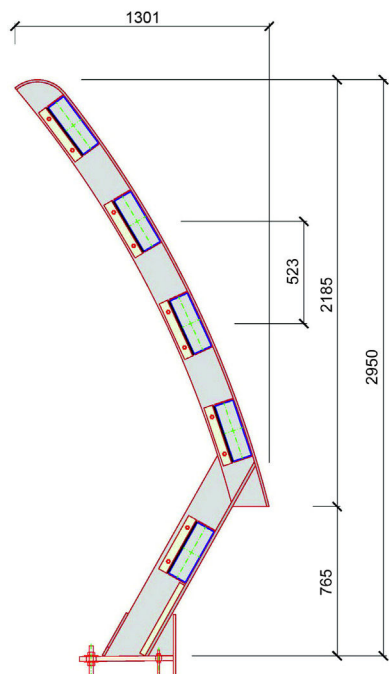


Figura 7. Pantalla antiviento.

Los ensayos en túnel de viento se han realizado para cuatro tipos de vehículos (camión articulado, camión ligero, coche y motocicleta), tanto para la configuración de puente sin pantalla como para la configuración de puente con pantalla antiviento, lo que permite evaluar la influencia relativa de dicho elemento sobre el tráfico. Los vehículos se han dispuesto en seis carriles de tráfico distintos, para observar también la influencia de la distancia del vehículo con respecto a la pantalla antiviento. Tal como se aprecia en la [figura 8](#), se ha evaluado también la influencia que las torres pueden tener en la acción del viento de los vehículos, posicionando los vehículos a distintas distancias de la torre.

Los resultados indican claramente que la línea de tráfico más próxima a la pantalla experimental los mayores esfuerzos horizontales. Asimismo, como era de esperar, la pantalla antiviento se muestra bastante eficaz a la hora de disminuir la exposición de los vehículos frente al viento, con reducciones en torno al 35-60% en relación con los ensayos realizados sin pantalla.

En cuanto a la influencia de las torres en la acción del viento sobre los vehículos, los resultados muestran, como era previsible, que cerca de los bordes de la torre la velocidad del viento se amplifica, provocando mayores fuerzas horizontales sobre los vehículos. En cualquier caso, la presencia de la pantalla antiviento hace que la fuerza máxima sobre el coche no sea mayor

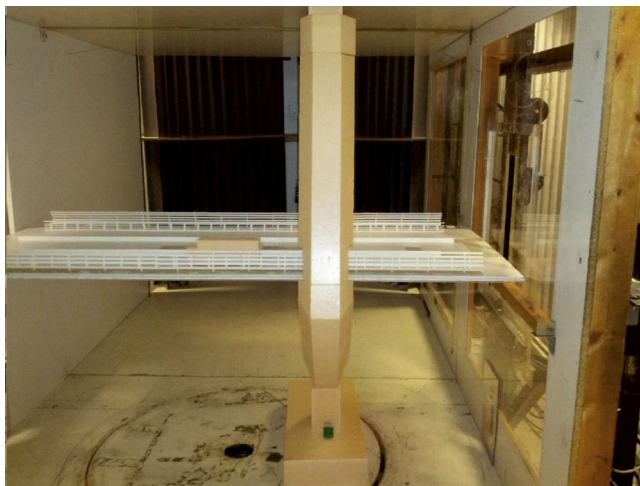
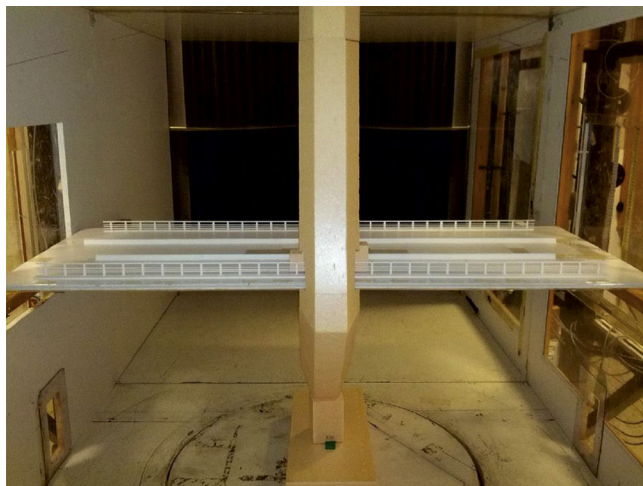


Figura 8. Maqueta de modelo seccional. Estudio de influencia de las torres en la acción del viento sobre los vehículos.

que el caso patrón de puente sin pantalla antiviento ni presencia de torre.

Los resultados de estos ensayos están siendo tenidos en cuenta dentro del programa de gestión operacional del Puente de la Constitución de 1812 sobre la Bahía de Cádiz, y son de gran utilidad en la determinación de los niveles de alerta por viento que permiten garantizar el adecuado confort en la conducción de los usuarios de esta vía, tal como se hace en puentes de similar envergadura [6,7].

Bibliografía

- [1] European Committee for Standardization, Eurocode 1: Actions on structures — Part 1-4: General actions — Wind actions, Ref. N.º. EN 1991-1-4:2005: E, Brussels, Belgium, 2005.
- [2] Wind Tunnel Testing: A General Outline, The University of Western Ontario, Boundary Layer Wind Tunnel Laboratory General Outline Report, May 2007.
- [3] C. Dyrbye, S.O. Hansen, *Wind Loads on Structures*, Wiley & Sons, 1997.
- [4] R.H. Scanlan, J.J. Tomko, Airfoil and bridge deck flutter derivatives, *Journal of the Engineering Mechanics Division ASCE* 97 (6) (1971) 1717–1737.
- [5] A. Catillo Linares, O.R. Ramos Gutiérrez, M.A. Díaz García, M.J. Pantaleón Prieto, Aspectos generales y casos concretos de los trabajos de supervisión estructural del proceso constructivo y medios auxiliares del Puente de la Constitución de 1812 sobre la bahía de Cádiz, *Hormigón y Acero* 67 (2016) 277–285.
- [6] E. Delwik, J. Mann, G. Rosenhagen, Traffic restrictions due to wind on the Fehmarn Belt Bridge, Risø National Laboratory, 2005.
- [7] Forth Road Bridge, Wind and weather [online], Disponible en: <http://www.forthroadbridge.org/travel/wind-and-weather/>.

H^A
últimos números publicados



ACHE

Base de datos de artículos publicados en números anteriores disponible en:

<http://www.e-ache.com>