

# Plan de instrumentación y control de la construcción del arco de Almonte

## *Monitoring and checking system for the construction of the Almonte arch*

José Ignacio González Esteban<sup>a</sup>, David Arribas Mazarracín<sup>b</sup>, Pablo Bernal Sahún<sup>b</sup> y José María Pérez Casas<sup>c</sup>

<sup>a</sup> Doctor Ingeniero de Caminos Canales y Puertos

<sup>b</sup> Ingeniero de Caminos Canales y Puertos. Departamento de Puentes de FCC Construcción, España

<sup>c</sup> Ingeniero de Caminos Canales y Puertos

Recibido el 19 de enero de 2018; aceptado el 30 de julio de 2018

### RESUMEN

La magnitud del viaducto de Almonte hace imprescindible el diseño de un plan de instrumentación para controlar todo el proceso constructivo. Dentro de este sistema de instrumentación se definió un sistema automático de seguimiento para algunas variables. Además, en este artículo se comentan algunas conclusiones del seguimiento realizado.

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

PALABRAS CLAVE: Plan de instrumentación, programa de control automático, control geométrico, control térmico, gradiente térmico.

### ABSTRACT

The size of Almonte Viaduct makes necessary the design of a monitoring system to check all the erection process. An automatic system was defined into the monitoring plan to control some parameters. Besides, some conclusions are explained in this article.

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

KEYWORDS: Monitoring system; automatic controlled sensors; geometry control; thermal control; temperature gradient.

## 1. INTRODUCCIÓN

El viaducto del río Almonte es una estructura de 996 m de longitud, que en su parte central cruza sobre la cola del embalse de Alcántara mediante un arco de tablero superior de 384 metros de luz; siendo en el momento de su construcción el tercer arco de hormigón de más luz del mundo y el de mayor luz para ferrocarril.

La construcción de cada mitad del arco se realizó por avance por voladizos atirantados de 190 metros, mediante el hormigonado *in situ* de 32 dovelas de unos 6.7 m de longitud con ayuda de carros de avance y el montaje simultáneo de 26 fami-

lias de tirantes, constituida cada una por una pareja de tirantes principales y otra pareja de retenida.

En este artículo se describe el plan de instrumentación y control diseñado para la construcción del arco; la descripción detallada de la estructura y del procedimiento de construcción se hace en otros artículos de esta revista. [1], [2]

La relación entre la luz y la flecha es de 5.7, por lo tanto bastante rebajado en comparación con otros puentes arco de su categoría (figura 1), especialmente si se compara con puentes de ferrocarril; además es muy esbelto en clave, con una esbeltez mecánica (Luz/radio giro) de 265. Por tratarse de un puente arco para ferrocarril y por las razones citadas, el arco es

\* Persona de contacto / Corresponding author.  
Correo-e / email: [josei.gesteban@gmail.com](mailto:josei.gesteban@gmail.com) (José Ignacio González Esteban)



Figura 1. Vista general del arco en construcción.

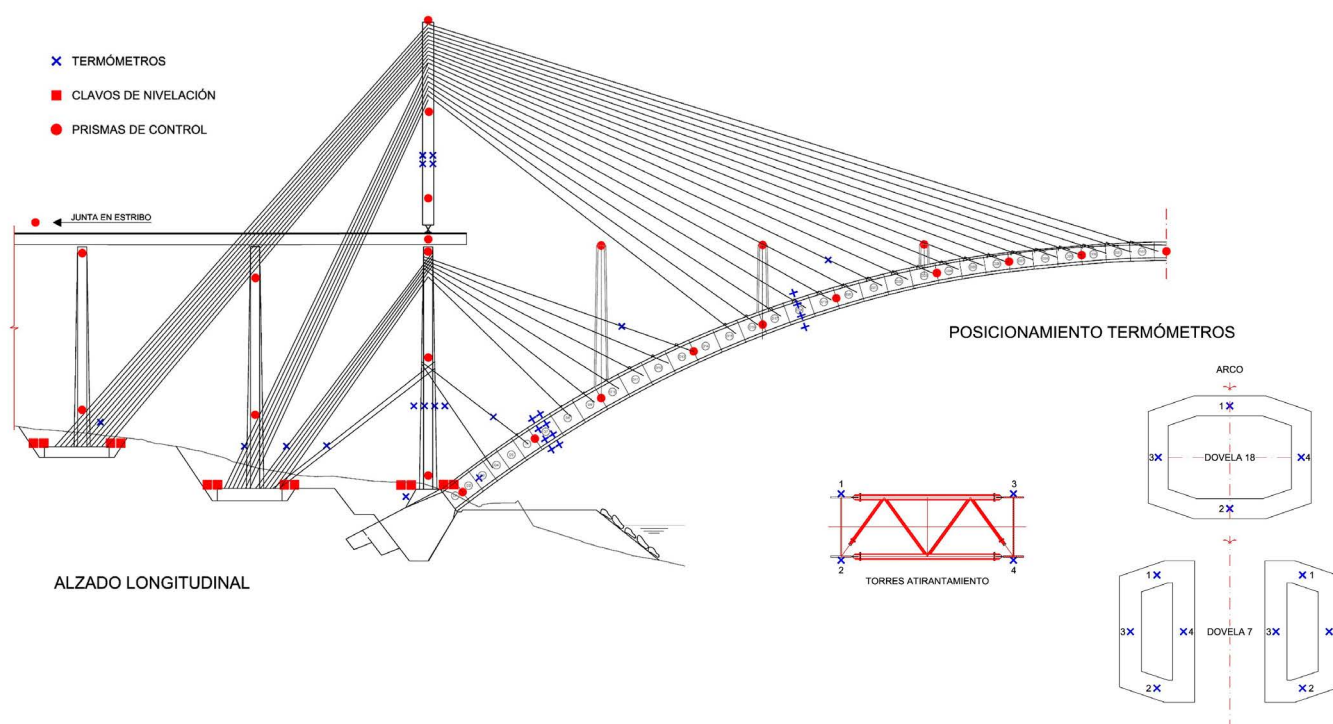


Figura 2. Distribución de termómetros y de referencias topográficas.

muy sensible a los fenómenos de inestabilidad, y por lo tanto a las imperfecciones geométricas que pudieran originarse por errores durante el proceso constructivo, lo que obligaba a un control riguroso de la construcción.

Durante el proceso constructivo el arco del viaducto del río Almonte es una estructura muy evolutiva, que es necesario controlar para conseguir que una vez finalizada la construcción

cumpla los parámetros geométricos y de esfuerzos considerados en el proyecto.

Debido a la magnitud de la estructura, el número de variables a controlar era muy elevado, por lo que la obtención y tratamiento de los datos obtenidos de la instrumentación, se previó totalmente automatizada; obteniéndose en tiempo real los valores finales de los parámetros con el formato con el que

se iban a utilizar en el seguimiento del proceso constructivo. Por otra parte, para controlar el coste del sistema y el número de sensores a colocar en obra, se realizó un estudio detallado de las necesidades, reduciéndose el número de sensores al mínimo que permitiera un seguimiento suficientemente fiable.

## 1. DEFINICIÓN DEL PLAN DE INSTRUMENTACIÓN

La instrumentación se diseñó pensando en la fase de construcción; aunque los sensores integrados en la estructura han quedado operativos para su lectura una vez terminada la construcción, por lo que podrían utilizarse parte de ellos en el control de la estructura durante la fase de explotación.

El plan de instrumentación tenía como finalidad:

- Controlar la geometría de la estructura durante la construcción.
- Determinar los parámetros necesarios para realizar la construcción de acuerdo con el proyecto.
- Controlar que la estructura se comportaba de acuerdo con las previsiones del proyecto:
  - Controlar que no aparecían en el terreno movimientos no esperados.
  - Controlar que los esfuerzos en tirantes, torres provisionales y arco en cada etapa constructiva correspondían a los teóricos.

En el procedimiento constructivo se diseñó un plan de posiciones de hormigonado del carro de forma que al acabar la construcción y a tiempo infinito, el arco quedara en la posición teórica definida por el equipo de diseño. Para poder implementar este plan en la realidad, hay que tener en cuenta principalmente los efectos térmicos de los distintos elementos ya que en puentes de grandes dimensiones suele ser el parámetro que más afecta a la geometría.

De este modo el plan de contraflechas se diseñó pensando que todos los elementos se encuentran en la temperatura de referencia, es decir, la temperatura estimada como media para la localización de la obra, que en este caso fue de 16°C. Desde esas posiciones teóricas del puente se estudió cómo afectaba la variación de temperatura de cada elemento en cada configuración estructural del puente en cada etapa constructiva, es decir como afectaba a: geometría, esfuerzos y fuerza en tirantes. Una vez conocidos esos valores teóricos se diseñó el plan de instrumentación para poder tomar lectura rápida de todos los valores térmicos de los distintos elementos y procesarlos para poder conocer la configuración estructural teórica del puente en un momento dado para las condiciones térmicas reales de los diversos elementos.

Con este proceso, se podía definir la posición teórica del carro para hormigonado y las fuerzas de tesado de cada tirante para cada configuración estructural con las condiciones térmicas existentes en la realidad. Así se garantizaba que una vez las condiciones térmicas se situaran en la temperatura de referencia la configuración estructural quedaría según la teórica.

Adicionalmente, al tratarse de una construcción mediante avance en voladizo atirantado, la seguridad de la construcción

radica en el correcto funcionamiento del sistema de atirantamiento y su anclaje al terreno. Por este motivo también se realizó un seguimiento del comportamiento del terreno y de las cimentaciones involucradas en el proceso.

En cada momento importante del ciclo constructivo se revisaban y procesaban todos los parámetros de la instrumentación, no obstante, era necesario sistematizar el proceso de control de todos los parámetros en el resto de momentos en los que no había un equipo de ingenieros analizando en detalle la instrumentación. Por este motivo, se diseñó un sistema que permitía registrar una gran parte de los datos de forma automática cada 10 minutos y almacenarlos en un servidor al que se podía acceder en cualquier momento de forma remota. Adicionalmente, para cada etapa constructiva, se diseñó una configuración de valores de alarma para los diversos parámetros. De este modo, si en algún momento en el que no hubiera presencia *in situ* del personal adecuado se producía una alteración importante en algún parámetro de la instrumentación, el sistema lanzaba un mensaje de alarma a los teléfonos móviles de las personas con más responsabilidad en el proceso de la construcción del puente.

Los principales parámetros que se controlaron mediante el plan de auscultación se enumeran en los siguientes puntos.

### 1.1. Control ambiental

En la pila 15 se dispuso una estación meteorológica para registrar las principales magnitudes ambientales:

- Temperatura ambiente.
- Velocidad y dirección del viento. El anemómetro responsable de esta lectura se situó en altura, en un primer momento sobre el tablero y luego sobre la torre metálica provisional.
- Radiación solar.
- Humedad del ambiente.

Mediante la temperatura ambiente, radiación solar y humedad, se pudo correlacionar el comportamiento térmico de los distintos elementos del puente con las condiciones ambientales y así poder hacer estimaciones de cómo se podía comportar el puente en función de la previsión meteorológica. Estos supuestos se realizaron principalmente en los días que hubo que hacer alguna operación especial: izado torre, cierre arco etc.

La velocidad del viento se usó para controlar las condiciones ambientales en algunas operaciones en las que se impuso algún tipo de restricción. Por ejemplo, lanzamiento del carro, lanzamiento de la cimbra, cierre del arco, etc.

### 2.2. Control térmico

Al estar el puente durante el proceso constructivo formado por elementos de muy diferente respuesta frente a las variaciones térmicas (hormigón, tirantes, estructura metálica) y a sus grandes dimensiones, tanto la geometría de la estructura como los esfuerzos de los distintos elementos se ven fuertemente influenciados por las variaciones de temperatura y por el soleamiento. Por este motivo fue el parámetro automatizado que más se usó.

La temperatura de los elementos de la estructura varía constantemente a lo largo del día en función de la temperatura del aire y el soleamiento, por lo que la temperatura no es uniforme dentro de una sección, variando tanto a lo largo del

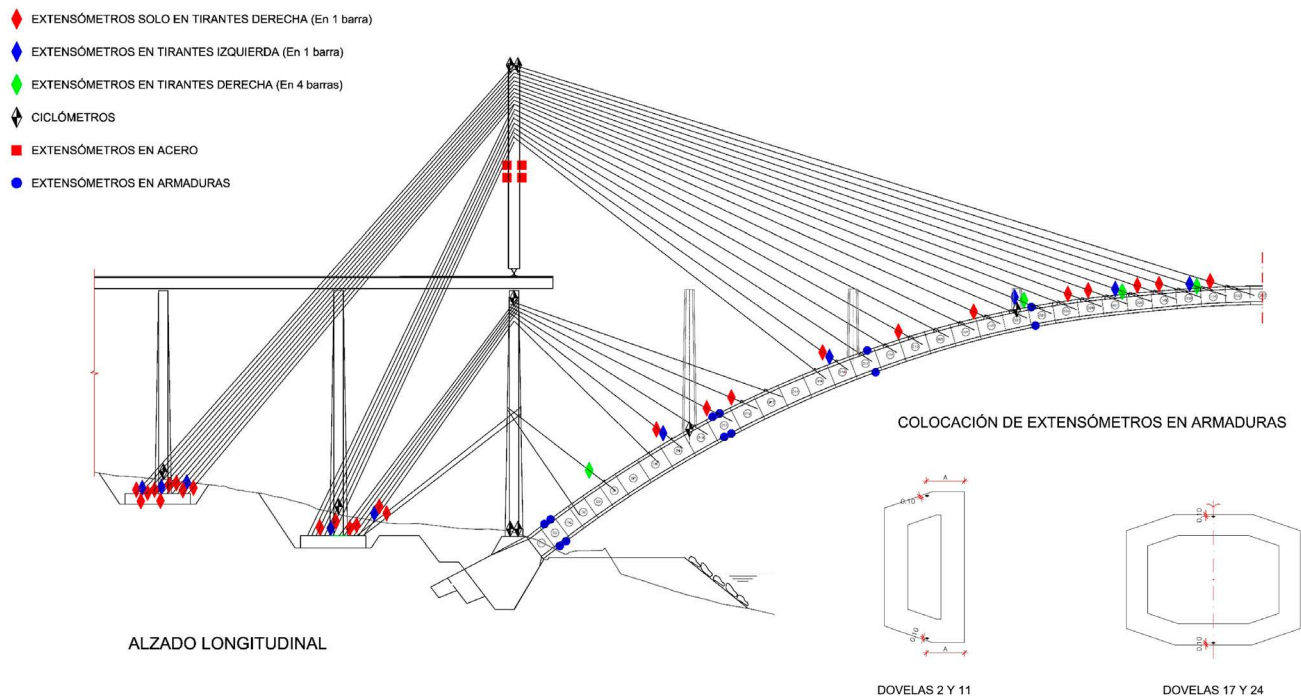


Figura 3. Distribución de extensómetros.

perímetro como a lo largo del espesor. Además, los elementos de la estructura tienen secciones muy variables, y presentan orientaciones respecto del sol diferentes, por lo que la temperatura no es uniforme a lo largo de un mismo elemento.

Para controlar la temperatura se usaron sondas de temperatura PT100. La localización de las sondas en cada sección se definió para obtener unos valores representativos de las temperaturas medias de cada elemento.

Para poder considerar en los cálculos las temperaturas de los distintos elementos se eligieron un número reducido de secciones que se utilizaron para obtener las temperaturas de referencia (figura 2).

Los parámetros que se controlaron fueron:

- Temperatura ambiente, extraída de la estación meteorológica.
- Temperatura del aire en el interior del arco: Aunque sus valores no se utilizaban directamente, proporcionan un dato fundamental para interpretar la evolución en el tiempo del resto de temperaturas.
- Arco en la zona de arranque: Se colocaron cuatro sondas en cada una de las patas de la dovela cuatro de cada semiarco y desde ellas se estimó la temperatura media.
- Arco en la zona intermedia: Mediante cuatro sondas colocadas en la dovela 18 de cada semiarco se obtenía la temperatura media.
- Pila 6 y pila 15 (pilas principales): Se obtuvo la temperatura media mediante cuatro sondas colocadas en una sección intermedia.

En los elementos de hormigón las sondas se colocaron en el centro del espesor de cada uno de los tabiques de la sección.

- Torres de atirantamiento: Se obtuvo la temperatura media, el gradiente longitudinal y el gradiente transversal; mediante cuatro sondas colocadas en una sección intermedia.
- Temperatura en tirantes. En cada semiarco se obtuvieron las temperaturas de tres tirantes y sus correspondientes retenidas.

Todas las sondas situadas en el exterior se protegieron de la acción directa del sol.

En los tirantes, para minimizar el efecto del soleamiento, se colocaron en cada punto a instrumentar dos sondas, una en la arista superior y otra en la inferior para poder extraer la media. A su vez, como los tirantes no tenían vaina exterior, cada sonda se colocó en un trozo de cordón desnudo y a su vez, este se protegía con cuatro trozos de cordones con su funda de plástico para evitar la acción directa del sol al sensor. Con esta configuración se podía estimar la temperatura media real de los cordones.

### 2.3. Control de esfuerzos

Se realizó el control de los esfuerzos en un número reducido de elementos para disponer de un conocimiento suficiente de los esfuerzos de los elementos de la estructura que tenían mayor influencia en el proceso constructivo (figura 3). Para controlar los esfuerzos en los distintos elementos se usaron en general bandas extensométricas instaladas en parejas en configuración de medio puente de Wheatstone para compensar los efectos térmicos.

- *Extensómetros en tirantes.*  
El estado tensional de los tirantes determina los esfuerzos y geometría de la estructura, por lo que era importante tener un conocimiento lo más exacto posible de su estado

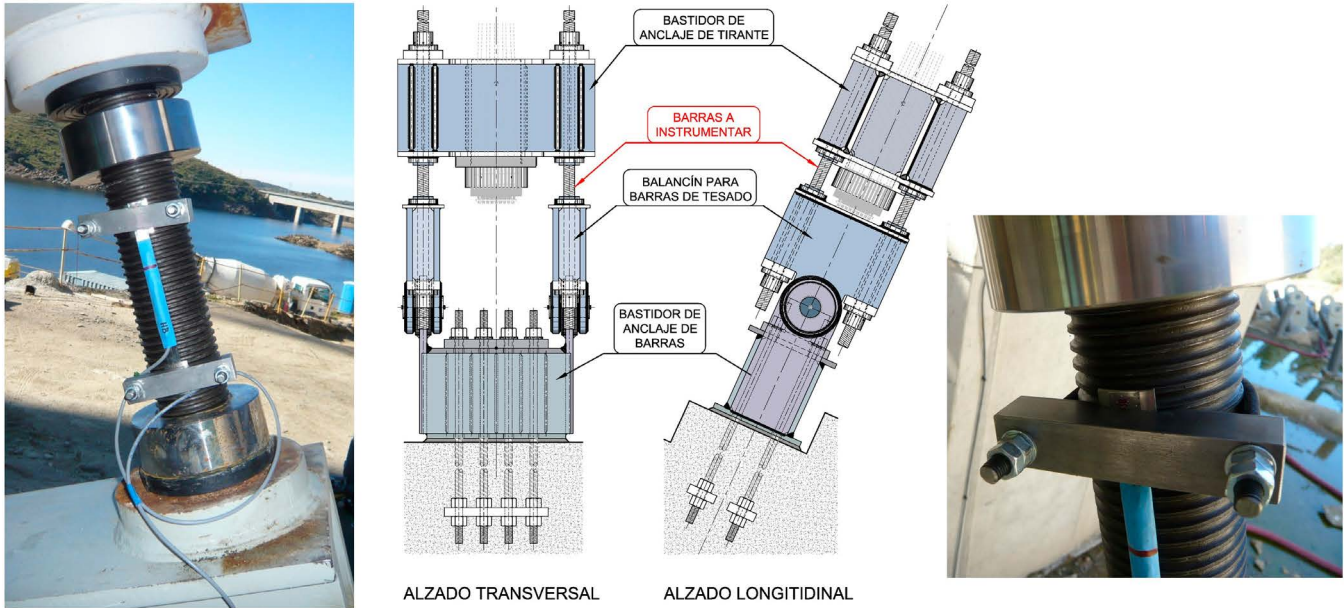


Figura 4. Detalles de los extensómetros en tirantes.

tensional. Además los esfuerzos en los tirantes varían mucho a lo largo de la construcción y a causa de su baja inercia térmica y exposición directa al sol, tienen variaciones de temperatura muy importantes a lo largo del día.

Debido a la dificultad de colocar los extensómetros en los cordones de los tirantes, se prefirió colocarlos en las barras de tesado de los yugos de anclaje, de las que existen dos o cuatro por tirante. Estos extensómetros se dispusieron entre dos piezas unidas a la rosca de las barras a través de un dispositivo que se diseñó y se ensayó de forma específica para esta obra (figura 4).

El número total de tirantes, frontales y de retenida es de 208, cada tirante se ancla con un sistema que se compone de 2 o 4 barras, conformando un total de 680 barras en todo el puente, por lo que era inviable la instrumentación de su totalidad. Para tener una visión suficientemente aproximada de los esfuerzos, se colocaron un total de 64 extensómetros en todo el puente (9% del total de barras). De esta forma se controlaron 40 tirantes, es decir un 19% del total. Normalmente se instrumentó una barra de cada pareja de tirantes, aunque para comprobar su correcto funcionamiento, en diez parejas se controlaron ambos tirantes, y en cuatro tirantes se instrumentaron las cuatro barras de tesado para analizar el reparto de carga entre las distintas barras.

- *Extensómetros en estructura metálica.*

En cada una de las torres se colocaron cuatro extensómetros, uno en cada esquina de una sección intermedia. En un segundo momento, cuando la torre ya estaba en carga se decidió instrumentar también las zonas cercanas a la rótula por lo que se pusieron extensómetros en las chapas de la célula triangular de reparto.

- *Extensómetros en armaduras.*

Los esfuerzos en el arco se controlaron mediante extensómetros pegados a las armaduras. Se colocaron extensómetros en las caras superior e inferior de las dovelas 2, 11, 17 y 24 de cada semiarco.

- *Extensómetros de varillas en el terreno.*

Para controlar los movimientos del terreno en los arranques del arco se colocaron dos extensómetros de varillas triples con transductores de desplazamiento en la base de cada una de las zapatas del arco (figura 5).

- *Células de presión en los anclajes al terreno de las retenidas.*

En cada una de las cuatro zapatas (pilas 4, 5, 16 y 17) en las que se anclaban los tirantes de retenida del arco, se colocaron cuatro células de presión en los anclajes al terreno para controlar la fuerza de anclaje.

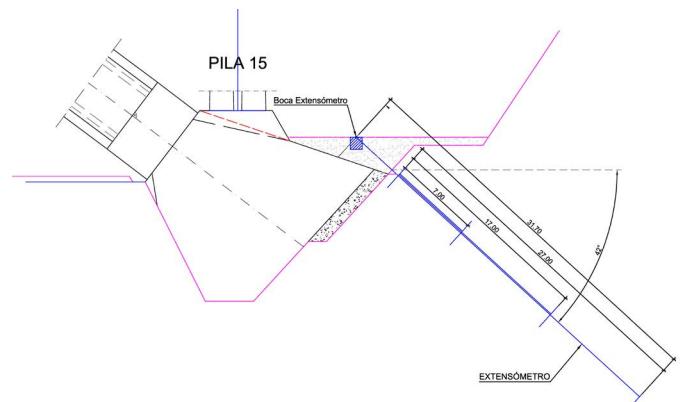


Figura 5. Esquema de extensómetro en cimentación del arco.

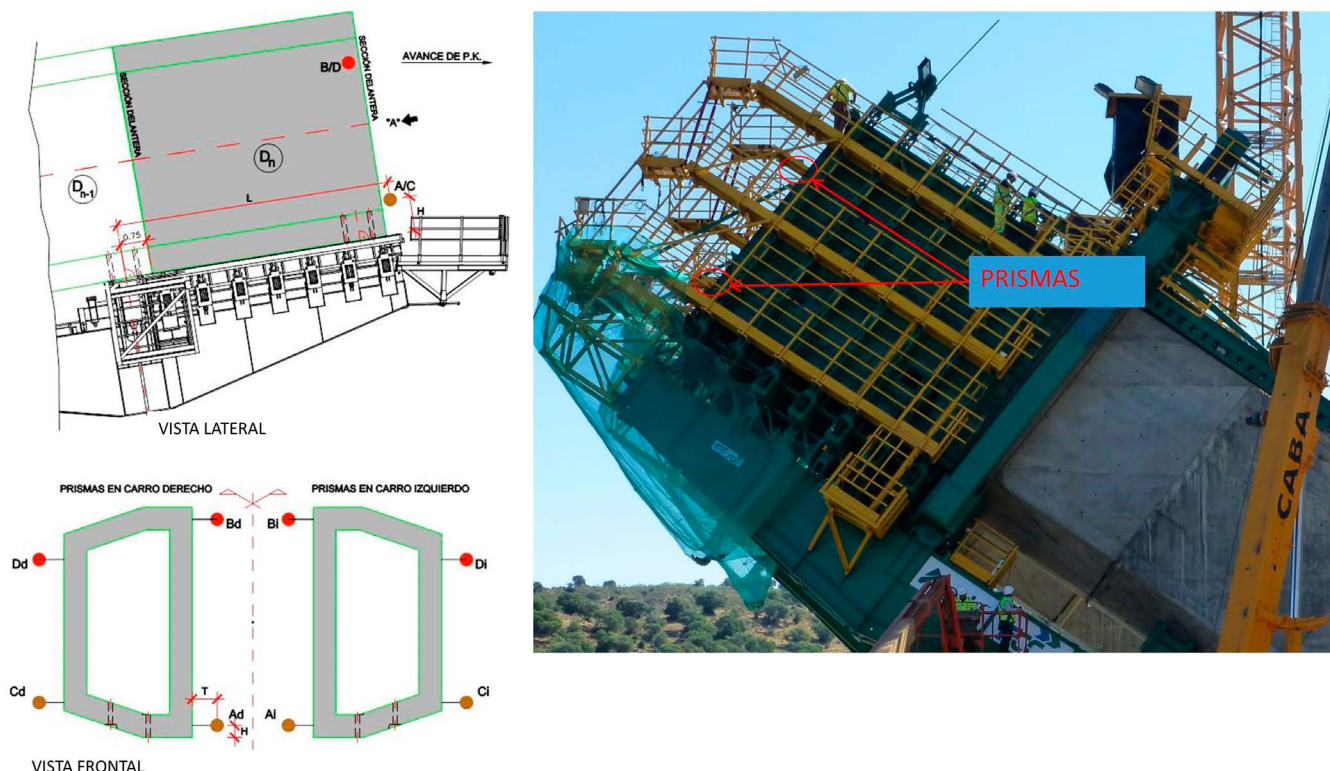


Figura 6. Prismas de control del carro.

## 2.4. Control geométrico

Al tratarse de una estructura muy evolutiva es necesario llevar un control geométrico de la parte ejecutada para comprobar que la construcción se realiza dentro de las tolerancias admisibles y observar su evolución al avanzar la construcción.

### 2.4.1. Control topográfico del arco

Es un método no automático pero fue uno de los principales métodos de control de la estructura. Para analizar y supervisar la geometría del arco se dispusieron dos familias de referencias:

- Prismas en el carro de hormigonado.
- Dianas en las dovelas ya hormigonadas.

Las primeras referencias solo controlaban el frente en construcción, mientras que las segundas controlaban toda la geometría del arco ya que se instalaban en todas las juntas entre dovelas. El planteamiento previsto era tener muchas lecturas intermedias durante el ciclo de construcción de cada dovela solo del frente en construcción, mientras que tras el fin de cada ciclo se podía tomar toda la geometría del arco. Con esta idea se pudo tener un buen conocimiento del comportamiento del frente del voladizo en muchas etapas del ciclo, mientras que las lecturas de toda la geometría del arco se tomaba solo al final del ciclo para no sobrecargar el trabajo del equipo de topografía y no ralentizar al equipo de construcción (figuras 6 y 7).

Las mediciones se hacían con estación total desde hitos de la red geodésica implantada en obra y en algunos casos desde estacionamientos en las inmediaciones de los arranques del arco posicionados por intersección inversa a hitos conocidos.

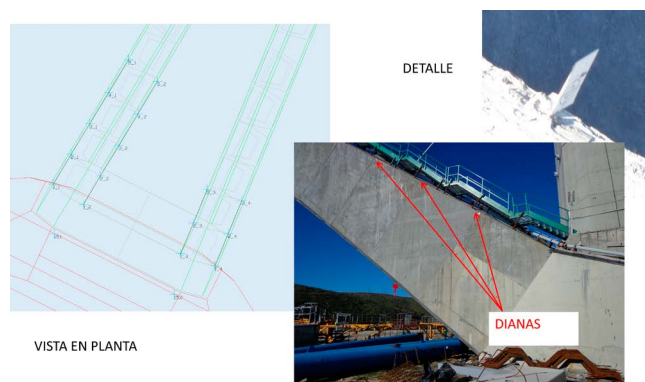


Figura 7. Dianas de control del arco.

Las distancias de radiación se limitaron a 400 m y se obtuvieron precisiones de +/- 5 mm

El esquema del proceso de control geométrico del arco fue el siguiente:

1. Posicionamiento del carro de hormigonado: esta operación se llevaba a cabo con los prismas ubicados en el carro.
2. Tras montaje de la ferralla y antes del tesado del tirante, lectura y comprobación de la geometría del carro. También se comprobaba con los prismas del carro. Esta lectura se utilizaba para comprobar si durante el proceso de ferrallado y cierre del carro se había producido algún movimiento anómalo del carro y había que corregir su posición.
3. Tras tesar el tirante y antes de hormigonar, lectura de nuevo de los prismas del carro. Con esta lectura se

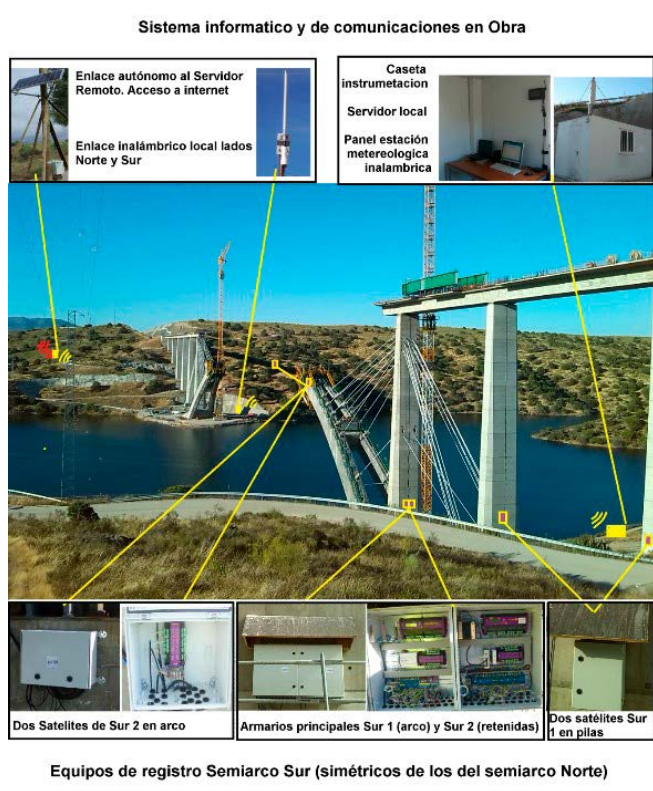


Figura 8. Sistema de instrumentación automática de un semiarco (el otro es simétrico).

podía comprobar el comportamiento del arco durante la fase de tesado. No obstante, si en esa etapa había desviaciones, eran debidas al comportamiento general del arco por lo que no había capacidad de ajuste en ese momento, solo se analizaba el comportamiento para corregir la posición de las siguientes dovelas en caso de que fuera necesario.

4. Tras hormigonar y antes de avanzar el carro. Se tomaba la geometría del arco leyendo los prismas del carro y todas las dianas dejadas en las juntas entre dovelas. Este era un proceso podía durar entre 1.0 y 1.5 horas en las últimas etapas de la construcción del arco. Estos datos eran esenciales para ir conociendo la geometría final y el comportamiento del arco.

El ciclo total de una dovela podía tener un movimiento total del frente de pocos centímetros, siendo el resultado de la resta de dos cantidades muy grandes que eran el movimiento de ascenso del frente al tesar y el movimiento del frente al hormigonar. Por lo tanto, era necesario tomar la lectura intermedia del punto 3 para poder conocer ambos movimientos y así, en el caso de que hubiera desvíos, conocer en qué etapa se estaba produciendo la divergencia.

Gracias a la instrumentación de los diversos parámetros se podía conocer la posición teórica del arco en cada momento para las condiciones térmicas reales. No obstante, tal y como se explicará más adelante, el gradiente producido por una temperatura no uniforme en el hormigón es un parámetro muy difícil de obtener, por lo que las lecturas de las etapas 3 y 4 se hacían a primera hora de la mañana para reducir el efecto

del soleamiento que afectaba de forma directa al gradiente térmico en el hormigón del arco.

#### 2.4.2. Control topográfico de las cimentaciones

Para comprobar con mayor exactitud los posibles movimientos de las cimentaciones de las pilas de las retenidas (pilas 4 y 5 en un margen y pilas 16 y 17 en el otro margen) así como las cimentaciones del arco, se colocaron clavos de nivelación en las cuatro esquinas de cada zapata. Estos clavos se controlaban topográficamente cada semana aproximadamente para comprobar cualquier comportamiento anómalo.

#### 2.4.3. Control topográfico adicional

Para llevar un seguimiento de las pilas más sensibles, se dispusieron prismas de control en las pilas 4, 5 y 6 en la margen norte del río y en las pilas 15, 16 y 17 en el margen sur. También se dispusieron en las torres de atirantamiento. Estos prismas se tomaban cada semana aproximadamente.

Como complemento al sistema de control del arco se montaron una serie de prismas en el arco y en las pilastras. El motivo de estos prismas era dejar un sistema de control del puente más duradero que las dianas y con el que se pudiera llevar un seguimiento desde fin de construcción durante la explotación del puente. Este sistema de prismas también se usó como chequeo para revisar el comportamiento del arco durante la construcción del tablero sobre el arco.

#### 2.4.4. Control geométrico automático

El control por topografía era muy necesario pero no cumplía la filosofía de llevar un sistema automatizado al igual que los otros sensores. Por este motivo se dispusieron de forma adicional una serie de clinómetros en el arco, en las pilas contiguas al arco y en las torres de atirantamiento. Los clinómetros servoacelerométricos eran uniaxiales de alta precisión de rango tres grados. Los valores de estos sensores se podían consultar en tiempo real en la página de instrumentación que se desarrolló para este puente.

Al igual que los otros sistemas automatizados, se definieron unos valores de alarma para que estos sensores estuvieran vigilados de forma automática.

### 3.

#### PROGRAMA DE CONTROL DE LA INSTRUMENTACIÓN

Tanto la instalación de los distintos dispositivos como la gestión de la información automatizada la realizó la asociación de empresas Empírica-Metiri en colaboración con el consorcio constructor.

Todos los sensores automatizados estaban configurados para tomar datos cada 10 minutos. Para grabar esa información, los distintos sensores se cableaban hasta unos armarios que agrupaban las señales, desde los cuales se enviaban por comunicación inalámbrica al ordenador de control (figura 8).

En este ordenador, la información se transformaba en unidades ingenieriles y los integraba, proporcionando directamente los datos necesarios para el control de la ejecución. Esta información se transmitía por internet al servidor en el

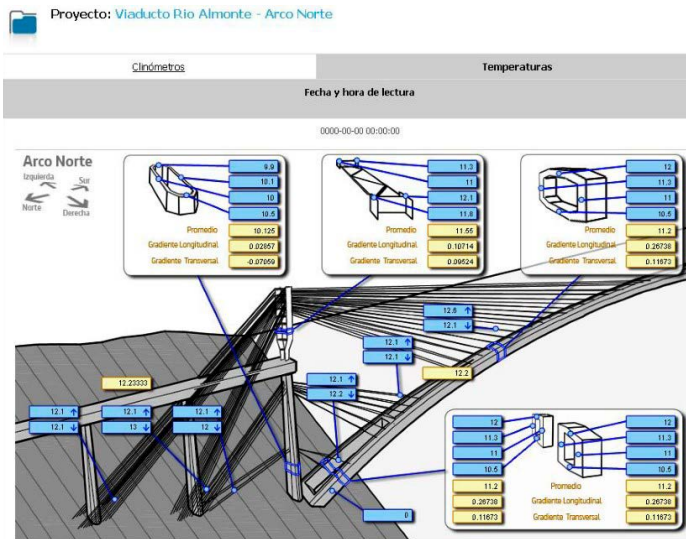


Figura 9. Vista de los sensores en tiempo real.

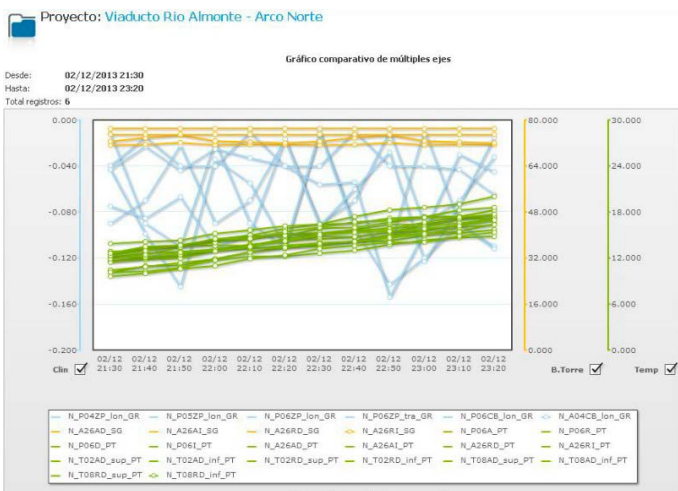


Figura 10. Vista de varios sensores en modo "Historial".

que estaba instalada la página web de consulta de la información.

La página web se diseñó expresamente para este proyecto. En el sistema se registraban todos los datos de modo que siempre se podía consultar un historial de valores o se podían exportar a una hoja de cálculo. Los resultados se podían presentar en forma de gráficos históricos en los que se podían agrupar varias lecturas para poder correlacionar la evolución de distintos parámetros. Otra posibilidad del sistema era presentar los resultados en forma de vistas de la estructura en tiempo real, de modo que era sencillo de revisar los datos de los diversos parámetros en un momento dado (figuras 9 y 10).

En el sistema también se implementó el sistema de alarmas explicado anteriormente. El sistema consistía en definir para cada canal de lectura dos valores de alerta, uno de aviso previo y otro, más estricto, de alarma. Estas alertas tenían como finalidad avisar al personal de cualquier situación anómala, para proceder al análisis de la situación y en su caso tomar las medidas necesarias para corregirla.

Con este sistema fue muy fácil revisar la información o extraer un historial de datos para estudiarlos en un programa aparte.

#### 4.

### PROCESO DE SEGUIMIENTO DE LA CONSTRUCCIÓN

Para supervisar la construcción había que procesar toda la información que aportaba el sistema automático de la instrumentación y toda la información tomada por topografía. Esta última información era transmitida a Dirección de Obra y era supervisada por la Asistencia a Dirección de Obra.

Este trabajo de análisis de la instrumentación se hacía por duplicado tanto por parte de los Servicios Técnicos de FCC como por la Asistencia a Dirección de Obra y se contrastaban las distintas conclusiones en reuniones quincenales. Gracias a este planteamiento y al control automático, el puente ha estado controlado durante toda su construcción.

En los Servicios Técnicos de FCC para procesar toda la información se han usado diversas hojas de cálculo:

- Hojas de posicionamiento del carro: eran unas tablas en las que a partir de la situación térmica de los diversos elementos (tirantes, arco, pilas etc.) se definía la posición a la que había que posicionar el carro en función del cálculo de contraflechas del arco realizado en el proyecto de detalle (figura 11).
- Control de los prismas del carro: en estas hojas, en función de las condiciones térmicas en el momento de la lectura, se definían las posiciones teóricas del frente del carro en las distintas etapas de la secuencia constructiva, es decir: al posicionar el carro, antes de tesar, tras tesar y tras hormigonar. En estas hojas había que introducir los datos de la instrumentación en cada etapa y los datos geométricos reales y la hoja te devolvía el error existente en cada momento.
- Hojas de control de dianas: había una hoja por cada semiarco. En estas hojas había que introducir los datos topográficos de todas las dianas tras el hormigonado de cada dovela y la hoja iba resumiendo el error existente en cada diana con respecto al modelo teórico. Al igual que en las hojas anteriores, en cada lectura había que introducir los datos de temperatura de los diversos elementos para que la posición teórica se pudiera corregir adecuadamente con respecto a las condiciones térmicas realmente existentes (figura 12).
- Hoja de control de fuerza en tirantes: de esta herramienta se podía extraer la fuerza en cada tirante en una etapa cualquiera del proceso constructivo para unas condiciones de temperatura dadas. La utilidad de esta hoja era doble: por un lado de ella se extraía la fuerza de tesado de una familia de tirantes en una etapa dada y por otro lado servía para ir comprobando si la fuerza en los tirantes instrumentados tenía unos valores similares a los teóricos (figura 13).
- Control de nivelación de zapatas: en esta hoja se registraba cada lectura y se podía analizar la tendencia de los movimientos de cada zapata. Desde esta hoja se pudieron apreciar ligeros giros longitudinales en las zapatas de retenida cuando estaban solicitadas al máximo. También se pudo apreciar cómo los arranques del arco no sufrieron movimientos apreciables durante la construcción.
- Control de prismas y de torres provisionales: en estas hojas también se registraban los datos de cada toma y se podían estudiar posibles tendencias.





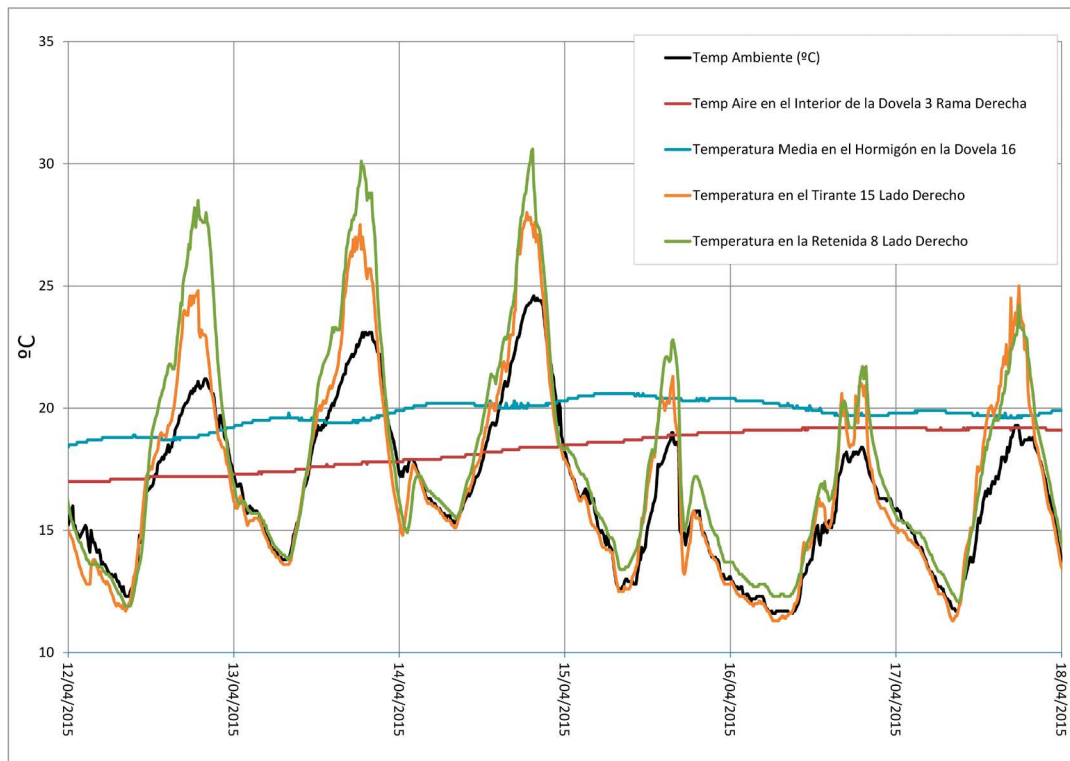


Figura 14. Temperaturas (ambiente, tirantes y hormigón) en rama norte en días no muy soleados.

## 5. ALGUNAS CONCLUSIONES DEL SEGUIMIENTO REALIZADO

Todo este sistema de instrumentación ha servido para conocer en detalle cómo es el comportamiento real del puente. De este proceso se pueden resumir algunas conclusiones para futuras experiencias:

- En cualquier sistema de instrumentación en los parámetros más importantes interesa tener algún sistema de lectura redundante. En el viaducto de Almonte esto se buscó en el control geométrico y la fuerza de los tirantes:
  - o Control geométrico: la geometría de la estructura se controlaba de forma automática y por topografía en diversos momentos del proceso constructivo.
  - o Fuerza en los tirantes: adicionalmente al sistema automatizado se hicieron en ciertos momentos comprobaciones de la fuerza, mediante comprobación con gatos para contrastar los datos automáticos. En nuestro caso los resultados fueron satisfactorios.
- Extensómetros en las armaduras: este parámetro es muy complicado de interpretar debido a diversos factores: esfuerzos globales de la sección, tensiones internas entre hormigón y armadura, tensiones introducidas durante el calentamiento y enfriamiento del fraguado del hormigón. En nuestro caso no llegamos a sacar conclusiones claras de estos sensores.
- A nuestro juicio es muy importante la lectura de datos geométricos intermedios en un proceso constructivo en el que se contrarrestan dos movimientos muy grandes. Por ejemplo, durante la ejecución de la dovela 32, el tesado del tirante 26 produce un movimiento ascendente del

frente del arco de 460 mm, mientras que el movimiento al hormigonar la dovela es un descenso de 390 mm. Esto resulta un movimiento en todo el ciclo de 70 mm, que es un valor del orden del 15% del de cualquiera de las dos etapas. Es decir un comportamiento de la estructura distinto al teórico en un 15% en una etapa por el motivo que sea, puede duplicar o anular el movimiento final del ciclo. Por eso es muy importante una lectura intermedia.

- Comportamiento térmico de los diversos elementos:
  - o Tirantes y elementos metálicos: tienen un comportamiento muy paralelo a la temperatura ambiente en días no soleados (figura 14). En días soleados la temperatura puede subir mucho con respecto a la temperatura ambiente. Por ejemplo, los tirantes registraron variaciones térmicas de 25°C en algunos días de verano de 2015 mientras la temperatura ambiente solo variaba 15°C (figura 15). Este efecto es debido al solemiento.

A su vez, como el hormigón tiene una inercia térmica mucho mayor, mientras el tirante se calienta y enfría, el hormigón no cambia prácticamente su temperatura, provocando diferencias térmicas entre tirantes y hormigón entre 15-20°C tanto positivas como negativas. Este es un valor muy alto que se llegó a alcanzar en varios momentos de la construcción. La norma de puentes de ferrocarril [3] preconiza unos valores de +18°C y -10°C para tirantes blancos y la norma de puentes de carretera [4] unos valores de +10°C y -10°C también para tirantes blancos. En el proyecto se usaron tirantes blancos, pero de forma conservadora, en las bases de cálculo del proyecto de detalle, se supusieron diferencias de temperatura entre tirantes y arco de

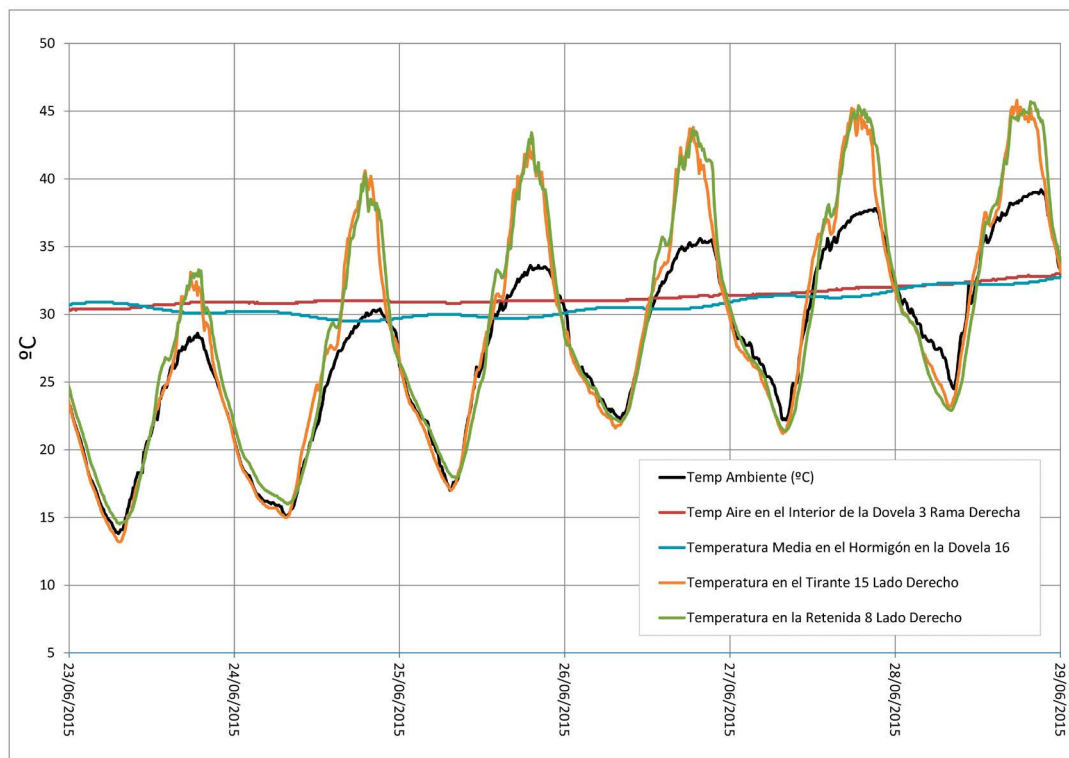


Figura 15. Temperaturas (ambiente, tirantes y hormigón) en rama norte en días soleados.

+20°C y -10°C. A su vez, debido a la orientación norte sur del puente también se supusieron diferencias de temperatura entre cables de retenida y de tiro de 5°C. Analizando el comportamiento real, se aprecia como la diferencia de temperatura entre tirantes y resto de estructura, a pesar de haberse considerado de forma más conservadora que lo que marcaba la norma, llegaba a valores mayores que los valores de cálculo. El no tener una vaina exterior en los tirantes afecta a este fenómeno, pero la norma no es muy específica en sus indicaciones. Por lo tanto, los valores indicados en la norma deberían ser estudiados para cada localización y cada proyecto de forma adecuada. Este calentamiento de los tirantes producía movimientos de descenso en el frente del voladizo en los días más soleados de 150 mm.

- o Elementos de hormigón: el comportamiento del arco en función de la temperatura del hormigón es más difícil de controlar ya que debido a los espesores de las secciones de hormigón y a la gran inercia térmica de este, es muy difícil estimar la temperatura media y la curvatura de una sección desde solo cuatro sensores. Durante la construcción del arco se trabajó principalmente con las temperaturas medias ya que se apreció una buena correlación. No obstante, se desechó la idea de intentar controlar la curvatura del arco por el gradiente térmico. Por este motivo las medidas del control geométrico más importantes se intentaban realizar por la mañana para minimizar los efectos del soleamiento en el hormigón.

El último aspecto referente al gradiente térmico en el hormigón del arco se explica con mayor detalle en el siguiente punto.

## 6. REFLEXIONES SOBRE LA TEMPERATURA Y GRADIENTE TERMICO EN LA ESTRUCTURA

Las variaciones térmicas en la estructura producen movimientos y modificación de las fuerzas en los distintos elementos muy importantes, por lo que en el análisis del estado de la estructura durante la construcción es necesario tener en cuenta la temperatura de cada elemento y realizar las comprobaciones para la situación a la temperatura de referencia.

La temperatura de los distintos elementos, varía constantemente por efecto del ciclo diario de variación de la temperatura ambiente y por la insolación, siendo el efecto distinto para cada elemento en función de diversos factores: conductividad térmica, geometría, espesor, orientación respecto del sol, etc.

Al variar la temperatura exterior, la temperatura del elemento se modifica en la superficie y dicha variación progresa hacia el interior del elemento, no siendo por tanto la temperatura de cada elemento uniforme [5]. Para el análisis del comportamiento de la estructura, el parámetro que es necesario conocer es el alargamiento e incurvación térmicos, que se intentan correlacionar con la temperatura media y gradiente térmico.

Para realizar el análisis de los diversos elementos estructurales, el plan de instrumentación se planteó con el objetivo de estimar la temperatura media de cada grupo de elementos similares. Por tanto, la disposición de los termómetros en cada elemento se diseñó para intentar obtener esta temperatura media lo más fiable posible. Desde esos datos no se podía extrapolar cuál era el gradiente térmico que se producía en cada elemento debido a la complejidad de ese parámetro. Adicionalmente, debido a la singularidad de la sección transversal

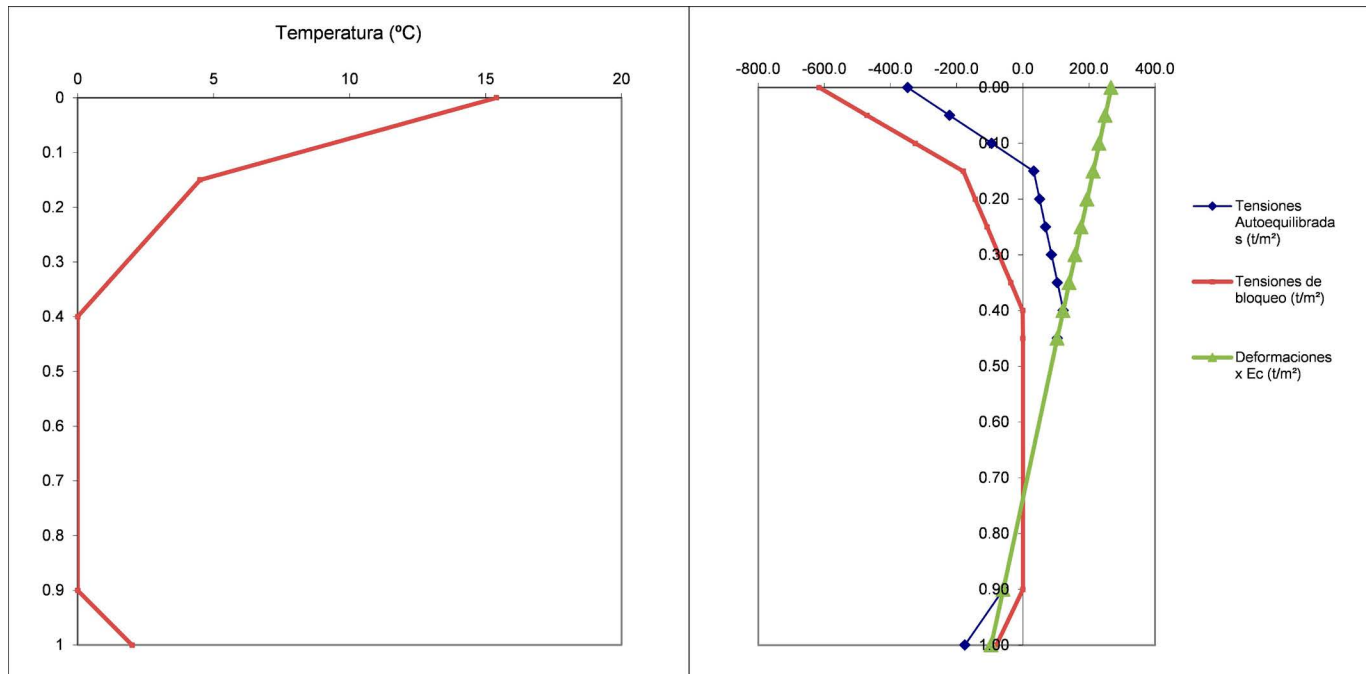


Figura 16. Distribución de temperaturas y de tensiones en la sección.

del arco, el planteamiento que hacen las normas tiene ciertas inconsistencias en nuestro caso.

El gradiente térmico se produce por la diferencia de temperatura a lo largo de la sección de los distintos elementos estructurales, debida principalmente a la radiación solar, que da lugar a curvaturas de estos elementos. Es un fenómeno que se desarrolla diariamente y de acuerdo con nuestra experiencia durante los meses de primavera o verano, en días con mucho soleamiento y recorrido térmico, se producen gradientes térmicos próximos a los máximos definidos en las normas de acciones.

Teniendo en cuenta el gradiente térmico especificado en la norma IAPF 2008 [3], durante la construcción en voladizo del arco del viaducto sobre el río Almonte esta acción sobre el arco podría producir flechas de hasta 50 mm de acuerdo con nuestros modelos de cálculo. Sin embargo las medidas topográficas de control geométrico realizadas durante la construcción del arco no reflejaban estos movimientos.

Es interesante abordar y comparar el análisis de la acción del gradiente térmico mediante las normas IAPF 2008 [3] y el Eurocódigo de acciones térmicas EN 1991-1-5 [6]. La IAPF 2008 proporciona una solución simplificada que es válida para la fase de proyecto de estructuras habituales, pero no para la comprobación del funcionamiento real de una estructura con una sección transversal fuera de los rangos habituales de los tableros de puentes.

De acuerdo con la norma IAPF el gradiente térmico se puede suponer como una variación lineal de temperatura entre las caras superior e inferior de una sección estructural, que produce la misma curvatura que el gradiente real. El valor de esta diferencia de temperatura depende de la tipología y morfología de la sección así como de la ubicación de la estructura y la presencia o carencia de protección frente a la radiación. Para la tipología de secciones en cajón como parámetros morfológicos de la sección se tienen en cuenta el canto y los anchos de las losas superior e inferior pero no los espesores de estas losas,

pues probablemente en las secciones habituales estos espesores presentan poca variabilidad.

Para el caso del arco del viaducto sobre el río Almonte, la variación térmica lineal de temperatura entre las caras superior e inferior del arco de acuerdo con la especificación de la norma IAPF es de 7°C.

El Eurocódigo propone dos metodologías para la determinación de los efectos de la acción del gradiente térmico. El denominado enfoque 1 es muy similar al procedimiento propuesto por la norma IAPF. Sin embargo, el denominado enfoque 2 resulta más sofisticado y supone una representación mucho más realista de la distribución de temperaturas dentro de una sección producida por el soleamiento y las variaciones térmicas diarias.

De acuerdo con el enfoque 2 del Eurocódigo, el gradiente térmico se analiza mediante una distribución no lineal de temperaturas a lo largo del canto de la sección, mucho más parecida a la situación real, con un incremento importante de temperatura en los decímetros superiores de la sección, ninguna variación de temperatura en la zona central de la sección y un pequeño incremento de temperatura en el decímetro inferior de la misma. Dado que esta distribución es no lineal a lo largo del canto de la sección, se producen tensiones internas autoequilibradas en la sección para mantenerla plana de acuerdo con la hipótesis de Navier. En las siguientes figuras (figura 16) se representa la variación no lineal de temperaturas a lo largo del canto de un tablero convencional así como las tensiones y curvaturas que se producen en el mismo.

Para la obtención de la ley de tensiones autoequilibradas y las deformaciones de la sección sometida a la ley no lineal de variación de temperaturas se recurre al procedimiento clásico de aplicar unas tensiones de bloqueo que anulan la deformación libre que produciría la temperatura y reaplicar a la sección completa la resultante de estas tensiones cambiada de signo para restablecer el equilibrio dentro de la sección.

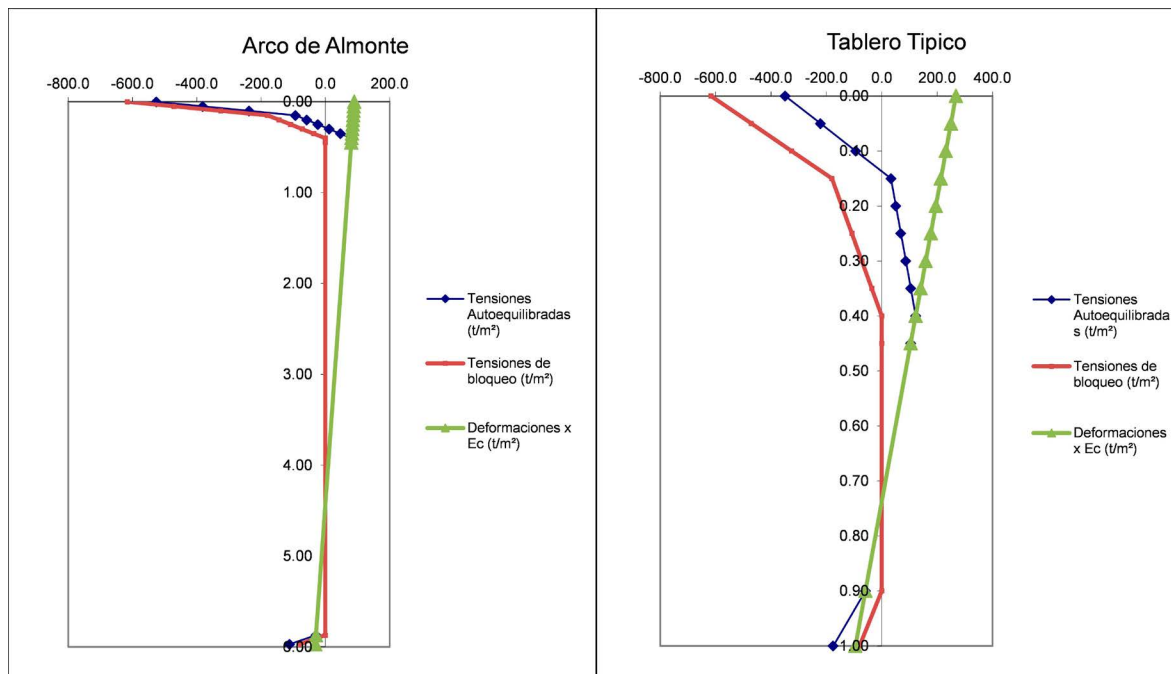


Figura 17. Comparativa del estado de deformaciones de un tablero típico y del arco de Almonte.

Para el caso de las secciones de puente habituales, las curvaturas que producen la distribución de temperaturas no lineal se aproximan mucho a los valores de curvatura propuestos en el enfoque 1. Parece obvio que la hipótesis de variación lineal de la temperatura con el canto es una simplificación del fenómeno real en la que simplemente se aproxima la curvatura experimentada por la sección despreciando el efecto de las tensiones autoequilibradas.

Sin embargo para secciones no habituales, como la sección transversal del arco del viaducto sobre el río Almonte, las curvaturas producidas por la ley no lineal de temperaturas difieren notablemente de las curvaturas estimadas por el procedimiento del enfoque 1. En este caso, los masivos espesores de la sección cajón dan lugar a una coacción superior a la habitual a las deformaciones térmicas de la parte superior de la sección de forma que se obtienen valores de curvatura equivalentes a una variación lineal de temperatura de 2.5°C un valor muy inferior al propuesto por la IAP (7°C) o el enfoque 1 del Eurocódigo. En las siguientes figuras (figura 17) se representa a la misma escala las tensiones y deformaciones en la sección de tablero del ejemplo anterior y en una sección representativa del arco del viaducto sobre el río Almonte:

Se aprecia que en el caso del arco de Almonte, las tensiones autoequilibradas se aproximan mucho a las tensiones de bloqueo, lo que significa que la rigidez de la sección es suficiente para reducir a valores muy bajos las deformaciones producidas por la variación no lineal de la temperatura. Sin embargo en el caso del tablero típico las tensiones autoequilibradas difieren de las tensiones de bloqueo porque la rigidez de la sección no es capaz de bloquear las deformaciones producidas por las diferencias de temperatura.

Por este motivo ante una misma ley no lineal de variación de temperaturas en la sección, estructuras muy masivas como el arco del viaducto sobre el río Almonte experimentan deformaciones muy inferiores a las que experimentan otras estructuras de secciones más típicas y por este motivo la especifica-

ción de la norma IAPF para la acción del gradiente térmico resulta muy conservadora en cuanto a la estimación de curvaturas en nuestro caso. En este tipo de secciones es más conveniente modelizar el gradiente con la ley no lineal de variación de temperatura en lugar de la forma simplificada.

Adicionalmente, si se pretendiera medir en la realidad esa ley no lineal de variaciones térmicas por soleamiento, sería necesario un número de sensores muy grande en todo el canto del arco. Tras analizar la realidad y viendo la complejidad del fenómeno se decidió utilizar solo 4 sensores de temperatura en ciertas secciones y trabajar solo con la temperatura media y no intentar estimar las posibles curvaturas de la sección por gradiente térmico.

Con el fin de minimizar el efecto del gradiente, las lecturas más importantes de la geometría del arco se realizaban a primera hora de la mañana ya que en esos momentos los posibles efectos por soleamiento no han empezado a producirse, evitándose su efecto.

## Referencias

- [1] G. Capellán, E. García, Aproximación al diseño conceptual y estructural del viaducto de Almonte, Hormigón y Acero, Vol. 71 (290/291). <https://doi.org/10.33586/hya.2020.2024>
- [2] D. Carnero, F. Milla, A. Alonso, P. Cavero, Construcción del arco del viaducto de Almonte, Hormigón y Acero, Vol. 71 (290/291). <https://doi.org/10.33586/hya.2019.2057>
- [3] Instrucción de acciones a considerar en puentes de ferrocarril, IAPF, España 2008.
- [4] Instrucción sobre las acciones a considerar en el proyecto de puentes de carretera, IAP, España 2011
- [5] E. Mirambell, A. Aguado, Modelo de obtención de distribuciones de temperaturas y de tensiones longitudinales autoequilibradas en puente de hormigón, Revista internacional de métodos numéricos para cálculo y diseño en ingeniería, Vol 3.2, 205-230, 1987.
- [6] Eurocódigo 1, Acciones en estructuras. Parte 1-5. Acciones generales. Acciones térmicas, AENOR, 2004