

Seguimiento de la instrumentación del viaducto de Almonte

Monitoring of the Almonte Viaduct during construction

José Luis Martínez Martínez^a y Pedro Niño García^a

^a Dr. Ingeniero de Caminos, C. y P. Ines Ingenieros Consultores

Recibido el 25 de mayo de 2018; aceptado el 25 de octubre de 2018

RESUMEN

Se expone el procedimiento del seguimiento de la instrumentación del viaducto sobre el río Almonte junto con algunos resultados relevantes. La asistencia técnica y tratamiento de datos de instrumentación se desarrollan a la vez en los dos grandes arcos de hormigón ferroviarios de la LAV a Extremadura: viaducto de Almonte y del Tajo. Se describe el contenido de las variables instrumentadas y el procedimiento para integrar los datos de las distintas fuentes y su procesado periódico, coincidiendo con las fases cíclicas de la obra. Se presentan algunos resultados representativos con particular atención en la instrumentación del viento por su incidencia en la construcción, especialmente en los tirantes provisionales, de gran longitud en las fases finales. El artículo termina con algunas reflexiones sobre la normalización de la instrumentación de grandes infraestructuras y su continuidad en la fase de explotación y mantenimiento de la construcción.

© 2020 Asociación Española de Ingeniería Estructural (ACHE). Publicado por Cinter Divulgación Técnica S.L.L. Todos los derechos reservados.

PALABRAS CLAVE: Arco de hormigón, instrumentación.

ABSTRACT

The procedure for monitoring the construction process of the viaduct over the Almonte River is presented together with some relevant results. The technical assistance and data processing of instrumentation is developed at the same time in the viaducts of Almonte and Tajo, both large concrete railway arches. The nature of the monitored variables and the procedure to integrate the data from different sources and their periodic processing are described, coinciding with the cyclic stages of the construction. Some representative results are presented with particular attention in wind response for its incidence in the provisional cables which were very long in the final phases. The paper ends with some reflections on the standardization of the monitoring of large infrastructures and its continuity in the exploitation and maintenance stage.

© 2020 Asociación Española de Ingeniería Estructural (ACHE). Published by Cinter Divulgación Técnica S.L.L. All rights reserved.

KEYWORDS: Concrete arch, structural monitoring.

1. INTRODUCCIÓN

La construcción del viaducto sobre el río Almonte se desarrolló en paralelo con la del viaducto sobre el río Tajo, un pariente cercano en lo tipológico y en lo geográfico ya que está situado en la misma línea a menos de 4 km de distancia (figura 1).

En vista de esta circunstancia, Adif decide incorporar una asistencia técnica complementaria a la ACO en materia de estructuras a ambas obras. El objetivo de esta asistencia es aprovechar mutuamente las experiencias de las dos obras y unificar

en lo posible criterios y procedimientos. Las tareas principales que se desarrollan son las siguientes:

- Seguimiento del comportamiento de las estructuras. Para ello se hace una revisión continua de la instrumentación, que se hacía, como se ha explicado en otro artículo, por duplicado por parte de la constructora y de las asistencias técnicas a la Dirección de Obra.
- Estudio de los medios auxiliares en ambas obras: control de proyecto y puesta en obra
- Incidencia de las variables climáticas, en particular de los

* Persona de contacto / Corresponding author.
Correo-e / email: jmartinez@fcc.es (José Martínez Salcedo)



Figura 1. Imagen aérea de la línea LAV Madrid-Extremadura en el entorno del embalse de Alcántara.

efectos del viento sobre las estructuras durante la construcción.

La asistencia y control (ACO) fue ejercida por la UTE Idom-Arenas y la asistencia complementaria por Ines Ingenieros. En este artículo se presenta un resumen de los trabajos desarrollados y las conclusiones obtenidas.

2. DESCRIPCIÓN DE LAS INSTRUMENTACIONES UTILIZADAS

El sistema de instrumentación está en realidad compuesto por dos sistemas, el del arco norte y el del sur, cada uno de ellos con un gran número de variables cambiantes a lo largo de la construcción. Es por tanto un conjunto de datos complejo y voluminoso con orígenes diferentes. Concretamente, en cada uno de los dos arcos se tienen las siguientes variables:

- Topografía
 - o Clavos de nivelación topográfica de cimentaciones, 30 uds.
 - o Prismas topográficos en pilas, tablero y torres provisionales, 24 uds.
 - o Dianas topográficas en dovelas, 192 uds.
- Instrumentación de Empírica-Metiri
 - o Clinómetros en zapatas, pilas y torres provisionales, 10 uds.
 - o Galgas extensométricas en dovelas y torres, 92 uds.
 - o Termopares en pilas, dovelas, tirantes, y ambiente, 42 uds.
 - o Extensómetros de varillas enterrados, 6 uds.
 - o Células de carga en anclajes al terreno, 8 uds.
 - o Velocidad y dirección del viento, 1 ud.

Figura 2. Entrada de datos para la generación de un informe de instrumentación automatizado en la aplicación desarrollada.

De esta forma, el número de variables recogidas entre ambos semarcos alcanza los 800. Estos datos provienen de fuentes distintas y se recogen con distinta frecuencia, desde una lectura cada hora hasta una lectura a la semana. Si bien es cierto que los datos de la instrumentación electrónica están accesibles en línea de forma inmediata, también lo es que estos datos se descargan en bruto y que es necesario ordenarlos temporalmente, relacionarlos entre sí y compararlos con los umbrales de aviso y alerta prefijados.

Antes y después de cada operación de hormigonado y de avance de carro es necesario revisar toda la instrumentación para comprobar que todos los parámetros están en el rango esperado. Por estas razones se hace imprescindible disponer de una herramienta informática que permita recopilar instantáneamente el historial de todas las variables entre dos fechas o fases de obra y presentar un informe automatizado que detecte además cualquier valor que haya sobrepasado un umbral prefijado. En la obra del viaducto de Almonte se empleó una aplicación desarrollada exprofeso para las obras de este viaducto y para las del vecino viaducto del Tajo (figura 2).

3. VARIABLES INSTRUMENTADAS DURANTE LA CONSTRUCCIÓN

Durante las obras existía un seguimiento de la geometría del viaducto por medio de topografía clásica manual que proporcionaba la geometría del puente en un momento determinado. Normalmente, se realizaba una lectura periódica semanal a primera hora de la mañana para evitar los efectos de los gradientes térmicos y lecturas especiales relativas a movimientos originados por alguna actividad que produjese una carga en la estructura (tesado de tirantes, hormigonado de dovelas, etc.). Para estas lecturas especiales se hacía una medición justo antes y otra justo después de la actividad en cuestión. Por este motivo, no era posible eliminar los efectos térmicos de las lecturas tomadas sino que era necesario tenerlos en cuenta a través del modelo de cálculo evolutivo del viaducto.

Las variables que se medían con topografía eran las siguientes:

- Movimiento en zapatas de retenida. A través de clavos de nivelación ubicados en las esquinas de la cara superior de las zapatas. De esta forma, se podía obtener la deformación y giro de las zapatas.
- Movimiento de cimentación del arco. Mediante extensómetros de varillas insertados en el trasdós de los cimientos del arco introducidos a tres profundidades diferentes (7, 17 y 27 m) que permitían conocer el asentamiento del terreno bajo el arco.
- Movimiento de pilas de retenida y pilastras. Mediante prismas topográficos que se ubicaban en diferentes alturas de las pilas de retenida. De esa forma, se obtenía el movimiento y giro de dichas pilas tanto en sentido longitudinal como en transversal.
- Movimiento de torres de atirantamiento. El proceso era similar al de las pilas de retenida.
- Movimiento de dovelas. A través de dianas topográficas emplazadas en algunos vértices de las mismas permitiendo la obtención del movimiento y giro de cada dovela.



Figura 3. Situación del viaducto en el embalse de Alcántara.

Además de topografía clásica se colocó una instrumentación robotizada que obtenía medidas instantáneas de los diferentes sensores obteniéndose lecturas de las variables cada 10 minutos.

Los diferentes sensores colocados en la estructura fueron los siguientes:

- Sensores climáticos: compuestos por una estación meteorológica y un anemómetro que miden las variables de humedad relativa, temperatura del aire, radiación solar y velocidad y dirección del viento.
- Células de carga en anclajes al terreno.
- Clinómetros en pilas y torres de atirantamiento.
- Termopares en dovelas, tirantes y torres de atirantamiento.
- Bandas extensométricas en armaduras de dovelas.
- Bandas extensométricas en barras de anclaje de tirantes.

4. ALGUNAS CONCLUSIONES SOBRE EL COMPORTAMIENTO DEL ARCO A TRAVÉS DE LA INSTRUMENTACIÓN

Análisis de la instrumentación relativa al viento

El viaducto sobre el río Almonte se emplaza próximo a la desembocadura de dicho río con el embalse de Alcántara con una orientación aproximada NE-SO (figura 3). La rasante del tablero se encuentra aproximadamente a unos 80 m de altura con respecto al río Almonte y la coronación de las torres de atirantamiento provisionales a unos 135 m. Debido a esta situación y a sus características geométricas, esta estructura se encuentra muy expuesta a un viento muy laminar y con poca turbulencia al tener una longitud de fetch próxima a los 4 km.

Este tipo de régimen de viento es un buen candidato para causar ciertos tipos de inestabilidades aeroelásticas como el ga-



Figura 4. Fotograma de un video tomado en obra durante un episodio de vibraciones con amplitudes de unos 500 mm en el tirante situado a la izquierda de la imagen.

lope, especialmente en cables de gran longitud no protegidos por una vaina circular [1]. De hecho durante la construcción se observaron y documentaron varios episodios de vibración a velocidades del viento relativamente bajas (figura 4).

Todos estos condicionantes hacen que sea fundamental una instrumentación que permita conocer las variables de intensidad y dirección del viento en cada momento. En paralelo a las medidas automatizadas, se hicieron análisis numéricos, medidas de frecuencia y amortiguamiento en tirantes, se proporcionaron elementos de apoyo auxiliares a los bastidores de anclaje de los cables y se prepararon e instalaron amortiguadores de masa sintonizada para prevenir vibraciones excesivas en los cables.

Se realizó un análisis de los registros de viento obtenidos a través de un anemómetro con veleta. Con objeto de obtener las medidas lo menos influenciadas posible por la cercanía de la estructura y medios auxiliares, esta instrumentación fue ubicada en el mástil de una grúa torre a unos 15 m de altura sobre el tablero.

El anemómetro recogía 20 lecturas por minuto pero en el proceso de monitorización solo se proporcionaba una lectura cada 10 minutos, valor promedio en todo el intervalo, siendo este un dato muy representativo del estado de viento en cada fase de obra. Los datos que se medían eran la velocidad y la dirección del viento.

Analizando un amplio rango de medidas se realizó un estudio estadístico agrupando los datos según diferentes filtros: hora del día, estación del año, rango de velocidades y dirección del viento (figuras 5, 6 y 7).

Además, se realizó un análisis de los registros de viento obtenidos y de la velocidad crítica teórica del viento que podían producir oscilaciones en los tirantes debido al fenómeno de desprendimiento de remolinos, recogida en el Eurocódigo 1 en su Anexo E (figura 8).

Según el gráfico del porcentaje de tiempo que sopla el viento por rango de velocidad, se observaba que el 30% del tiempo el viento tenía una velocidad menor de 5 km/h y por tanto posible de excitar a los tirantes de las familias 9 a 26, el 23% del tiempo tenía una velocidad de entre 5 y 10 km/h que podría excitar a las familias de la 3 a la 8 y aproximadamente un 14% del tiempo el viento soplaría entre 15 y 20 km/h lo que podría excitar a los tirantes de tiro 1 y 2 de ambas ramas

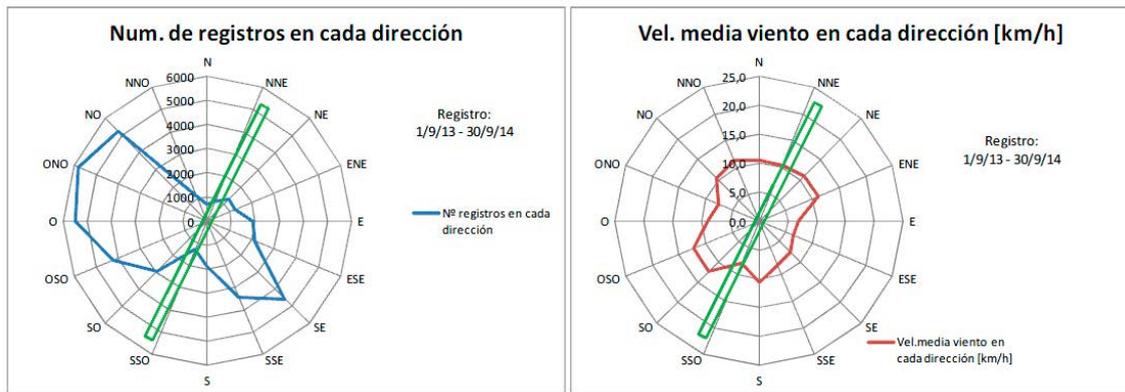


Figura 5. Gráficos de registros de viento eliminando las calmas ($v < 1$ km/h). El viaducto, en planta, se representa por un rectángulo de color verde.

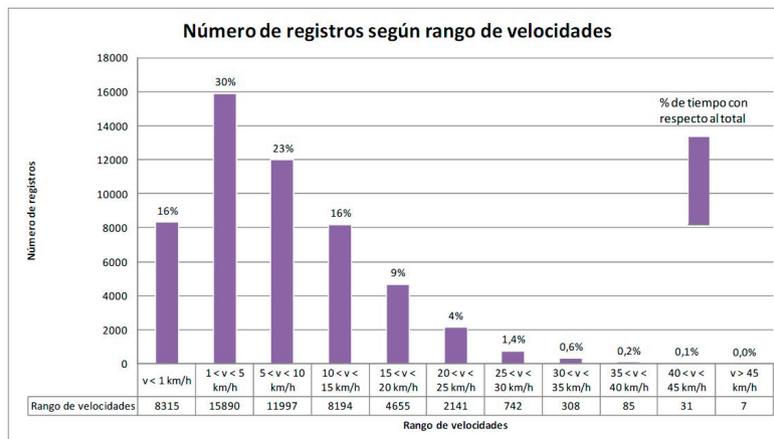


Figura 6. Distribución de registros por velocidades del viento.

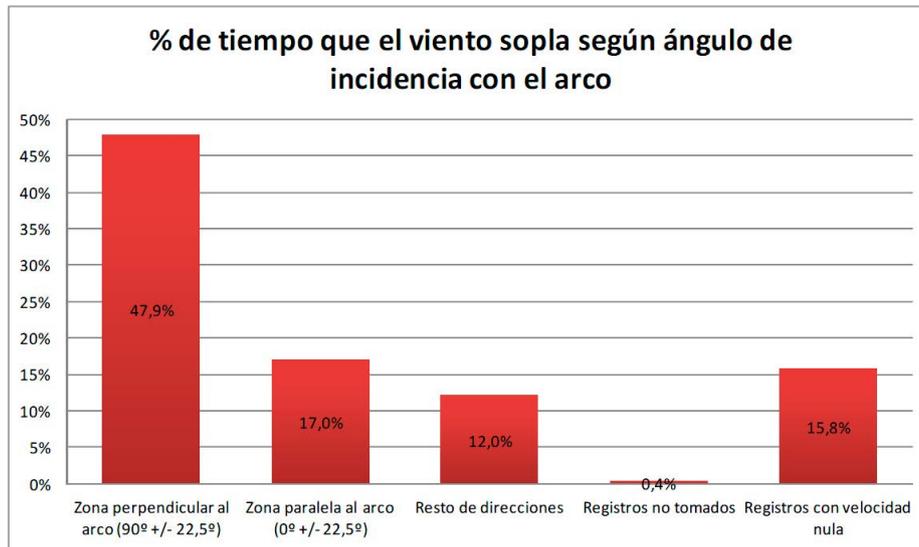


Figura 7. Frecuencia de direcciones del viento. Se aprecia la prevalencia de la dirección perpendicular al plano del arco.

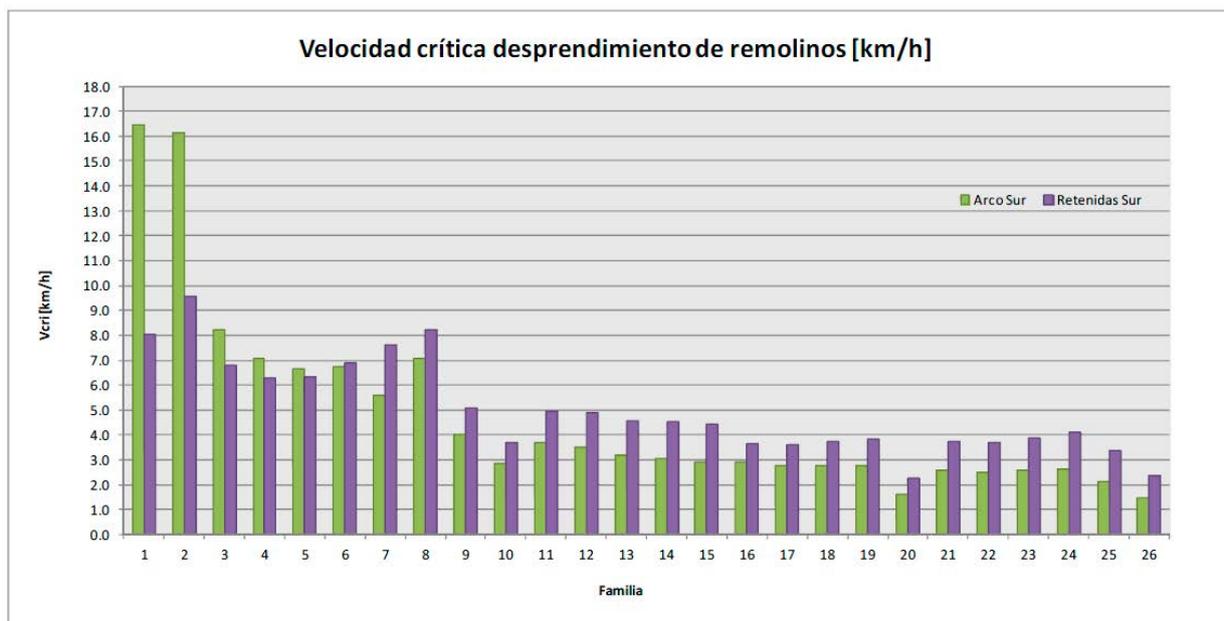


Figura 8. Velocidad crítica teórica de desprendimiento de remolinos para los 26 familias de tirantes del arco y de retenida.

Principales conclusiones generales del análisis de los registros de viento

- **Datos totales:** el número de registros total casi se concentra en la dirección principal (ONO – ESE) coincidente con la del río al desembocar en el embalse y que es perpendicular al viaducto. Además se observa que existe un mayor número de registros de viento que sopla desde el lado del embalse que desde el opuesto. La velocidad media es mayor cuando sopla desde el lado del embalse que desde el río.
- **Día/Noche:** por el día sopla más desde el lado del embalse y por la noche desde el lado contrario aunque la velocidad es mayor por el día.
- **Estaciones:** el viento sopla diferente según la estación en la que nos encontramos. En otoño, primavera y verano

sopla con mayor frecuencia desde el lado del embalse y en invierno desde el lado contrario.

- **Rango de velocidades:** se observa que en la dirección principal del lado del embalse el rango de velocidades con las que el viento sopla es mayor.
- **Dirección de incidencia:** la dirección más predominante con la que sopla el viento es la perpendicular al arco con un 48% del tiempo total. En la dirección que incide casi paralela al arco solo sopla un 17% del tiempo.

Análisis del comportamiento de la estructura tras el tesado previo y hormigonado de cada dovela

El proceso constructivo tipo en cada fase constaba de las siguientes tareas:

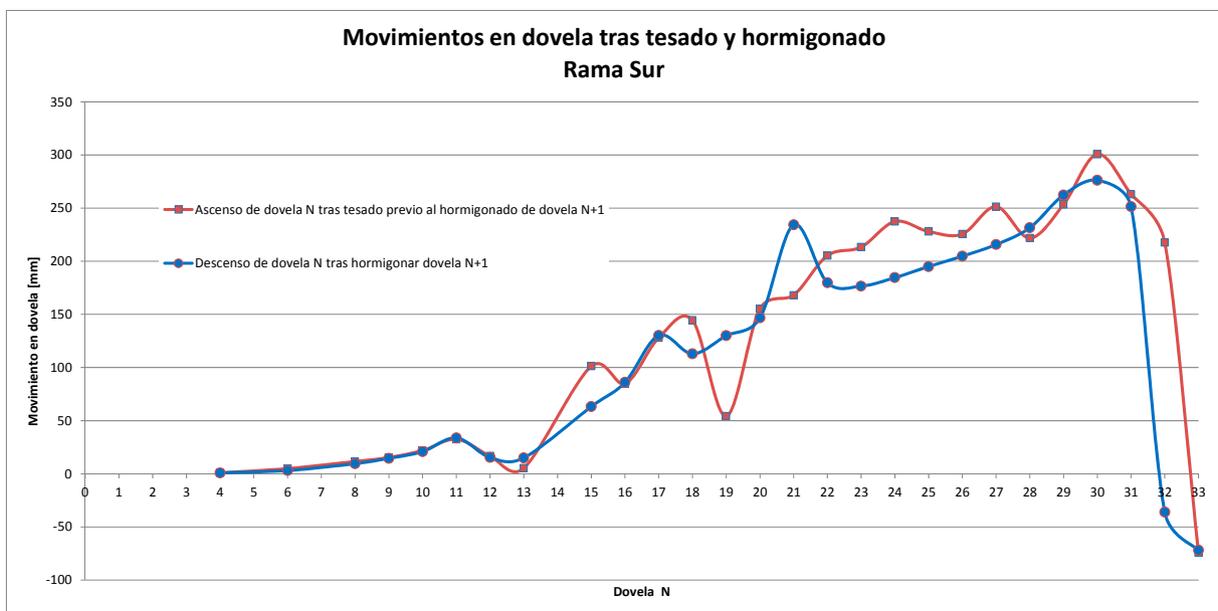
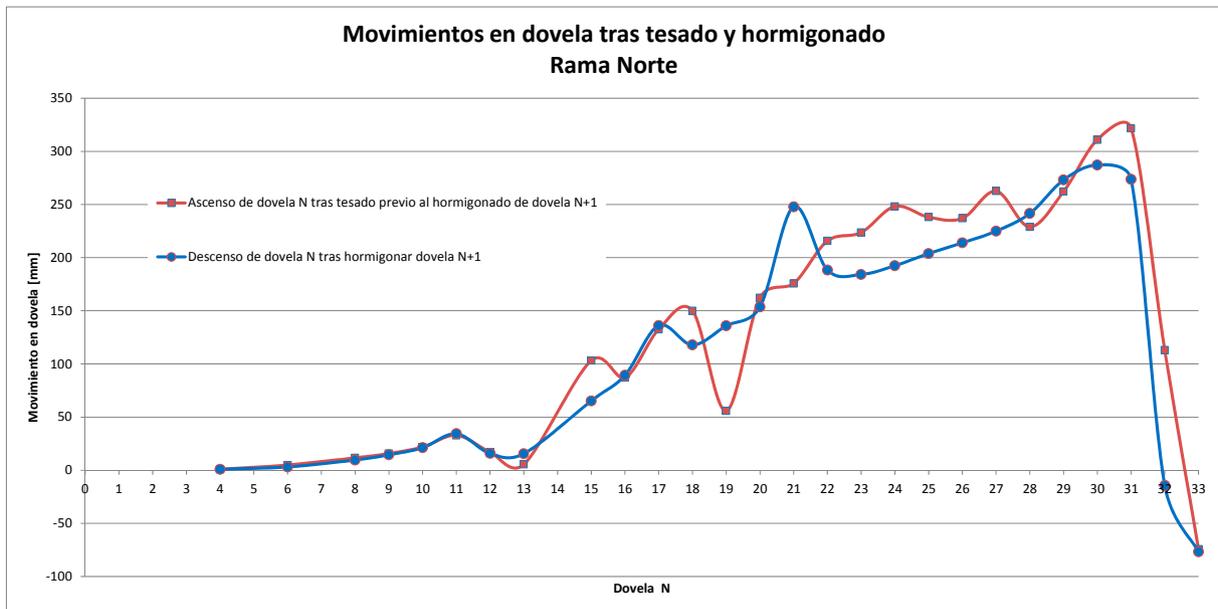


Figura 9. Movimientos en la dovela tras las fases de tesado (ascenso) y tras el hormigonado (descenso) en las ramas norte y sur.

- Avance del carro de hormigonado y posicionamiento para hormigonado en la dovela N.
- Trabajos de ferralla de dovela N.
- Tesado del tirante de la última dovela hormigonada N-1.
- Hormigonado de dovela N.

Atendiendo al valor absoluto del movimiento de cada dovela en estas mismas fases (sin tener en cuenta los efectos térmicos) se observa como en la fase de tesado previo a un hormigonado y la fase posterior de hormigonado, la dovela anterior a la recién hormigonada sufre un ascenso tras el tesado muy similar al descenso que se produce con el hormigonado tal como se puede ver en la [figura 9](#).

Los datos de la dovela 33 son tras el destesado de tirantes y retirada de grúas sobre el arco.

La [figura 10](#) muestra las temperaturas en el interior del arco en el instante de hormigonar cada dovela. La temperatura que se tomó de referencia para el cálculo de los efectos térmicos fue 16°C. Las diferencias entre esta temperatura y la teórica se medían e introducían en el procedimiento corrector de la posición del carro de hormigonado.

Análisis del comportamiento de la estructura en tesados y retesados

Tras el tesado de cada tirante, se procedía al análisis de las lecturas de los sensores que *a priori* se podían ver afectados por el tesado para comprobar que se comportaban según lo esperado teóricamente.

Primeramente, se comprobaba que la relación entre las car-

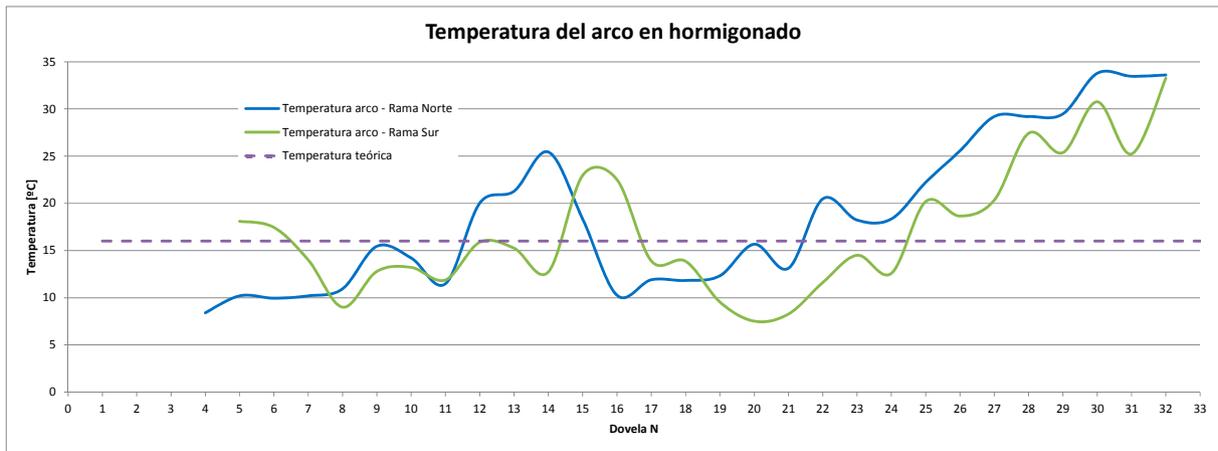


Figura 10. Temperaturas interiores del arco en ramas norte y sur durante los hormigonados de las dovelas comparadas con la temperatura teórica considerada en proyecto.

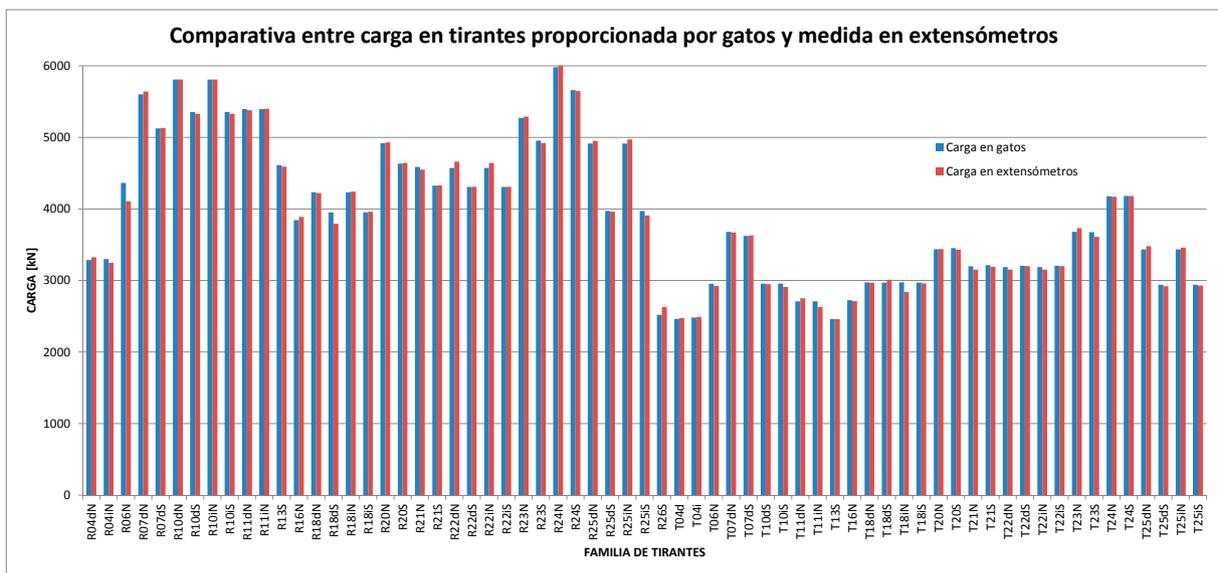


Figura 11. Carga de tesado de los tirantes [kN]. Medida en gatos y en los extensómetros.

gas aplicadas a los tirantes a través de los gatos y la que medían los extensómetros colocados en barras roscadas de acero de alto límite elástico de los bastidores no fuera muy diferente. De esta forma, se podía confirmar si la evolución de las cargas en tirantes era conforme a proyecto. Además, se hacía un análisis de los elementos constructivos afectados por cada tesado (torres de atirantamiento, pilas de atirantamiento y retenida y sus cimentaciones) que estaban instrumentados o de los que se tomaba su topografía periódicamente.

La figura 11 muestra la carga aplicada con gatos hidráulicos para el tesado de los tirantes y la lectura que tomaron los extensómetros colocados en ese momento. Se observa que el desfase de la medida que obtenían los extensómetros con la aplicada por los gatos era muy reducido en todos los casos.

Resumen del análisis realizado tras tesados de tirantes:

- La carga aplicada a los gatos de tesado coincide en líneas generales con la lectura obtenida de los extensómetros ubicados en las barras roscadas de los bastidores.

- Las células de carga colocadas en los anclajes al terreno de las zapatas de retenida no mostraban cambios apreciables tras los hormigonados y tesados.
- Las pilas de atirantamiento y retenida no sufren movimientos apreciables tras el tesado de tirantes.
- La torre de atirantamiento sí que experimentaba movimientos considerables durante el hormigonado y tesado de los tirantes al ser un elemento mucho menos rígido (con rótula en su base). Cuando se tesaba, la torre se inclinaba hacia el tablero y después del hormigonado de la dovela volvía a quedarse en situación similar a como estaba antes.

La figura 12 muestra la evolución temporal en un periodo de 13 días de los clinómetros longitudinal y transversal y su relación con los umbrales prefijados. El clinómetro longitudinal muestra pequeñas variaciones diarias debidas al incremento uniforme de temperatura. Los valores registrados están contenidos entre los umbrales de estudio y parada por lo que esta

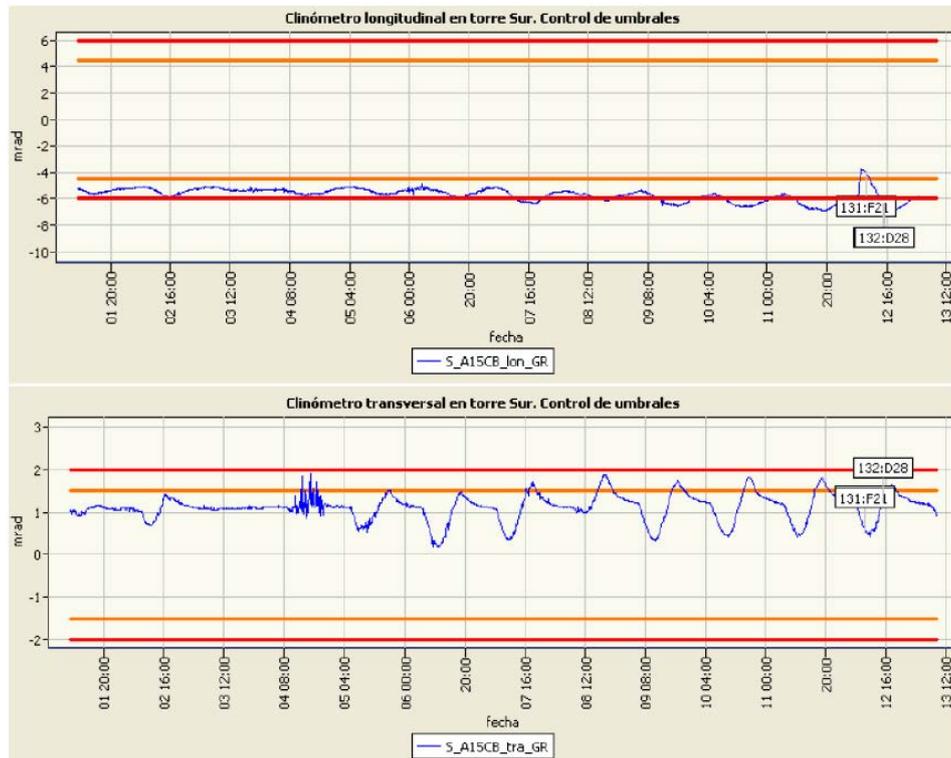


Figura 12. Extracto de informe automático con la evolución de lecturas en clinómetros longitudinal y transversal en la torre sur y valores umbral.

variable fue seguida con atención durante todo el proceso. El gráfico de la parte inferior de la figura muestra la evolución del clinómetro transversal en el mismo periodo. Aquí las variaciones diarias son más acusadas en términos relativos y acusan la variación de la insolación a lo largo del día. Aparte de las variaciones térmicas, la [figura 12](#) muestra un incremento de inclinación longitudinal (hacia el final del periodo, cuando se produce un tesado). El clinómetro transversal no se ve afectado.

Lecturas de fuerzas en tirantes. Pesaje de tirantes

Durante la construcción hubo algunas diferencias apreciables entre la carga que marcaban los sensores ubicados en los tirantes (extensómetros colocados en barras roscadas de alto límite elástico en los bastidores) y la que deberían tener según la carga a la que se tesaban. Por ejemplo, la [figura 13](#) muestra un extracto de un informe automatizado de instrumentación en el que la lectura en células de un determinado tirante se desvía un 23% del valor teórico. En tales casos, se procedía a hacer un pesaje de tirantes que consistía en volver a tesar con gatos hidráulicos las barras hasta comprobar que las tuercas de bloqueo se despegaban, marcando en ese instante la carga que tiene el tirante. Como se ve, la comprobación tras el pesado muestra que el desfase real es de solo el 1%, siendo el resto de la desviación imputable al dispositivo de medida.

Se estipuló un 15% como valor admisible de desfase entre carga teórica y la medida debido a que estos extensómetros tienen una deriva a largo plazo atribuible al propio sensor. La [figura 14](#) muestra la evolución de los tirantes con extensómetros que tuvieron una deriva mayor de la admisible. Se colocaron 76 extensómetros en diferentes tirantes de los cuales solo 9 superaron el umbral admitido como máxima deriva de medida con el paso del tiempo.

Comportamiento de las torres de atirantamiento

La instrumentación que se colocó a las torres de atirantamiento consistió en los siguientes elementos:

- Clinómetro longitudinal y transversal en cabeza de torre para medir la inclinación.
- Extensómetros en patas de torre y bajo los bulones de rótulas (controlar bloqueo de rótulas) para medir indirectamente tensiones.
- Termómetros.
- Dianas y prismas para control topográfico.

Tras cada operación de tesado y hormigonado de dovelas, se procedía al análisis de las lecturas obtenidas tanto a través de la instrumentación dispuesta como por medios topográficos. El objeto era comprobar que la torre de atirantamiento tenía desplazamientos dentro del rango esperable en cada fase de construcción. La [figura 15](#) muestra un ejemplo de registro de clinómetros.

Análisis de termómetros en los dos arcos

Se analizaron las lecturas en ambos arcos durante una semana obteniendo como conclusión que los termómetros ubicados en torres y tirantes daban lecturas similares en ambos arcos, pero en los ubicados en dovelas de hormigón existía gran disparidad de lecturas. Estas diferencias podían ser debidas a diferentes factores: termómetros más expuestos a la radiación solar, sensores despegados de su superficie, sensores cercanos a elementos recién hormigonados con altas temperaturas de fraguado o sensores con un funcionamiento anómalo.

Extensómetros en barras de anclaje de tirantes. N.				
T02 Arco Derecha.Barra N. der. [kN]	4272	2014/05/13 9:00	(4143)	(2014/05/01 9:00)
T02 Arco Derecha.Barra N. izq. [kN]	4034	2014/05/13 9:00	(3945)	(2014/05/01 9:00)
T02 Arco Derecha.Barra S. der. [kN]	4033	2014/05/13 9:00	(3976)	(2014/05/01 9:00)
T02 Arco Derecha.Barra S. izq. [kN]	4632	2014/05/13 9:00	(4543)	(2014/05/01 9:00)
T02 Retenida Derecha.Barra N. der. [kN]	4362	2014/05/13 9:00	(4369)	(2014/05/01 9:00)
T04 Arco Derecha.Barra N. der. [kN]	2415	2014/05/13 9:00	(2337)	(2014/05/01 9:00)
T04 Arco Izquierda.Barra N. der. [kN]	2420	2014/05/13 9:00	(2341)	(2014/05/01 9:00)
T04 Retenida Derecha Barra N. der. [kN]	2580	2014/05/13 9:00	(2711)	(2014/05/01 9:00)
T04 Retenida Izquierda.Barra N. der. [kN]	3108	2014/05/13 9:00	(3151)	(2014/05/01 9:00)
T06 Arco Derecha.Barra N. der. [kN]	3030	2014/05/13 9:00	(2999)	(2014/05/01 9:00)
T06 Retenida Derecha.Barra N. der. [kN]	4190	2014/05/13 9:00	(4234)	(2014/05/01 9:00)
T07 Arco Derecha.Barra N. der. [kN]	3496	2014/05/13 9:00	(3674)	(2014/05/01 9:00)
T07 Retenida Derecha.Barra N. der. [kN]	5650	2014/05/13 9:00	(5701)	(2014/05/01 9:00)

TIRANTE	Valor sensor [kN]	Carga teórica en fase actual [kN] (*)	Diferencia entre carga teórica y real [kN]	Relación carga real / teórica
R04dN	2580	3402	822	76 %

Tirante	Valor sensor [kN]	Carga en gato [kN]	Carga teórica[kN]	Sensor-teórica [kN]	Gato-teórica [kN]	Error sensor [%]	Desfase tras comprobación [%]
R04dN	2588	3341	3380	-792	-39	-23%	-1%

Figura 13. Informe de instrumentación sobre fuerzas en tirantes y comprobaciones en un caso cuya desviación supera el umbral admitido.

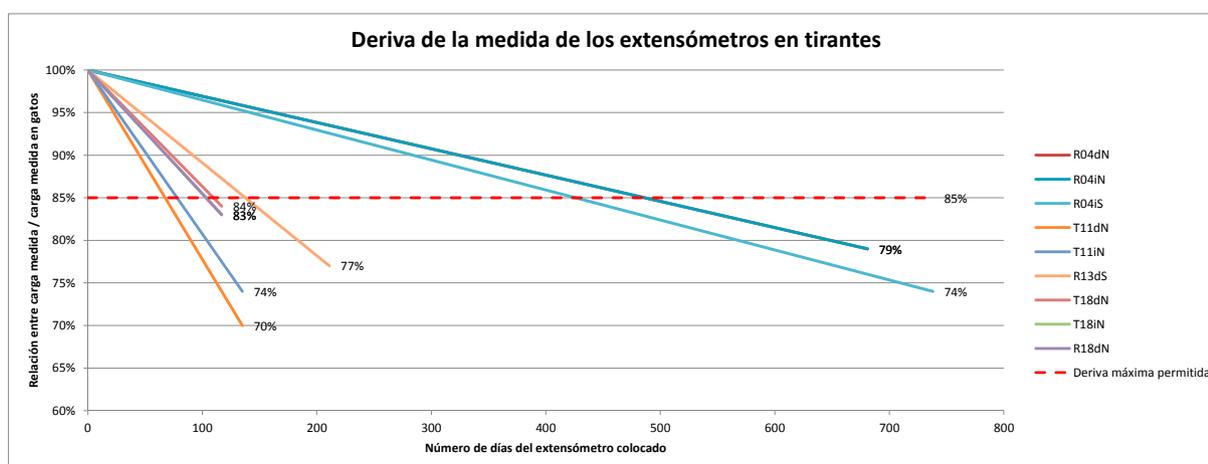


Figura 14. Evolución con el tiempo de la medida extensométrica de fuerzas en tirantes respecto al valor teórico y umbral que marca la necesidad de hacer un pesaje.

5. CONSIDERACIONES SOBRE INSTRUMENTACIÓN Y NORMATIVA

En las dos obras, viaducto del Almonte y del Tajo se implantaron sistemas de instrumentación y control geométrico que, en líneas generales, fueron muy útiles y ofrecieron los resultados esperados. La tarea de la asistencia conjunta a ambas direcciones

de obra se encaminó a unificar en lo posible la intensidad y el uso de los sistemas de instrumentación. Sin embargo, es un hecho que no existe un consenso ni mucho menos una estandarización en el diseño y en la operativa de los sistemas de medida y control de estructuras en construcción.

Cabe preguntarse si es posible, y deseable, la implantación de recomendaciones de buenas prácticas y contenidos mínimos de los proyectos de instrumentación y control de gran-

Sensores de la torre de atirantamiento Sur

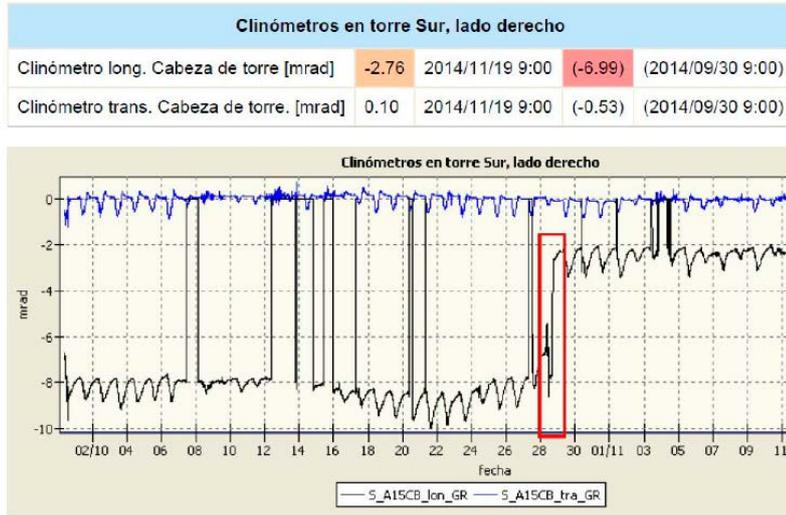


Figura 15. Muestra de registros de sensores con variaciones diarias, ruido eléctrico y la huella de etapas constructivas.

des estructuras. La referencia [2] repasa las recomendaciones sobre instrumentación de estructuras aparecidas en distintos países desde la guía publicada por la agencia FHWA estadounidense en 2002 [3] hasta la norma rusa GOSTR 53778 de 2010 [4] pasando por la guía de 2006 de la agencia SAMCO de la Unión Europea [5]. Recientemente, China ha publicado el código técnico GB 50982-2014 de instrumentación de edificios y puentes [6] que contiene prescripciones de obligado cumplimiento sobre requisitos mínimos y parámetros de la instrumentación para distintas estructuras durante la construcción y también en explotación.

Son desarrollos normativos que merece la pena tener en cuenta en la fase de diseño del sistema de instrumentación y control geométrico de una estructura de gran magnitud, como el viaducto sobre el río Almonte. Sin embargo, hay que hacer notar que la literatura especializada se centra en la monitorización durante la explotación y dedica mucha menos atención a la instrumentación durante la obra [7].

6. CONCLUSIONES

Se hacen a continuación unas consideraciones finales sobre la experiencia con los distintos sensores y sobre la unificación de criterios en el diseño y uso de la instrumentación de grandes obras para la toma de decisiones sobre el proceso constructivo y sobre la continuidad de la toma y uso de datos en la explotación de la infraestructura.

Sobre la fiabilidad y durabilidad de los distintos sensores

- Extensómetros en tirantes: se constató que existía una cierta deriva a largo plazo y se definió como rango admisible un 15% del valor teórico. Cuando se sobrepasaba este

valor, se hacía un pesaje de los tirantes con gatos hidráulicos dando en la mayoría de los casos valores próximos a los teóricos y no a los expresados por los sensores.

- Extensómetros en barras corrugadas: han dado muchos problemas de lecturas que han llevado a tenerlas en cuenta solo cualitativamente (ver tendencias e incrementos) y no cuantitativamente. Ejemplos de incoherencias: dar valores de tracción en zonas donde claramente tiene que estar comprimido, etc. Todo esto ha llevado a tener en cuenta solo su tendencia y no sus valores.
- Extensómetros de varillas en terreno: problemas con cableado.
- Células de carga en anclajes: al principio hubo dudas de la fiabilidad pero se demostró que el problema era intrínseco del propio sistema de tesado y de anclaje de cuñas.
- Termómetros: existe una variedad de factores que pueden dar lugar a lecturas erróneas como son: ubicación cercana a hormigón recién vertido y por tanto con alto calor de fraguado, problemas con roturas de cableado, despegue de termómetros fijados en superficie, termómetros más expuestos a la incidencia directa de los rayos del sol...
- Clinómetros: comportamiento afectado por la incidencia directa del sol (protegerlos con sombreretes) y por posibles golpes durante la construcción.

Instrumentación de obra e instrumentación durante la explotación

En las etapas finales de la construcción del viaducto se han planteado distintas variantes para aprovechar parte de la instrumentación y sus infraestructuras (escaleras y accesos al arco y al tablero, iluminación, etc.) para su empleo durante la explotación. De igual modo, es de gran interés la continuidad de los datos del control geométrico desde el fin de la construcción hasta el comienzo de la explotación y mantenimiento de la obra. Planificar desde etapas tempranas este aprovechamiento

y relevo (tanto del encargado de la toma de datos como de la sección de la Administración que gestiona la obra) ofrece a la Administración una importante utilidad añadida a un coste relativamente reducido.

Referencias

- [1] *Wind Effects on Cable-supported Bridges*. You-Lin Xu. Wiley. 2013
- [2] *Specifications and applications of the technical code for monitoring of building and bridge structures in China*. Y. Yang, QS. Li, B.W. Yan. *Advances in Mechanical Engineering*. 2017
- [3] *Development of a Model Health Monitoring Guide for Major Bridges*. Aktan AE, Catbas FN. FHWA research and Development. 2003
- [4] *Building and structures, technical inspections and monitoring regulations*. GOST R 53778:2010
- [5] *Guideline for Structural Health Monitoring, Final Report. Structural Assessment Monitoring and Control Network (SAMCO)*. Berlin, 2006
- [6] *Technical Specifications of Structural Health Monitoring for Highway Bridges: New Chinese Structural Health Monitoring Code*. Moreu F, Li X., Li S., Zhang D. *Frontiers in Built Environment*, volume 4. 2018. <https://www.frontiersin.org/article/10.3389/fbuil.2018.00010>
- [7] *Structural Health Monitoring of Civil Infrastructure Systems*. Ed. V. M. Karbhari, F. Ansari. CRC Press, 2009