

Ampliación del Puente de Rande. Análisis de estabilidad frente al viento.

Widening of Rande Bridge . Aeroelastic stability analysis.

Óscar Ramón Ramos Gutiérrez^{a,*}, José María Terrés Nicoli^b, Álvaro Serrano Corral^c, Ana Fernández Prieto^d, Haritz García Coca^e, Ángel Vidal Vacas^c

^a Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Universidad de Cantabria.

^b Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. ORITIA&BOREAS. Presidente.

^c Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. MC2 Ingeniería.

^d Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Audasa.

^e Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. WSP Spain.

RESUMEN

La propia naturaleza y singularidad del Proyecto de Ampliación del Puente de Rande aconsejaba la realización de estudios avanzados para caracterizar la influencia de la acción del viento sobre el tablero ampliado, tal como ya estaba contemplado desde la fase de proyecto. Si bien los estudios y consideraciones realizados en fase de proyecto no aventuraban ningún tipo de comportamiento anómalo global, se han realizado nuevos extensos estudios y ensayos durante la fase de obra que han permitido corroborar estas premisas. Asimismo, las especiales condiciones meteorológicas sufridas durante los días 9, 10 y 11 de diciembre de 2017 en la ubicación del puente han permitido extraer importantes y favorables conclusiones de lo que constituyó una auténtica prueba de carga frente al viento a escala real.

ABSTRACT

The unique characteristics and singularity of Widening of Rande Bridge project demanded advanced studies in order to analyze the influence of the wind action on the widening bridge, as it was already forecasted from the most remote project stages. Although the studies conducted during the project phase did not show any anomalous behavior of the bridge, new and more extensive analysis, test and studies have been carried out during the construction phase, confirming these premises. Additionally, the special whether conditions experimented on the bridge site during December 9th, 10th and 11th 2017, made possible to obtain very relevant and favorable conclusions from what became a genuine real scale wind test.

PALABRAS CLAVE: aeroelasticidad, túnel de viento, estabilidad, instrumentación dinámica, puente atirando

KEYWORDS: aeroelasticity, wind tunnel, stability, dynamic monitoring, cable stayed bridge

1. Introducción

La necesidad de realizar estudios avanzados en el campo de la aeroelasticidad para garantizar la estabilidad de la Ampliación del Puente de Rande frente a la acción del viento está plenamente justificada.

A los ya conocidos efectos derivados de la importancia de los modos de vibración laterales y de torsión en los puentes de luces medias y grandes, al notable efecto de la turbulencia atmosférica en la interacción con estas infraestructuras de marcada tridimensionalidad y envergadura [1], se suma en este caso la especial configuración resistente del tablero resultante de

la ampliación (tres tableros interconectados por rótulas en la dirección transversal).

Si bien los estudios y consideraciones realizados en fase de proyecto no aventuraban ningún tipo de comportamiento anómalo global, se han realizado nuevos estudios y ensayos durante la fase de obra que han permitido corroborar estas premisas. Asimismo, las especiales condiciones meteorológicas sufridas durante los días 9, 10 y 11 de diciembre de 2017 en la ubicación del puente han permitido extraer importantes y favorables conclusiones de lo que constituyó una auténtica prueba de carga frente al viento a escala real.



Figura 1. Visa inferior de la ampliación del puente de Rande

2. Ensayos en túnel de viento en fase de obra

Tal y como prescribía el Pliego de Condiciones Técnicas Particulares del Proyecto, en fase de obra se han afrontado nuevos ensayos en túnel de viento para corroborar y extender las conclusiones previamente obtenidas. Los nuevos ensayos han sido dirigidos por el por el Dr. José M^a Terrés Nícoli de Oritia & Boreas, en un trabajo un trabajo realizado conjuntamente por *The Boundary Layer Wind Tunnel Laboratory*

(Laboratorio BLWT) de la Universidad de Western Ontario (Canadá) – donde se han llevado a cabo físicamente los ensayos – y Oritia & Boreas (O & B).

El estudio se centra en la determinación de las cargas de viento de diseño y evaluación de la estabilidad del diseño final de la Ampliación del puente de Rande para distintas direcciones de viento de interés e intensidades de turbulencia atmosférica.

El estudio se fundamenta, por una parte, en el ensayo del modelo de sección estacionario y dinámico (basado en un modelo flexible

aeroelástico y con flujos de alta y baja turbulencia) y, por otra, en el ensayo de la estructura completa en Túnel de Viento.

2.1 Modelo seccional

El modelo tiene una longitud de 2.13 m, equivalente a 170.4 m del prototipo a la escala de 1:80. La singularidad del modelo de la ampliación del Puente de Rande estriba en la articulación que une los tableros de la ampliación al existente. Normalmente un modelo de sección

tiene en cuenta los modos principales de flexión vertical y torsión de un tablero. Al tratarse de 3 tableros independientes pero vinculados se hace necesario la modelización de estos nuevos grados de libertad dado que pueden ser determinantes en la dinámica de la interacción toda vez que la misma se va modificando conforme el conjunto responde a la acción del viento.



Figura 2. Vista general del modelo seccional

Es por esto por lo que se ha prestado especial atención a la correcta modelización de estos modos transversales a la par que los fundamentales de flexión vertical y torsión. Además es preciso que la caracterización de estos modos se haga con el menor amortiguamiento posible dado que, de lo contrario, la respuesta obtenida sería previsiblemente inferior a la esperada en el prototipo.

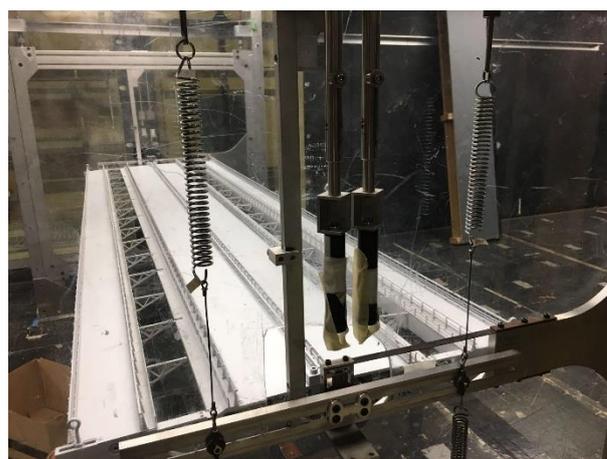


Figura 3. Detalle de conexión entre tableros en el modelo seccional

Se llevaron a cabo ensayos estáticos tanto dinámicos, con la siguiente configuración:

Tabla 1. Ensayos realizados en modelo seccional

Ensayo	Turb.	Amort.	Ángulo [°]
Coeficientes de carga estáticos	Alta	-	0, ±1, ±2, ±3,
	Baja	-	±4, ±5, ±6, ±7, ±8, ±9, ±10
Bataneo / Flameo	Alta	Inherente	0, ±2.5
	Baja	0.8%	

Las principales conclusiones derivadas de los estudios seccionales en túnel de viento fueron estas:

- No se ha observado efecto o dependencia del número de Reynolds relevante en todos los ensayos realizados para un rango de Re de $8 \cdot 10^5$ y un ángulo de ataque de 0 grados.

- El criterio de Glauert-Hartog permite una valoración de la estabilidad a galloping a partir de la derivada del coeficiente de sustentación en caso de resultar esta negativa para algún ángulo de ataque. No se ha observado derivada negativa de este coeficiente en un amplio rango de ángulos de ataque representativos de las condiciones esperadas con lo que permite concluir la estabilidad a este fenómeno.

- Se observa una pendiente negativa limitada en el coeficiente aerodinámico de torsión para ángulos entre -10 y -7 grados. Esto es indicativo de posible inestabilidad de aleteo. No obstante, los ensayos dinámicos, así como el análisis tridimensional de flutter, han permitido descartar esta inestabilidad para velocidades de hasta 60 m/s.

- Los ensayos realizados para el grado de amortiguamiento bajo (0.33% vertical y 0.8% torsional) muestran respuestas proporcionalmente mayores o iguales que las observadas para el grado de amortiguamiento

nominal (0.8% para ambos modos). Ninguna de las configuraciones estudiadas presentó signos de inestabilidad inducida por vórtices.

- No se observó inestabilidad de aleteo (flutter) para ninguno de los ensayos para velocidades de hasta 80 m/s y, en cualquier caso, por encima de la considerada como límite de 60 m/s, diezminutal a altura del tablero.

- En general, la respuesta dinámica en el rango de velocidades de interés se caracteriza por la estabilidad aerodinámica y una vibración controlada, por tanto, únicamente por la turbulencia atmosférica (buffeting).

3.1 Modelo aeroelástico integral

El modelo aeroelástico completo del Puente de Rande ampliado se diseñó y construyó a una escala de 1:200 respecto al prototipo. Se seleccionó esta escala para simular una longitud apropiada de la escala real del puente y para poder modelar correctamente las características de la turbulencia a escala, lo cual es fundamental en el estudio de la acción del viento sobre el puente [2]. La longitud total del puente simulado en los ensayos en túnel de viento fue de 704.58 m a escala real.

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. En cuanto a la rigidez de los tirantes, está simulada mediante micro-muelles convenientemente calibrados.

l.

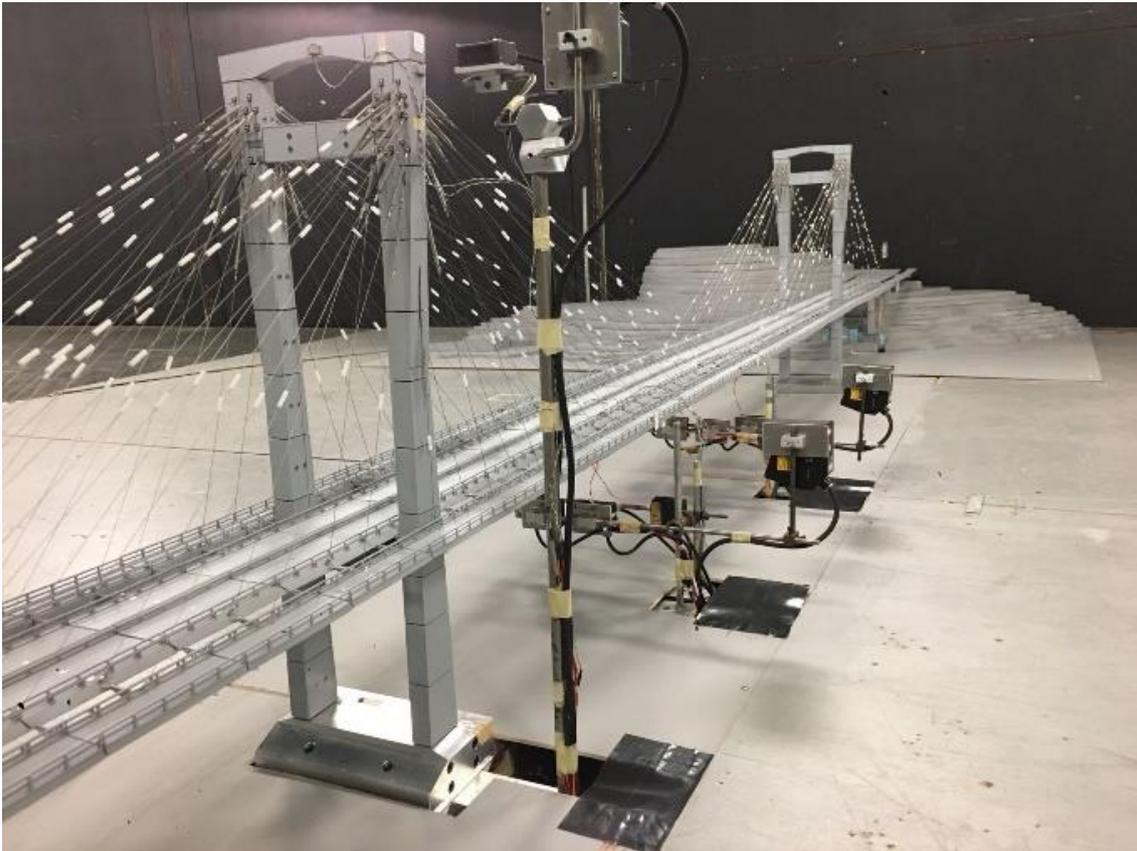


Figura 4. Modelo aeroelástico integral. Vista superior.

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

- Acelerómetros. Se instrumentaron las secciones de centro luz y 1/4 del vano central con acelerómetros transversales y verticales en el borde del tablero central. También se colocaron acelerómetros verticales en los tableros de la ampliación. Por último, en la parte superior de la torre se colocaron tres acelerómetros en las direcciones longitudinal, transversal y rotacional.

- Galgas extensométricas. Permiten deducir los momentos flectores y torsores en las secciones instrumentadas. Se instrumentaron las tres secciones transversales principales en las siguientes localizaciones: Centro de vano lateral, entre cables 5 y 6; 1/4 del vano central, entre cables 13 y 14; en centro del vano principal.).

- Transductores de desplazamiento láser miniaturizados, que permiten medir flechas. Dos de ellos se ubicaron en las posiciones 1 y 3 descritas anteriormente. Otros dos se colocaron bajo los nuevos tableros de la ampliación en centro de luz y a un cuarto de luz. Finalmente, se colocó un quinto distanciómetro en cada sección transversal del modelo en la misma dirección del viento.

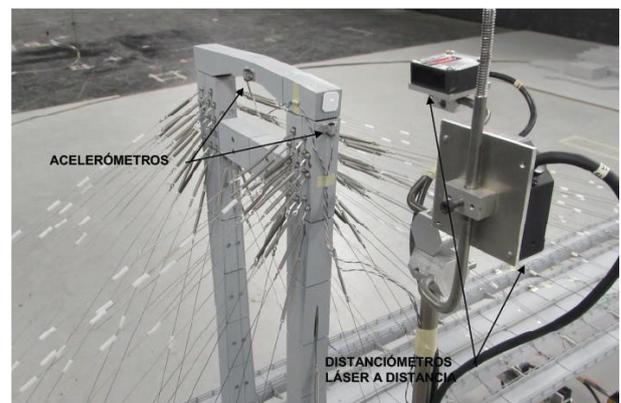


Figura 5. Detalle de instrumentación en torres



Figura 6. Modelo aeroelástico integral. Vista inferior.

Los ensayos realizados presentan unas condiciones de flujo de capa límite atmosférica correspondiente a tres configuraciones:

- Exposición 1: Condiciones de flujo conservadoras, con una turbulencia baja (intensidad de turbulencia del 6% correspondiente a una altura de rugosidad de $z_0=0.0001$).

- Exposición 2: Altura de rugosidad característica de $z_0=0.01$ m. Esto es equivalente a una exposición abierta típica con una intensidad turbulenta longitudinal del 13% a una altura del tablero de 50 m.

- Exposición 3: Altura de rugosidad característica de $z_0=0.05$ m. Esto es equivalente a una exposición abierta típica con una intensidad turbulenta longitudinal del 16% a una altura del tablero de 50 m.

Se consideran 3 direcciones de ataque del viento (180° , 210° , 225° , 240° , 270°). Los distintos ángulos de ataque se consiguen mediante el giro manual de la plataforma circular sobre la que va montado el modelo.

Los ensayos se realizan hasta velocidades de 70 m/s, con incrementos de 1 m/s.

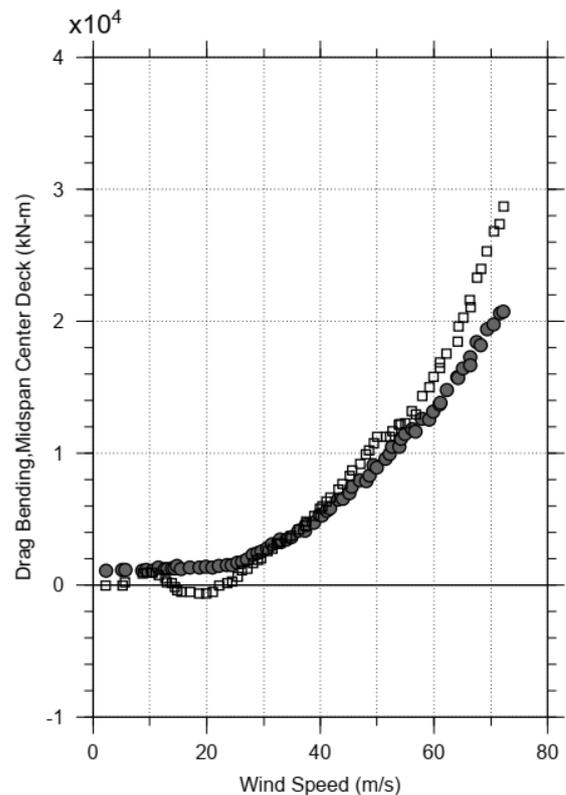


Figura 7. Momento en centro de luz vs velocidad

La respuesta del puente completo resultante de la ampliación se puede resumir en los siguientes puntos:

- No se ha observado inestabilidad de flutter en ninguno de los ensayos realizados en baja turbulencia, hasta una velocidad media del viento a escala real a la altura del tablero de 70 m/s. Esto correspondería a un periodo de retorno de 10000 años, que está conforme con los criterios de diseño a efectos de estabilidad aerodinámica. La misma velocidad límite se observó para condiciones de flujo turbulento de capa límite. En cualquier caso está por encima del valor de 60 m/s a altura de tablero referido como criterio de estabilidad.

- No se observó respuesta inducida por vórtices en ninguno de los ensayos llevados a cabo para las condiciones de flujo de baja turbulencia y en condiciones de flujo de capa límite atmosférica.

- La respuesta de buffeting, es en general, proporcional a la intensidad de turbulencia en el sitio. La respuesta lateral (arrastre) está relacionada con la componente longitudinal de turbulencia mientras que la vertical y torsional con la componente vertical de la misma.

- La respuesta (buffeting) derivada de la naturaleza turbulenta del viento se considera relativamente reducida para las condiciones de servicio (velocidades de viento del orden de 20 m/s).

3. Estudios analíticos a nivel de sección

De forma paralela y complementaria a los análisis realizados en túnel de viento físico, y con el objeto de poder adelantar resultados que pudieran orientar los ensayos físicos, se ha realizado un análisis aerodinámico de tipo seccional en un modelo analítico mediante técnicas de dinámica de fluidos computacional (CFD).

Para el modelo se define un tramo de tablero de 30.90 m de longitud, que incluye tres

de las celosías transversales que conectan con la ampliación. En los puntos donde se conectan los tirantes con el tablero se dispone la conexión de barras elásticas que simulan la rigidez que le aportan al sistema los pilares. En cabeza dichas barras se conectan con un elemento rígido horizontal que permite incorporar masas que simularán el efecto inercial de los pilones en su movimiento. Finalmente las barras rígidas horizontales anteriores se unen por su punto medio a un punto fijo mediante muelles elásticos en el grado de libertad vertical. Con ello se aporta la rigidez del cabeceo de las propias pilas del puente.

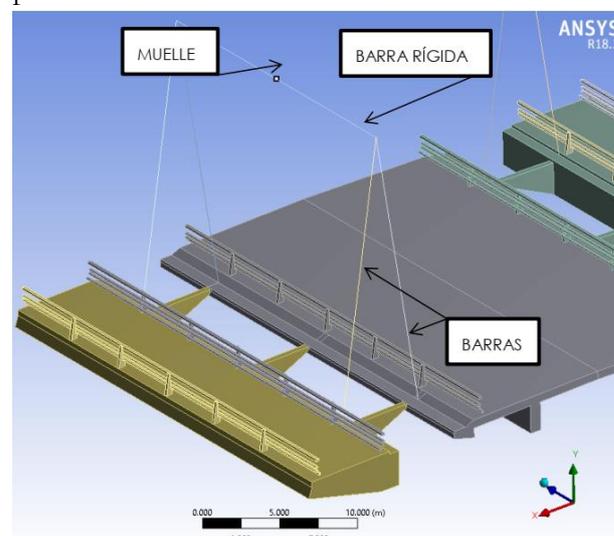


Figura 8. Sistema de sustentación calibrado

El modelo se ha sometido a acciones de viento transitorio con interacción entre el viento y el comportamiento elástico real de la estructura con velocidades de hasta 60 m/s (216 km/h), no detectándose inestabilidades de tipo flameo [3].

Asimismo se ha verificado la no susceptibilidad del puente frente a fenómenos de galope transversal y divergencia torsional; y se ha comprobado que para velocidades de viento factibles en la realidad no son razonablemente esperables efectos apreciables en el tablero debidos a desprendimiento de vórtices.

En resumen, las conclusiones del análisis computacional de viento permiten garantizar, en la línea de lo obtenido en el análisis físico, la total estabilidad del Puente de Rande frente a fenómenos aerodinámicos.

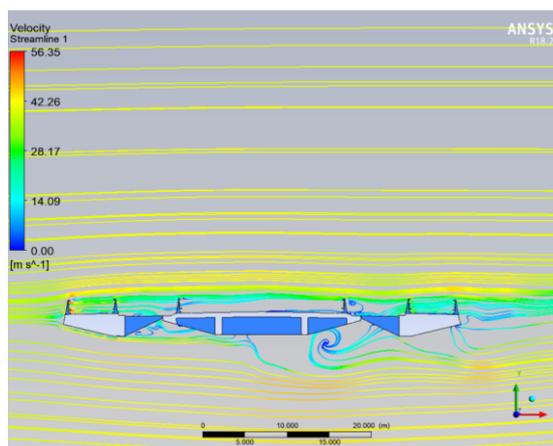


Figura 9. Vista frontal. Líneas de corriente.

4. Ensayo aeroelástico integral a escala real: la tormenta Ana

En diciembre de 2017 el Puente de Rande se vio afectado por el paso del temporal asociado a la borrasca atlántica “Ana”, que dejó a su paso fuertes vientos, con periodos de retorno del orden de 50 años e intensas lluvias. El frente principal del temporal empezó a entrar en la zona del puente hacia las 22:00 del 9 de diciembre, alcanzando su máxima intensidad durante la tarde del 10 de diciembre.

El puente se encontraba ya en su configuración estructural final, a falta únicamente de la colocación del pavimento y los pretiles.

El sistema de monitorización dinámica del puente permitió el registro de más de 90 eventos de carácter dinámico, almacenando variables dinámicas fundamentales como la velocidad y dirección del viento en el tablero y en la torre, la aceleración del tablero existente, así como la fuerza en determinados tirantes. Estos registros constituyen, por tanto, un verdadero ensayo aeroelástico del puente a escala real, para unas condiciones meteorológicas de escasa probabilidad de ocurrencia en la vida útil del puente.

La instrumentación del puente registró durante el temporal velocidades de viento (ráfagas) de 119 km/h a nivel de tablero y de 154 km/h en la coronación de la torre Norte.

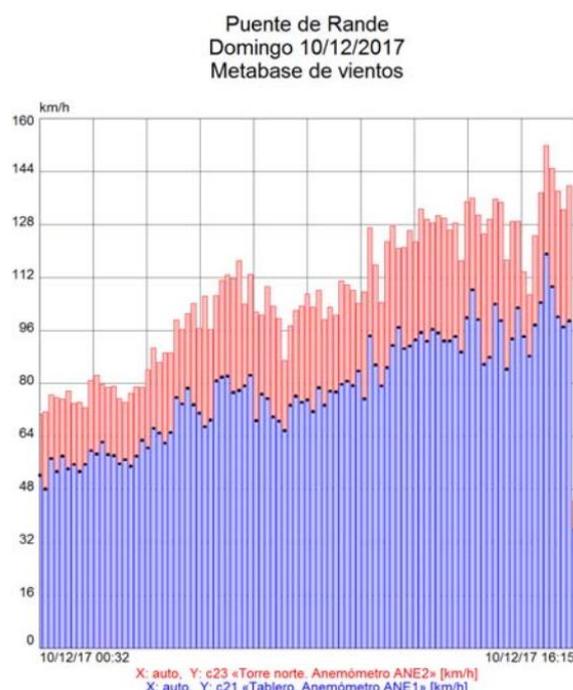


Figura 10. Registro de velocidades máximas (puntuales) en el tablero (azul) y coronación de torre Norte (rojo) a lo largo del día 10 de diciembre.

Las máximas aceleraciones registradas en los cuatro acelerómetros del tablero existente alcanzaron un pico de 0.106 g, si bien únicamente tres episodios registraron aceleraciones por encima de 0.050 g, valores estos dentro de los valores típicos en este tipo de eventos.

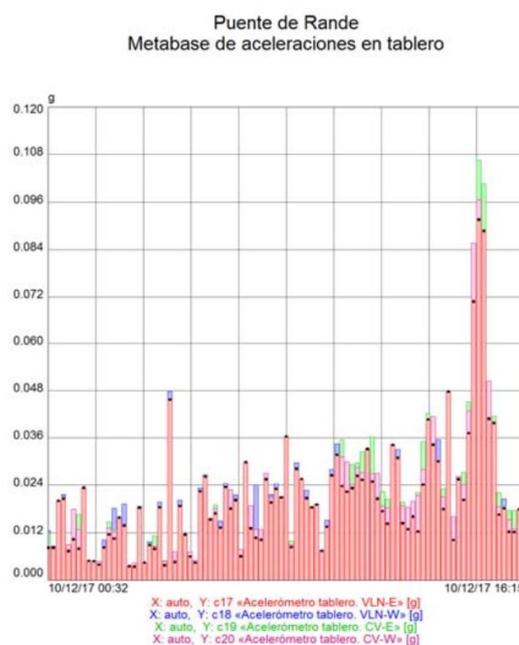


Figura 11. Máximos valores de aceleración vertical en los episodios dinámicos registrados.

Puente de Rande
Metabase de eventos dinámicos

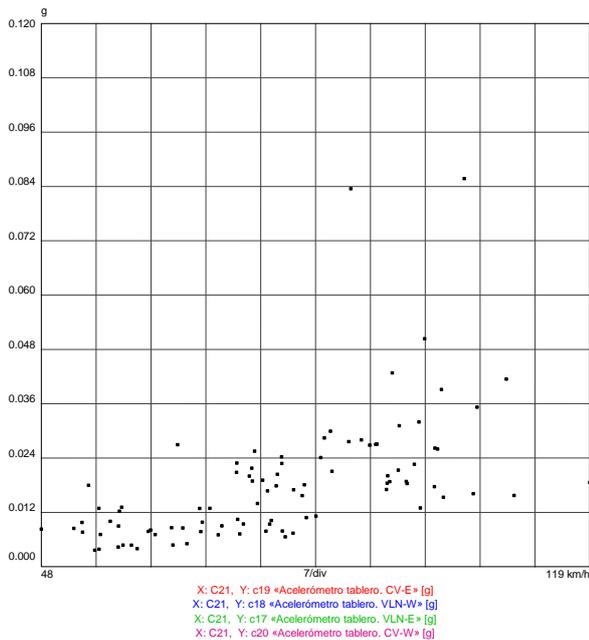


Figura 12. Correlación medida in situ entre aceleración en tablero y velocidad de viento.

Desde el punto de vista de la estabilidad de los tirantes, si bien se registraron aceleraciones significativas, pudo observarse que la variación de cargas en tirantes no es muy diferente en la fase de temporal frente a la variación de carga que experimentan en un día en calma bajo la sola acción del paso de vehículos y maquinaria de obra.

Por lo tanto, a la luz de los datos proporcionados por la instrumentación, no se ha detectado ningún comportamiento anómalo en la respuesta aerodinámica del puente, ni indicios de inestabilidad aerodinámica

4. Conclusiones

El Proyecto de Ampliación del Puente de Rande ha sido estudiado desde el punto de vista de su respuesta frente a la acción del viento bajo las técnicas más avanzadas de estudios analíticos, ensayos en túnel de viento y monitorización durante la construcción y en servicio que contempla el estado del arte en esta materia.

Además de los estudios realizados en fase de proyecto, que indicaban un buen

comportamiento aeroelástico del puente, en fase de obra se ha realizado un extenso programa de ensayos en túnel de viento en uno de los centros pioneros y más avanzados de análisis aeroelástico de puentes: *The Boundary Layer Wind Tunnel Laboratory* (BLWTL) en Western Ontario (Canadá).

Los ensayos realizados en un modelo muy avanzado de sección, para distintos niveles de turbulencia, y en configuración estática y dinámica, concluyen que el Puente de Rande en su configuración ampliada se puede considerar aerodinámicamente estable para eventos catastróficos (vibración inducida por vórtices, inestabilidad por aleteo y galloping) en el rango de velocidades de viento esperables en el sitio y periodos de retorno realistas.

Paralelamente a estos ensayos, los estudios analíticos llevados a cabo muestran resultados similares a los obtenidos en túnel de viento físico, no encontrándose velocidades de viento que potencialmente pudieran aparecer en la realidad susceptibles de generar inestabilidades aerodinámicas en el Puente de Rande.

Por último, la instrumentación de carácter dinámico dispuesta en el puente para el seguimiento de las fases constructivas (acelerómetros en tablero y tirantes y anemómetros en tablero y torre) ha permitido documentar un verdadero ensayo a escala real del puente en su configuración final, toda vez que quedaron capturados más de 90 eventos dinámicos frente al paso de la tormenta “Ana” el pasado 10 de diciembre. Esta tormenta provocó velocidades de viento máximas registradas en el tablero de 119 km/h y de 152 km/h en la torre, valores equivalentes a situaciones de periodo de retorno de 50 años. El comportamiento del puente en términos de aceleración máxima del tablero y variaciones de fuerza en los tirantes mostró un comportamiento normal para esta clase de eventos. Asimismo, no se observaron indicios de fenómenos aeroelásticos autoinducidos.

Agradecimientos

La Ampliación del Puente de Rande ha sido llevada a cabo por AUDASA, como Concesionaria de la Autovía, siendo el Ministerio de Fomento el propietario de la infraestructura. La construcción corrió a cargo de DRAGADOS y Grupo Puentes, bajo proyecto original de MC2. La asistencia técnica durante la construcción fue desarrollada por MC2 y WSP Spain, que estuvieron a cargo de la realización de los estudios de viento. El control estático y dinámico del puente a través de la instrumentación fue realizado por Kinesia Ingeniería.

Referencias

- [1] Ramos, OR., Astiz, M.A., et al.: Ensayos de viento para el Puente de la Constitución de 1812 sobre la Bahía de Cádiz. Hormigón y Acero, nº 278-279 (2016).
- [2] "Wind Tunnel Testing: A General Outline", The Boundary Layer Wind Tunnel Laboratory, The University of Western Ontario, May 2007.
- [3] Szabó, G., Györgyi, J., Kristóf, G.: Advanced flutter simulation of flexible bridge decks. Department of Structural mechanics, Budapest University of Technology and economics. June 2012.