

Original

Control operativo frente a los efectos del viento en la construcción del Puente de la Constitución de 1812 sobre la Bahía de Cádiz

Operational wind clima control for the construction of the Constitución de 1812 Bridge over the Cadiz Bay

José María Terrés-Nicolí ^{a,b,*} y Christian Mans ^b

^a Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. E.T.S de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Universidad de Granada, Granada, España

^b Dr. Ingeniero Civil, Oritia & Boreas Wind Engineering, Granada, España

Recibido el 10 de diciembre de 2015; aceptado el 13 de abril de 2016

Disponible en Internet el 20 de mayo de 2016

Resumen

Este puente es un ejemplo de proyecto en el que la acción del viento se convierte en una variable determinante de los estados límite de operación durante la construcción, así como de diseño último y de servicio. Para el adecuado diseño y control de estos estados se hace necesaria la implementación de un modelo de clima de viento de alta resolución. Estos modelos permiten el reanálisis histórico, para un mejor ajuste de la ley de probabilidad que determina las velocidades de diseño, así como su uso en modo operacional para la predicción de las condiciones en construcción. La calibración de este modelo y el control de las operaciones en obra se basa en la monitorización de alta resolución espacio-temporal de las condiciones de viento en el sitio. Este artículo describe el sistema implementado para el Puente de la Constitución de 1812.

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

Palabras clave: Modelo mesometeorológico operacional; Viento en construcción de puentes; Monitorización de viento; Predicción de viento

Abstract

Wind effects determine serviceability, ultimate as well as operational states in certain bridge structures such as the present. A high resolution wind clima model is often necessary in the assessment of these states. Design wind speeds probabilistic models and construction control can be both optimized by means of these models. Required model calibration and control requires specific wind monitoring at a sufficiently high spatial and time resolution. This article presents the system that was implemented for the Constitución de 1812 Bridge over the Cádiz Bay.

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

Keywords: Operational mesometeorological model; Wind in bridge construction; Wind monitoring; Wind forecasting

1. Introducción

El Puente de La Pepa, formalmente Puente de la Constitución de 1812, cruza la Bahía de Cádiz con una orientación aproximadamente NE-SO. Será el segundo puente que lo haga, después

del Puente Carranza, y uno de los puentes de mayor altura en Europa, con una luz máxima de 540 m y 5 km de longitud total [1,2].

La capa de rodadura se sitúa a una cota cercana a los 72 m. La exposición a la acción del viento es reseñable. Adicionalmente, el puente se ubica en una región dominada por vientos de intensidad relativa resultantes de borrascas derivadas de inestabilidades del frente polar y alisio en invierno y verano, respectivamente, e incluso derivaciones resultantes del pseudofrente mediterráneo. No en vano, las normas de construcción la sitúan próxima

* Autor para correspondencia.

Correos electrónicos: jterres@ugr.es, terresnicoli@oritiayboreas.com (J.M. Terrés-Nicolí).

a las isotacas de mayor valor de la península ibérica [3–5]. Esto, unido a la relativa flexibilidad de la estructura así como al procedimiento de construcción, recomienda la adecuada modelización y control del clima de viento en el sitio. Tanto para su diseño como para asegurar una ejecución fiable y eficaz.

El presente artículo describe la implementación de un modelo mesometeorológico de alta resolución desarrollado para el control operativo del viento en este puente en fase de construcción. El uso de modelos mesometeorológicos en modo operativo es habitual en sectores en los que la actividad está claramente afectada por las condiciones climáticas como el sector de la energía solar, eólica o del petróleo-gas. En ciencias de la atmósfera, normalmente se refiere a mesoscala para órdenes de pocos kilómetros a miles. En lo que respecta al viento, esta escala está, por tanto, desafectada de la aerodinámica local del puente o edificio de estudio, pero posiblemente de forma limitada por la topografía o rugosidad local. Hay varios factores que determinan la componente mesometeorológica en lo que interesa para la valoración de los efectos del viento en ingeniería civil. Entre ellos destacan: los balances de presión de la situación ciclónica o anticiclónica que gobierne, los gradientes de temperatura que a su vez modifican los anteriores, la inercia del aire en movimiento y la superficie del mar o tierra confinando el movimiento. Estos modelos se fundamentan y anidan en modelos globales dependientes del sistema tierra en su globalidad a escala macro-meteorológica (GFS, por ejemplo) y se adentran en una menor escala para un estudio a mayor resolución.

1.1. Condiciones de viento de diseño

El análisis de la carga estática de viento para el diseño así como la valoración de la estabilidad aerodinámica del puente requieren el conocimiento en detalle de las condiciones esperables mediante el correspondiente modelo probabilístico bivariado (dirección e intensidad). Este esquema ha de incorporar diferentes funciones probabilísticas para la predicción de vientos extremos condicionantes de las cargas de diseño o seguridad del paso de vehículos de los modelos que determinan umbrales de servicio para el confort [3]. Existen básicamente 2 vías de aproximación al problema. La primera, tradicional, consiste en el análisis de datos históricos provenientes de estaciones próximas como la de Jerez. La estación debe seleccionarse con cautela atendiendo a la calidad y continuidad de los datos, así como a su ubicación. El análisis normalmente se realiza mediante distribuciones de extremos como la Gumbel o, en función de los datos disponibles, como Weibull bimodal. Una vez ajustados los parámetros del modelo en sí, se transponen desde la ubicación y cota de la estación (normalmente 10 m) a la cota y ubicación de interés. Para ello se hace uso de las leyes de transformación de la capa límite por la progresión o transformación del terreno entre un punto y otro según la dirección de viento. Finalmente se ajusta la ley obtenida para el cumplimiento de la norma que corresponde.

Otra vía, de uso más reciente, consiste en el reanálisis de datos históricos resultantes de un modelo mesometeorológico. Estos datos permiten la modelización de las condiciones de viento con una resolución ajustable en función de la malla elegida y del

anidamiento al correspondiente modelo global. La bondad de la modelización podrá ser calibrada con las estaciones existentes en la zona, como la utilizada en el caso anterior. Una vez aceptada la modelización, se podrá adaptar la malla a la ubicación del puente para un mayor detalle de las condiciones de viento en las 3 dimensiones. En función de los recursos computacionales disponibles y de los plazos de estudio, se determinará la resolución de la malla y periodo de modelización. Es recomendable realizar un estudio previo limitado de las condiciones de modelización para asegurar la correcta implementación («benchmark»). Este modelo permitirá la correcta calibración así como la planificación de las subsecuentes simulaciones. Finalmente se podrá ampliar la resolución del modelo mediante técnicas de reducción progresiva de la escala o «downscaling» en las que no se atiende a la modelización física y, además, calibrarlas de forma progresiva (entrenamiento) a partir de las medidas obtenidas en el sitio («kriging»). No obstante, estos modelos precisan de una medida adecuada en el sitio durante un periodo representativo de tiempo, tal y como se describe en la sección siguiente.

Es preciso destacar las posibilidades que ofrece un modelo de esta tipología por la mayor precisión y adaptación a las condiciones de viento particulares del sitio, que deberá redundar en un diseño fiable y óptimo. Adicionalmente y como se explica más adelante, ofrece capacidades de implementación en modo operativo a la misma resolución para el control de las operaciones en construcción y del servicio en explotación. Se reseña aquí que las cargas aerodinámicas son proporcionales al cuadrado de la velocidad de viento de referencia, de ahí el interés en la detallada modelización de las condiciones de diseño.

1.2. Control del procedimiento de construcción

Las 2 pilas principales sobre las que se sustenta el tablero son idénticas, salvo en lo que se refiere a su parte inferior, pues mientras la pila 12, sobre el agua, tiene una altura total sobre el encepado de pilotes de 187,1 m, la pila 13, situada en el muelle de la Cabezuela, tiene una altura de 181,24 m. Durante el proceso de construcción se han instalado 2 carros de celosía por pila que portarán los *trolleys* para el izado de las dovelas que conforman el tablero. Estos carros van simplemente apoyados en el tablero con su marco delantero y cosidos con barras pretensadas en marco trasero. La carga en estas barras a modo de retenidas, 8 por carro, se monitorizaron igualmente de forma simultánea a las condiciones de viento.

El izado de cada dovela se lleva a cabo mediante 2 *trolleys* que se conectan a través de 4 cables colocados en las esquinas de la dovela. El proceso es muy lento y altamente sensible a las condiciones de viento (fig. 1), por lo que para garantizar la seguridad, fiabilidad y productividad de las operaciones se hace indispensable un sistema de monitorización de viento en tiempo real. Así, se dispusieron 4 estaciones autónomas en cada frente de izado, las cuales se describen en la sección siguiente.

Para ajustarse a los plazos de ejecución del proyecto y obra en el presente caso, se optó por un modelo de clima de viento fundamentado en primera instancia en el análisis de registros históricos de diversas estaciones próximas y, posteriormente, en la implementación de un modelo mesometeorológico, el cual



Figura 1. Control del viento en operación de izado de dovelas en Puente de la Constitución de 1812 sobre la Bahía de Cádiz.

fue calibrado y entrenado conforme se fueron acumulando los datos medidos en el sitio.

2. Equipo de monitorización y control

En esta sección se describen los elementos del sistema de monitorización y control que se implementó para la planificación de las operaciones de izado [6], el control de la seguridad durante ellas y la propia calibración y entrenamiento del modelo mesometeorológico predictivo.

2.1. Equipo de monitorización

Se estimó la necesidad de colocar un sensor de dirección e intensidad de viento por carro, de modo que hubiera una medida local de viento en cada uno de los 4 carros de izado. Con objeto de obtener las medidas lo menos influidas por la cercanía de la estructura, se optó por colocar dichos sensores en las esquinas exteriores de los carros de modo que estos quedaran dispuestos simétricamente respecto al centro de la pila (fig. 2). De forma específica se emplearon anemómetros sónicos Gill de 2 componentes y equipo de adquisición de datos de Campbell Sci. La

alimentación fue autónoma, mediante conexión a red disponible en los carros, pero con un relé automático para conexión a la placa solar, a la batería y al regulador incorporados en el equipo. El módulo solar fue dimensionado para asegurar la posibilidad de una medida a alta frecuencia de mayor consumo. Contando con una autonomía prevista de un mes sin carga (solar o cable), se programaron operaciones de mantenimiento con una regularidad de una al mes para comprobaciones varias, como de conexión y limpieza del módulo al salitre. La gestión de las comunicaciones fue igualmente inalámbrica con objeto de no gravar el coste con la progresivamente creciente necesidad de cableado al avance del tablero. No obstante, para asegurar su robustez se dispuso un *modem router* de repetición con tecnología wimax para obviar la dependencia de la señal de operadores de telecomunicaciones 3G/4G.

Los sensores proporcionan información de dirección e intensidad media y de ráfaga de viento con una cadencia diezminutal. La ubicación de los anemómetros hace que cada uno de ellos tenga asociado un sector en zona de sombra. Esto hace que la medida no sea fiable y que pueda ocasionar errores en la interpretación de los datos. Las diferencias se deben a que para determinadas direcciones el anemómetro queda en la estela de la pila y del carro. En estos casos, se suelen registrar una menor velocidad media y una mayor intensidad de turbulencia; son, por tanto, medidas no aceptables. Se justifica así la disposición de los anemómetros mostrada en la figura 2, donde las medidas del sector en zona de sombra de un anemómetro es compensado con las medidas del otro, y viceversa.

La disposición de los anemómetros y apantallamiento en el carro 13 fue similar; se observaron diferencias en la intensidad y direccionalidad medidas, coherentes con los elementos aerodinámicamente significativos de alrededor.

Las 8 retenidas por carro agrupadas en 2 grupos se dotaron de células de carga para el control de la operación de izado de forma simultánea a la medida de viento. Se emplearon células de compresión tipo donut diseñadas específicamente para este proyecto, que quedaron conectadas al mismo sistema de adquisición por grupo de anemómetro. Todas las medidas se centralizaron en los sistemas de adquisición de datos a alta frecuencia. La medida a una frecuencia de 1 Hz tuvo un doble propósito. Por un lado, permite la captura de la componente turbulenta en la medida,

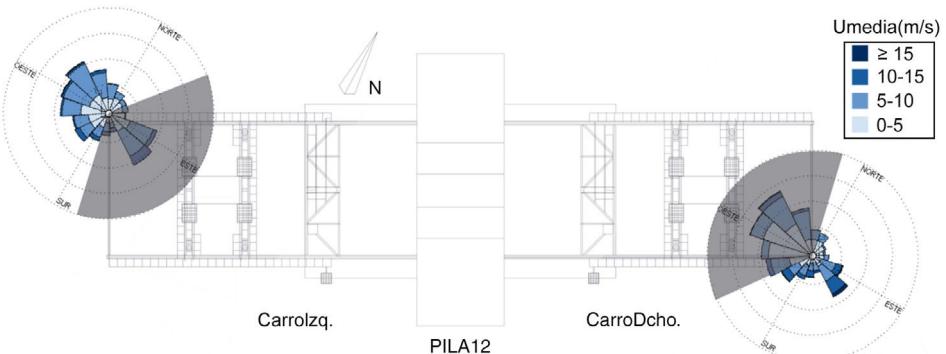


Figura 2. Ubicación de los 4 anemómetros utilizados para el control de las operaciones de izado y entrenamiento y calibración del modelo mesometeorológico empleado en el Puente de la Constitución de 1812 sobre la Bahía de Cádiz. Se presenta la pila 12; la ubicación en pila 13 fue equivalente (omitida aquí para mayor brevedad). La ubicación de ambos anemómetros coincide con el centro de las rosas de los vientos mostradas.

salvo lo que afecta al subrango disipativo (*fig. 4* Izqda.). Este puede, no obstante, ser corregido analíticamente. El interés por la captura de esta variabilidad estriba en su efecto en la acción dinámica y, por tanto, en el análisis de estados límite y últimos de diseño. Por otro, el acceso en tiempo real *in situ* al estado de solicitud de cada una permite un más eficaz desarrollo de las operaciones de carga, equilibrado y control de las retenidas durante las operaciones de izado de dovelas. Todas las medidas de viento y carga fueron accesibles en tiempo real vía ordenador y dispositivos móviles y resumidas en un informe diario enviado al personal implicado.

2.2. Validación y entrenamiento del modelo probabilístico y mesometeorológico operacional

El modelo climático de viento para este puente se fundamentó, en primer lugar, en el análisis de registros históricos disponibles en estaciones cercanas y, posteriormente, en un modelo mesometeorológico específicamente implementado para el proyecto. El modelo basado en registros históricos permitió una rápida implementación para los análisis preliminares de la acción del viento y del modelo mesometeorológico, una mayor precisión en la estimación de las condiciones en los distintos puntos del proyecto, así como su despliegue predictivo para el control de las operaciones en obra. A continuación se describen brevemente sus particularidades.

2.3. Modelo climático de viento fundamentado en registros históricos

A partir de la base de datos del National Climatic Data Center (NCDC) de EE. UU., se comparó la velocidad media y dirección del viento medida por el anemómetro 1 de la pila 13 con datos registrados en el aeropuerto de Jerez de la Frontera (LEJR; Lat. 36.75; Lon. -6.067°), ubicado aproximadamente a 25 km al noreste de la obra. En primer lugar, se procedió al correspondiente control de calidad de los datos con objeto de descartar los no aceptables y, en caso de los extremos y de no obtener un periodo suficientemente largo, la subsecuente selección del modelo probabilístico (Weibull bimodal).

Los datos del aeropuerto de Jerez de la Frontera, terreno tipo II ($z_0=0,3$), se han ajustado, conforme a la sección 4.3.2 del Eurocódigo (EN 1991-1-4:2005), para transponerlos a la altura del anemómetro en el carro ($z=72$ m) y el terreno tipo II o 0 según la dirección del viento (mar abierto, $z_0=0,01$ m). Esta transposición conlleva el ajuste de las condiciones de capa límite atmosférica esperables en el sitio y su desarrollo según la dirección e intensidad desde las condiciones de la estación referida. La medida continuada permitió el ajuste en precisión de la estructura de capa límite.

El análisis de las series temporales del viento medidas por el anemómetro desde las primeras semanas permitió la cuantificación del efecto local de la ubicación del punto de medida. Se observó que las zonas de sombra no se ajustan tan bien como lo hacen los que están fuera de ella, por lo que era necesario contrastarlos con los del anemómetro 2, en el otro carro de la misma pila, tal y como se hizo posteriormente. Las diferencias

resultaron más o menos significativas en función de la intensidad y de la dirección.

De esta forma, y a partir de las condiciones en cada momento, se pudo cuantificar un factor de corrección, además de seleccionar la estación en función de la operación que controlar en obra. Adicionalmente permitiría una posterior calibración y entrenamiento continuado del modelo mesometeorológico.

2.3.1. Modelo mesometeorológico predictivo

Una vez realizado el análisis preliminar del clima fundamentado en la traspósición de datos históricos de la estación de Jerez, se procedió al desarrollo de un modelo mesometeorológico a escala de 1 km que permitiría una mayor resolución espacial, así como la posterior implementación de un modelo predictivo para la planificación y control de las operaciones en obra. El esquema físico empleado fue el americano, de acceso libre, WRF [7], de uso común en sistemas operacionales y reanálisis como alternativa al europeo Hirlam-Harmonie [8], empleado por la mayoría de las agencias meteorológicas europeas como la AEMET. El WRF se configuró para 2 pasos de anidamiento, seguido por un anidamiento estadístico de reducción progresiva de la escala («downscaling»):

1. Una primera simulación de 15 km de resolución horizontal y 28 niveles verticales, denominado WRF15, simulando el comportamiento atmosférico de la península ibérica.
2. Una segunda simulación de 5 km de resolución horizontal del estrecho de Gibraltar, denominado WRF05.
3. A partir de los resultados del modelo WRF de resolución 5 km, se procede a definir la metodología de «downscaling» estadístico para llegar a la resolución final de $1 \times 1 \text{ km}^2$, objetivo del estudio. Este producto es el ejecutado en modo operacional para el sistema predictivo.

La *figura 3* resume el esquema global de desarrollo del modelo. El modelo resultante de alta resolución espacio-temporal se implementó en modo operacional utilizando unos recursos computacionales en Oritia & Boreas consistentes en un clúster de 122 nodos, Intel Xeon E5-2683, 2 GPU de 4.000 núcleos y coprocesadores Intel Phi 7120P. Como resultado, se obtuvieron diariamente predicciones horarias para las 36 h siguientes y cada 6 h para las 96 h posteriores. Con una regularidad diaria, a las 8:00 am se envió al personal designado un informe de previsión de condiciones, anexo al de medidas referido en el apartado anterior. Esto permitió la adecuada planificación de las operaciones de izado para una mayor seguridad y productividad. Asimismo, se programaron alarmas de previsión y alarmas en tiempo real resultantes en los correspondientes correos electrónicos al personal implicado. En general, se observó una tasa de éxito satisfactoria al comparar posteriormente con las medidas reales, especialmente en las predicciones a 36 h. La tasa de éxito creció conforme se acumuló una mayor recogida de datos de entrenamiento de los parámetros del modelo y «downscaling».

Es sabido que los frentes de borrasca y vientos de mayor intensidad, en general, representan un mayor reto para las herramientas de predicción (por sub- y sobreestimación

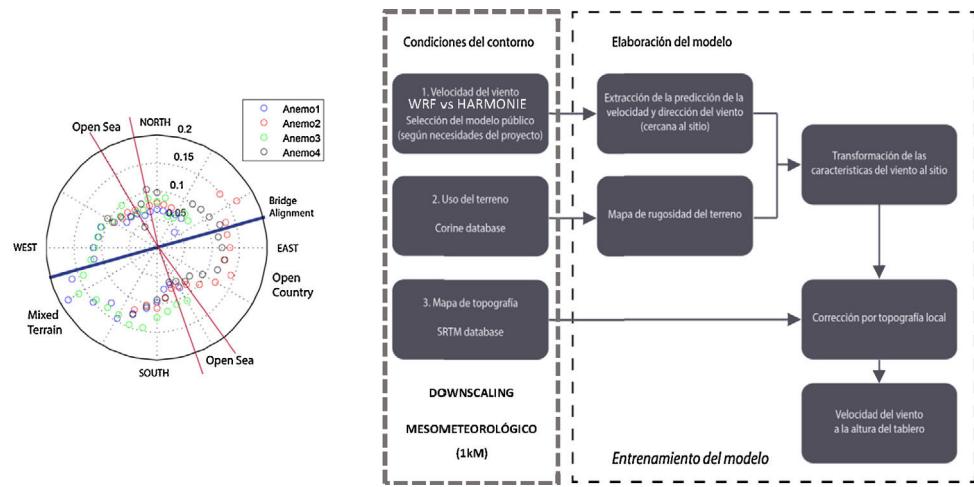


Figura 3. A la izquierda, estimaciones de turbulencia preliminares sin corrección en escala disipativa obtenida mediante factor de ráfaga obtenida a partir de las medidas in situ. En la imagen de la derecha, esquema de análisis, calibración, «downscaling» y entrenamiento seguido en el modelo mesometeorológico predictivo.

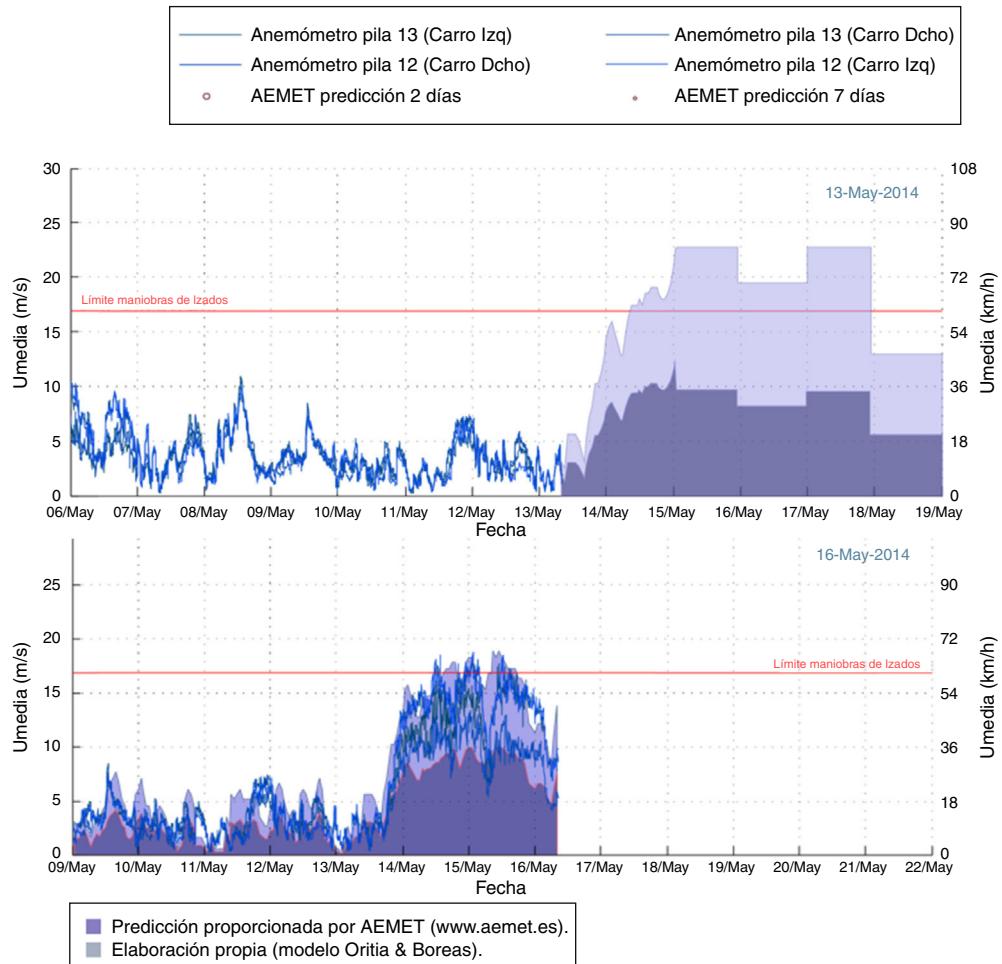


Figura 4. Ejemplo de predicción de viento local en régimen de tormenta. Días 14 y 15 de mayo de 2014. El gráfico superior muestra, ampliada, la predicción del modelo descrito para una tormenta (sombreados claros). Las primeras 36 h a alta resolución y las 96 siguientes a baja. Las líneas continuas muestran las medidas de los anemómetros. La figura inferior presenta para esta tormenta las medidas que finalmente se produjeron comparadas con las predicciones que precedieron los días antes, que recomendaban la interrupción de las maniobras de izado. Se puede observar el contraste con la predicción de una malla más gruesa no adaptada al sitio como la que se puede obtener directamente de la AEMET (sombreado oscuro).

indistintamente). La figura 4 (arriba) recoge el viento medido por las distintas estaciones con carácter previo a la tormenta que se traslada por el eje del puente a partir del día 13/05/14 seguido de la predicción para las horas siguientes (en sombreado). Se compara (más oscuro) la predicción de un modelo de baja resolución (AEMET fundamentado en HIRLAM 36 km) con el de alta resolución implementado para este proyecto (WRF 1 km). En la figura 4 (inferior) se puede apreciar la capacidad del modelo adaptado para la predicción de los vientos de alta intensidad desarrollados con el paso de esa tormenta y que obligaría al cese de operaciones durante 3 días a partir de 36 h.

3. Conclusiones

Se ha presentado un sistema de monitorización y predicción de condiciones de viento que ha demostrado la utilidad en el control de la seguridad y productividad de las operaciones en la construcción del puente afectadas por las condiciones climáticas. Así, se implementó la medida simultánea de viento y carga en retenidas de carros de izado que demostró su utilidad en el control de las operaciones de izado de dovelas, así como en las demás operaciones afectadas por las condiciones de viento. La disposición de diversos anemómetros midiendo a alta frecuencia y estratégicamente ubicados permitieron una mejor valoración de estas condiciones, así como la calibración y entrenamiento de un modelo de predicción de alta resolución. Este modelo entrenado de forma secuencial produjo predicciones de las condiciones de viento con alta fiabilidad a 36 h y fiabilidad adecuada a 96 h durante todo el transcurso de la obra. Los informes de medición y predicción se remitieron de forma automática con regularidad horaria. El modelo climático así calibrado se utilizó para una valoración más precisa de las condiciones que se deben analizar en los distintos modelos físicos estudiados en túnel de viento.

Agradecimientos

Se aprovecha este espacio para agradecer el interés y participación de distinto personal por parte de la dirección de obra (Ministerio de Fomento), Sr. Fernando Pedrazo, del personal responsable de la ejecución (Dragados), Sres. Eduardo Gutiérrez García y Daniel Sánchez así como del personal técnico de Oritia & Boreas, Sres. Jéssica Esther García Navarro, José Manuel López Collantes y Enrique Benítez López.

Bibliografía

- [1] J. Manterola Armisén, A. Martínez Cutillas, Concepción general del proyecto del Puente de la Constitución de 1812 sobre la Bahía de Cádiz, *Hormigón y Acero* 67 (2016) 1–19.
- [2] A. Martínez Cutillas, J.A. Navarro González-Valerio, S. Fuente García, Proyecto y descripción del tramo atirantado del Puente de la Constitución de 1812 sobre la Bahía de Cádiz, *Hormigón y Acero* 67 (2016) 71–85.
- [3] O.R. Ramos Gutiérrez, M.A. Astiz Suárez, S.O. Hansen, J.M. Terrés-Nicolí, J. Meseguer, Ensayos de viento para el Puente de la Constitución de 1812 sobre la Bahía de Cádiz, *Hormigón y Acero* 67 (2016) 245–253.
- [4] IAP-11 Instrucción sobre las acciones a considerar en el proyecto de puentes de carretera. Ministerio de Fomento, Gobierno de España (2011).
- [5] IAPF-2010 Instrucción de acciones a considerar en puentes de ferrocarril. Ministerio de Fomento, Gobierno de España (2010).
- [6] L. Peset González, C. Lucas Serrano, J. de los Ríos de Francisco, J.M. González Barcina, Maniobras singulares en el tramo atirantado del Puente de la Constitución de 1812 sobre la Bahía de Cádiz, *Hormigón y Acero* 67 (2016) 123–142.
- [7] Skamarock W.C., Klemp J.B., Dudja J., Gill D.O., Baker D.M., Duda M.G., et al., A description of the advanced research WRF versión 3. NCAR Tech Note NCAR/TN-475+STR (2008) 125.
- [8] Hirlam.org, Harmonie General Model Description. [consultado 8 Ene 2016]. Disponible en: <http://hirlam.org/index.php/hirlam-programme-53/general-model-description/mesoscale-harmonie>.