

Variación uniforme de la temperatura en puentes. Comparación de los resultados de la instrumentación de tableros con la normativa española y el Eurocódigo de acciones térmicas

Uniform temperature component in bridges. Comparison of the results of monitored decks with the Spanish codes and the Eurocode of thermal actions

Miguel Ortega Cornejo⁽¹⁾, Francisco Millanes Mato⁽²⁾ y Juan Luis Mansilla Domínguez⁽³⁾

Recibido | Received: 19-02-2013
Aceptado | Accepted: 10-04-2013

Resumen

En este artículo se contrastan los resultados de la instrumentación de temperaturas y en particular la variación uniforme de la temperatura de los tableros instrumentados en una serie de puentes de hormigón, de acero y mixtos comparando los resultados obtenidos con la aplicación de la antigua norma española de acciones térmicas (Instrucción sobre las acciones a considerar en puentes de carretera IAP-98) y con el Eurocódigo de acciones térmicas.

Como se demuestra en el artículo, los resultados obtenidos de la instrumentación se aproximan bastante bien a los resultados previstos por la formulación del Eurocódigo de acciones térmicas, y tal y como se demostró en la referencia [1], los resultados de la antigua IAP-98 quedan en muchos casos del lado de la inseguridad, lo cual ha motivado finalmente la adopción en la nueva IAP-11 las acciones térmicas del Eurocódigo.

Palabras clave: Temperaturas, Eurocódigo, IAP, dilatación, contracción, instrumentación de puentes.

Abstract

This article compares the results of the temperature instrumentation, and particularly the uniform temperature variation range of the instrumented decks of various concrete bridges, steel bridges, and composite (steel and concrete) bridges, comparing the results with the ones obtained by applying the old Spanish code of thermal actions (Instruction of actions for road bridges IAP-98) and the Eurocode of thermal actions.

As it will be shown in the article, the results obtained in the instrumentation approximate very well to the ones expected by the formulation of the Eurocode of thermal actions, and as it was proved in the reference [1], the results of applying the old IAP-98 code are in most of the cases not on the safety side, what has finally motivated the adoption of the thermal actions of Eurocode in the new IAP-11 code.

Keywords: Temperatures, Eurocode, IAP, expansion, contraction, monitored bridges.

(1) Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Universidad Europea de Madrid. Escuela Politécnica (Madrid, España). IDEAM, S.A. (Madrid, España)

(2) Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Universidad Politécnica de Madrid. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos (Madrid, España). IDEAM, S.A. (Madrid, España)

(3) Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. IDEAM, S.A. (Madrid, España)

Persona de contacto / Corresponding author: miguel.ortega@ideam.es

1. INTRODUCCIÓN

Este artículo completa el análisis normativo realizado en la referencia [1], que puede considerarse la primera parte de éste en lo que respecta al tratamiento de la variación uniforme de la temperatura en tableros de puentes, contrastando los resultados de la norma de acciones en puentes de carretera hasta hace poco vigente en España (IAP-98 [2]) con los resultados de aplicar el Eurocódigo de acciones térmicas [3] en una serie de puentes de hormigón, acero y mixtos instrumentados.

Los resultados de este análisis normativo y los análisis de la instrumentación de puentes son fruto de parte del trabajo realizado por IDEAM S.A. en UTE con Fhecor Ingenieros Consultores y Torroja Ingeniería, para la Dirección Técnica de la Dirección General de Carreteras del Ministerio de Fomento, para la redacción de la nueva Instrucción sobre las acciones a considerar en puentes de carretera IAP-11 [4], trabajo que ha sido dirigido por Pilar Crespo, Jefa del Área de Estructuras y Carlos Paradela, Jefe del Servicio de Puentes del Ministerio de Fomento.

Como se demostró en la referencia [1], los resultados de la aplicación de la IAP-98 [2], hasta hace poco vigente en España, llevaba a resultados para la variación uniforme de temperatura inseguros y muy inferiores a los del Eurocódigo [3]. Este hecho se ha contrastado con los resultados de la instrumentación de una serie de puentes de hormigón, acero y mixtos, cuyos resultados se describen con detalle en este artículo, cuestión que finalmente ha servido para confirmar que el tratamiento de la acción térmica de la variación uniforme de la temperatura de tableros en el Eurocódigo [3] es la que realmente mejor se adecúa al comportamiento térmico real de los tableros de puentes, y ha permitido finalmente la adopción de esta formulación en la nueva IAP-11 [4].

Se han analizado las instrumentaciones de temperaturas de los viaductos siguientes:

- Puente atirantado sobre el río Iregua. Tablero de hormigón.
- Viaducto mixto Arroyo las Piedras.
- Viaducto mixto de Archidona.
- Viaducto del Tablate II. Con tablero mixto y arcos metálicos.
- Viaducto de Alconétar. Con tablero mixto y arcos metálicos.
- Viaducto de Arroyo del Valle en Miraflores. Tablero en sección cajón de hormigón.
- Puente sobre el río de Almonte. Tablero con sección losa de hormigón y arco en sección cajón de hormigón.

- Viaducto de Montabiz. Tablero en sección cajón de hormigón.

La explicación pormenorizada de cada una de estas instrumentaciones de temperaturas obligaría a la redacción de un artículo específico para cada puente, en la línea de las referencias [5] y [6], pero en este artículo simplemente se incluyen las principales conclusiones en lo referente a la variación uniforme de temperaturas sin entrar en demasiadas disquisiciones particulares en cada puente, centrándonos en la comparación de los resultados obtenidos con los teóricos que resultarían de aplicar la formulación de acciones térmicas de la IAP-98 [2] y el Eurocódigo [3].

En los casos de los Viaductos de Arroyo las Piedras, Archidona, Alconetar, y Arroyo del Valle, la instrumentación dispuesta ha permitido, además del análisis de la variación uniforme de la temperatura media de la sección ponderando las diferentes áreas representativas cercanas a cada termómetro, la comparación de los movimientos libres del tablero en estribos (instrumentados con transductores de movimiento longitudinal) con los teóricos calculados a partir de dicha temperatura media, lográndose resultados con una gran precisión en todos los casos.

2. CONTRASTE DE LOS RESULTADOS DE LA INSTRUMENTACIÓN DE TEMPERATURAS EN PUENTES REALES CON LA FORMULACIÓN DEL EUROCÓDIGO

2.1. Puente atirantado sobre el río Iregua en Logroño

En el año 2005, aprovechando el tercer congreso de ACHE, P. Crespo ya realizó en la referencia [5] un análisis de las normas de acciones térmicas comparando los resultados de la aplicación de la IAP-98 [2] con el Eurocódigo de acciones térmicas [3], y el contraste con la instrumentación de temperaturas del tablero del puente atirantado sobre el río Iregua en Logroño, puente con proyecto original y asistencia técnica a la dirección de obra de IDEAM S.A. y proyecto modificado realizado por Proes.

Como veremos más adelante, las conclusiones obtenidas entonces por P. Crespo fueron muy similares a las que los autores de este artículo han obtenido en el resto de puentes instrumentados, tanto de hormigón, como de acero o mixtos, y que se describen más adelante en este artículo.

La sección transversal del tablero del puente sobre el río Iregua se compone de dos vigas de hormigón prefabricadas y losa "in situ" con jabalcones laterales (Figura 1).

Con los resultados de la instrumentación de 4 años, analizada en su día por P. Crespo en [5], se demostraba cómo en ese reducido periodo de tiempo, práctica-



Figura 1. Vista del tablero del puente sobre el río Iregua en Logroño

Tabla 1. Resultados de la instrumentación del Viaducto del río Iregua según ref. [5]

(4 años de medidas)	$T_{e,max} / (T_{max})$	$T_{e,min} / (T_{min})$	ΔT_N
Valores medidos	+35,7°C / (+36,8°C)	-1,5°C / (sin dato)	37,2°C
Valores teóricos IAP-98 [2]	–	–	38,8°C
Valores teóricos Eurocódigo [3]	+45,6°C / (+43,6°C)	-9,8°C / (-17,8°C)	55,4°C

mente ya se había medido una variación uniforme total de temperatura en el tablero (37,6°C) equivalente al resultado de aplicar la IAP-98 [2] para un periodo de 100 años de vida útil (38,8°C), mientras que los resultados de aplicar el Eurocódigo (55,4°C) mantenían bastante margen de seguridad frente a la variación uniforme de temperatura observada. El resumen de los resultados de dicho análisis se repite en la tabla 1.

Este resultado hacía ya ver lo adelantado en la referencia [1], que los resultados de las aplicación de la variación uniforme de temperatura según la antigua IAP-98 [2], al menos en tableros de hormigón, podía quedar del lado de la inseguridad.

En la tabla 1, y posteriores tablas de otros puentes resumidas en este artículo, se emplea la nomenclatura del Eurocódigo [3] (nomenclatura que se ha heredado en la nueva IAP-11 [4]), donde:

T_{max} es el valor característico de la temperatura máxima del aire a la sombra en el lugar del emplazamiento del puente.

T_{min} es el valor característico de la temperatura mínima del aire a la sombra en el lugar del emplazamiento del puente.

$T_{e,max}$ es el valor de la temperatura máxima del puente, obtenida para un periodo de retorno de 100 años.

$T_{e,min}$ es el valor de la temperatura mínima del puente, obtenida para un periodo de retorno de 100 años.

ΔT_N es la variación total de la componente uniforme de la temperatura del puente:

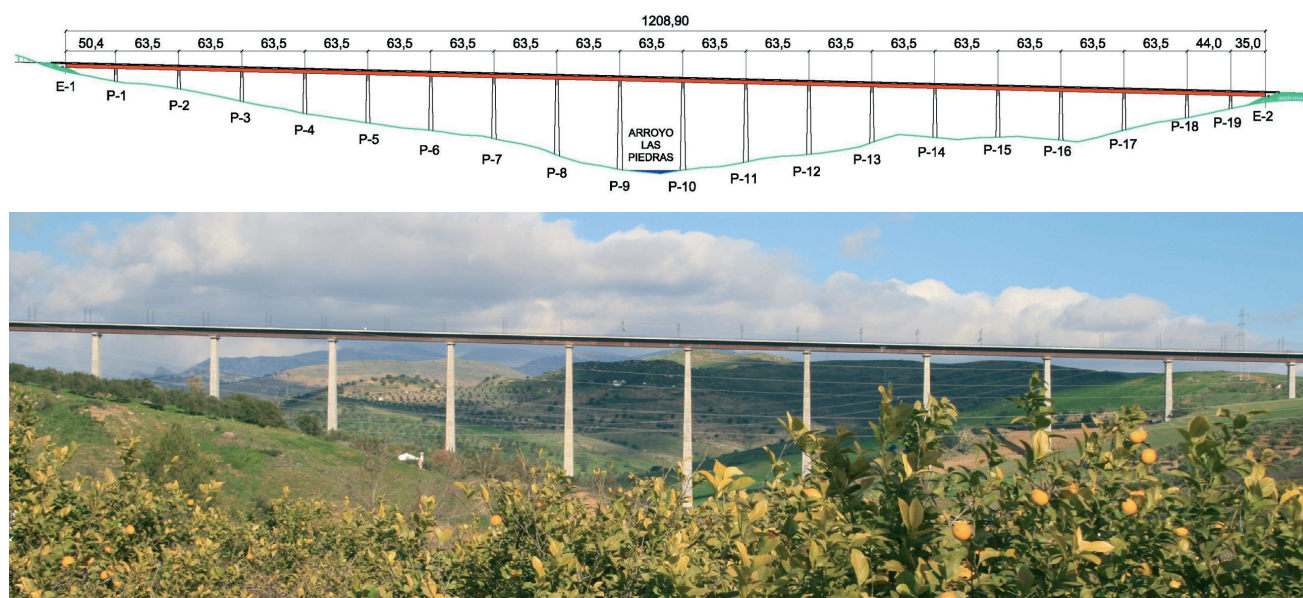
$$\Delta T_N = T_{e,max} - T_{e,min} \quad (1)$$

En las tablas de comparación de resultados mostradas en este artículo no aparecen los valores de las temperaturas máximas ni mínimas del puente según la IAP-98[2], ya que dicha norma sólo formulaba la variación uniforme total, sin aportar criterios sobre estos valores; por estos motivos aparecen sin rellenar estos datos en las tablas.

En los sucesivos puntos de este apartado se resumen los resultados de la instrumentación de otros puentes, comparando los resultados de la variación uniforme de temperatura, obtenida de las medidas de una serie de termómetros dispuestos en la sección transversal de los tableros, comparando los resultados con lo tipificado por la antigua IAP-98[2] y con el Eurocódigo (EN 1991-1-5) [3].

2.2. Viaducto mixto de alta velocidad Arroyo las Piedras

El viaducto mixto Arroyo las Piedras (refs. [7] y [8]), proyectado por IDEAM, ubicado en Álora en la línea



Figuras 2a y 2b. Alzado y vista del Viaducto Arroyo las Piedras

de alta velocidad Córdoba-Málaga, es el primer viaducto mixto de las líneas de alta velocidad españolas, tiene una longitud total de 1.208,90 m, con vanos tipo de 63,50 m, y altura máxima de pilas de hasta 96 m (Figuras 2a y 2b).

Tratándose del primer viaducto mixto de las líneas de alta velocidad españolas, ADIF consideró oportuno realizar un control de las variaciones térmicas y movimientos del tablero del puente, ya que debido a su longitud y altura de pilas, el puente no tiene un punto fijo en un estribo, como suele ser una solución clásica en alta velocidad, sino que el tablero está vinculado en dirección longitudinal con apoyos fijos en las cuatro pilas centrales con alturas del orden de 90 m, y por lo tanto el punto fijo del tablero puede variar de posición ligeramente, debido a la propia flexibilidad de las cuatro pilas y en función de las dilataciones y contracciones del tablero y de los rozamientos relativos de unos apoyos deslizantes y otros. Para confirmar el correcto comportamiento del tablero en dirección longitudinal según lo previsto en proyecto se analizaron la respuesta térmica del tablero y sus movimientos.

Las referencias [6] y [9] describen en detalle los resultados de la instrumentación de temperaturas del tablero mixto del viaducto, así como los criterios seguidos para la obtención de la temperatura media del tablero. La temperatura media del tablero, obtenida como la suma ponderada de las temperaturas de

cada una de las zonas de la sección transversal, se contrastó con gran precisión comprobando los movimientos diarios de dilatación y contracción del tablero en los extremos libres en estribos, demostrando además cómo la temperatura media de la sección transversal mixta sigue con gran precisión la temperatura interior del aire dentro de la sección del cajón estricto mixto (ver referencia [8]).

En un periodo de tiempo de control de temperaturas de apenas 2 años se llegó a medir una variación uniforme de temperatura en el tablero de unos 36°C, relativamente cercanos a los resultados teóricos que resultarían de la IAP-98 [2] para un periodo de 100 años de vida útil (44°C), mientras que los resultados de aplicar el Eurocódigo [3] llevarían a resultados bastante superiores (58,7°C) como parecería razonable (tabla 2).

Estos resultados y el gráfico de la Figura 3 confirman lo adecuado de la formulación del Eurocódigo [3] (adoptada en la nueva IAP-11[4]) para obtener los valores máximos y mínimos de la temperatura uniforme de un tablero mixto en función de las temperaturas máxima y mínima ambiente del aire a la sombra.

En dicho gráfico se aprecia cómo los valores medidos de temperaturas máximas en el tablero quedan ligeramente por debajo en la recta superior del gráfico, confir-

Tabla 2. Resultados de la instrumentación del Viaducto Arroyo las Piedras (ref. [8])

(2 años de medidas)	$T_{e,max} / (T_{max})$	$T_{e,min} / (T_{min})$	ΔT_N
Valores medidos	+41°C / (+39°C)	+5°C / (+1°C)	36°C
Valores teóricos IAP-98 [2]	—	—	44°C
Valores teóricos Eurocódigo [3]	+53,8°C / (+49,8°C)	-4,9°C / (-8,9°C)	58,7°C

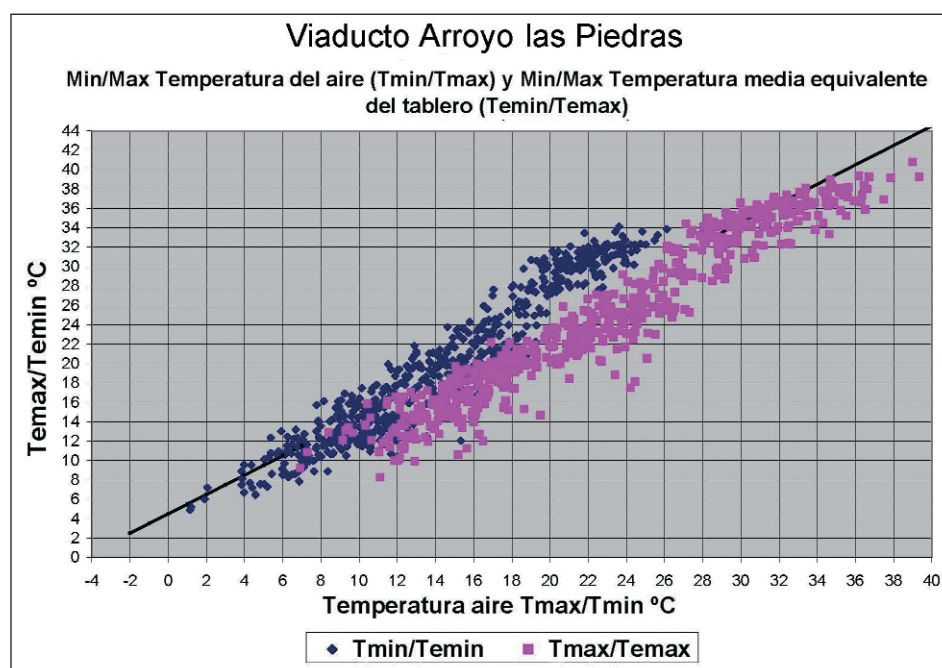


Figura 3. Relación entre $T_{\max}/T_{\min}$ del aire a la sombra (eje de abscisas) y $T_{e,\max}/T_{e,\min}$ temperaturas equivalentes máximas y mínimas diarias (eje de ordenadas) de la sección mixta del Viaducto Arroyo las Piedras. Comparación con la formulación del Eurocódigo [3].

mando el margen existente con la formulación del Eurocódigo, y cómo se ajustan bastante bien con la recta inferior para las temperaturas mínimas, aunque quedan algo por debajo. Lo normal sería que los puntos con temperaturas mínimas más bajas estuvieran por encima de dicha recta, cuestión que con toda probabilidad ocurriría cuando la temperatura ambiente del aire a la sombra bajase por debajo de 0°C , pero dado que el periodo de datos con mediciones no ha sido demasiado amplio, menor de 2 años, no se llegaron a medir temperaturas ambientes del aire a la sombra negativas por debajo de 0°C en la zona de ubicación del puente.

Se confirma asimismo, tal y como establece el Eurocódigo [3], que el orden de magnitud de la carrera total de la temperatura equivalente de un tablero mixto es similar al de la carrera total de la temperatura ambiente, y no superior en más de $5^{\circ}\text{C}/7^{\circ}\text{C}$ a la de un tablero de hormigón y en cambio muy inferior (unos 19°C menor) a la que se tendría en un viaducto completamente metálico.

2.3. Viaducto mixto de alta velocidad de Archidona

Tras la satisfactoria experiencia en el proyecto y ejecución del viaducto Arroyo las Piedras, se repitió el mismo tipo estructural con un tablero mixto con sección transversal bijnáca en cajón estricto para el proyecto del viaducto de Archidona [10] en la línea de alta velocidad Antequera-Granada en el tramo Archidona-Peña de los Enamorados.

El proyecto realizado por IDEAM, se concibió para dar solución a la necesidad de salvar una longitud total de valle de 3.150 m con unos condicionantes ciertamente singulares:

- situación en una zona de acciones sísmicas importantes (aceleración sísmica básica: $0,11\text{g}$; aceleración sísmica de cálculo: $0,18\text{g}$);
- altura media de pilas en el entorno de los 25 m;
- condición de ADIF de evitar la ubicación de aparatos de dilatación de vía intermedios en la estructura, respetando además unos movimientos totales máximos en las juntas de vía de 1.200 mm.

La posible solución de múltiples vanos isostáticos, que resulta en general adecuada para viaductos de gran longitud y baja cota de rasante, sin necesidad de disponer aparatos de dilatación de vía, se descartó por la excesiva deformabilidad del conjunto pilas+cimentaciones, no admisible por la vía, frente a las acciones de frenado y del sismo de servicio, resultando además muy penalizada por la resistencia frente al sismo máximo de cálculo, lo cual obligó a adoptar la solución de dintel continuo sin juntas.

Partiendo del condicionante establecido por ADIF, por razones de mantenimiento, de no disponer aparatos de dilatación de vía en ningún punto intermedio del tablero, el punto fijo hubo de quedar obligatoriamente ubicado aproximadamente en el centro de los 3.150 m de longitud total del viaducto, obteniéndose unas longitudes máximas dilatables en ambos estribos cercanas a los 1.600 m (Figura 4). Debido a la deformación que resultaría por acciones térmicas y reológicas de emplear una solución en hormigón (que habría dado lugar a movimientos superiores a los recorridos máximos admisibles por los aparatos de dilatación de vía), se eligió la solución descrita en dintel

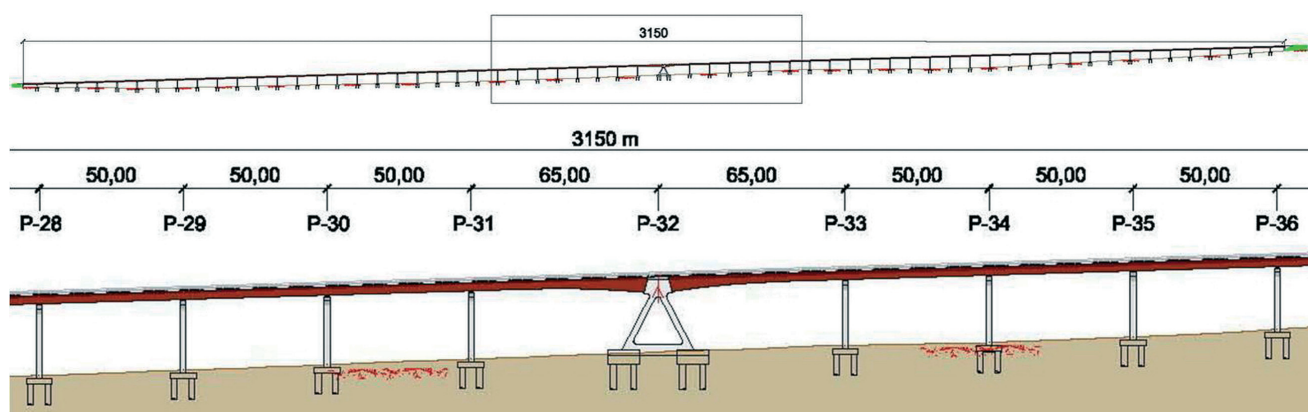


Figura 4. Alzado del viaducto de Archidona

mixto, del cual se contaba con experiencia reciente por el diseño del viaducto sobre el Arroyo las Piedras.

Con esta disposición y un único punto fijo en el centro, el viaducto de Archidona, con 3.150 m de tablero continuo, es el viaducto de alta velocidad más largo del mundo sin juntas ni aparatos de dilatación de vía intermedios (Figura 5).

Esta importante longitud dilatable, con 1.600+1.550 m, pudo abordarse gracias al análisis previo de las mediciones de la instrumentación de temperaturas y movimientos del viaducto Arroyo las Piedras, ejecutado con anterioridad, que permitió conocer realmente la respuesta frente a deformaciones longitudinales del tablero mixto y comparar los resultados con los teóricos de aplicar las diferentes normas, tanto de los efectos térmicos como los reológicos.

En este caso, se propuso a ADIF repetir una instrumentación de temperaturas y control de movimientos del tablero, que permitieran seguir durante las fases de ejecución el correcto comportamiento del tablero según lo previsto en proyecto.

La tabla 3 resume los resultados obtenidos de la medición de temperaturas del tablero, comparando con los resultados teóricos de aplicar la IAP-98[2] y el Eurocódigo de acciones térmicas [3] para un periodo de 100 años de vida útil para el Viaducto de Archidona.

El gráfico de la Figura 6 confirma en la sección transversal mixta instrumentada del Viaducto de Archidona, como sucedía en el caso del viaducto Arroyo las Piedras (Figura 3), lo adecuada de la formulación del Eurocódigo [3] para predecir los valores máximos y mínimos de la temperatura uniforme de un tablero mixto en función de las temperaturas máxima y mínima ambiente del aire a la sombra, con resultados muy parecidos.

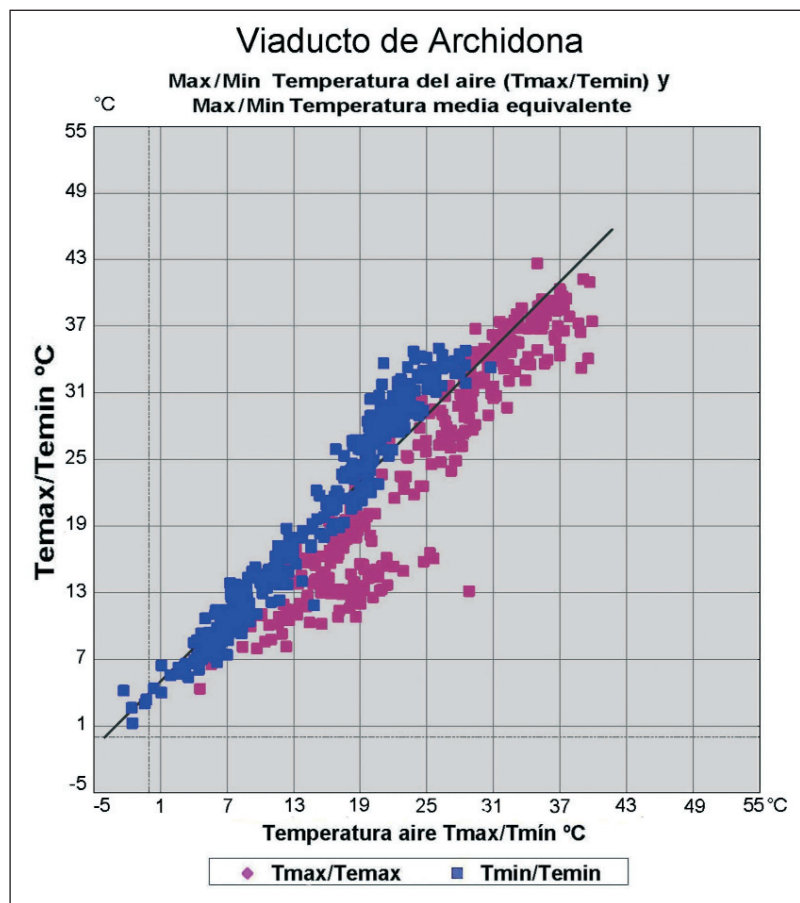
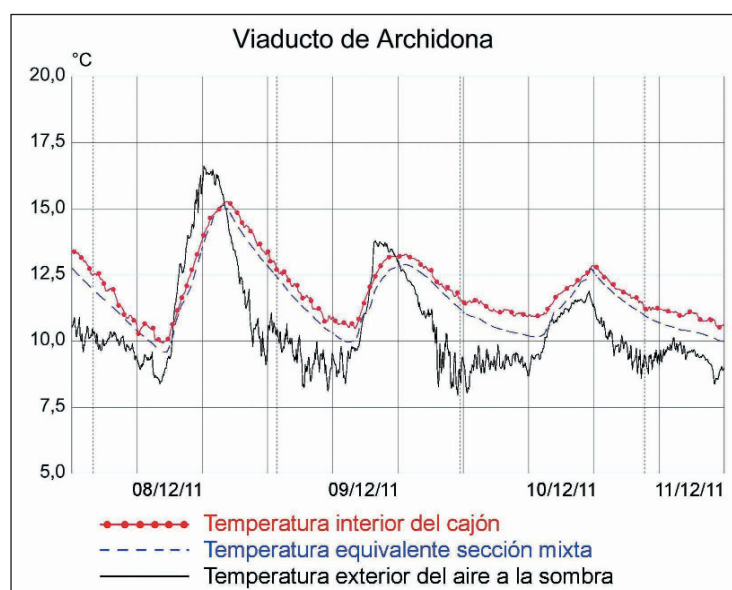
El gráfico de la Figura 7 muestra en 4 días representativos del mes de diciembre de 2011, como ya se comprobó en el Viaducto Arroyo las Piedras (ver referencia [8]), la adecuada correlación de la temperatura media equivalente de la sección mixta del tablero (en trazo discontinuo y color azul en la Figura 7), con la temperatura del aire en el interior de la sección mixta (en trazo de línea con puntos intercalados y color rojo en la Figura 7), que



Figura 5. Vista del viaducto mixto de Archidona concluido

Tabla 3. Resultados de la instrumentación del Viaducto Mixto de alta velocidad de Archidona

(1 año y 11 meses de medidas)	$T_{e,max} / (T_{max})$	$T_{e,min} / (T_{min})$	ΔT_N
Valores medidos	+42,7°C / (+34,9°C)	+1,2°C / (-1,5°C)	41,5°C
Valores teóricos IAP-98 [2]	–	–	44,0°C
Valores teóricos Eurocódigo [3]	+53,8°C / (+49,8°C)	-9,3°C / (-13,3°C)	63,1°C

**Figura 6.** Relación entre T_{max}/T_{min} del aire a la sombra (eje de abscisas) y $T_{e,max}/T_{e,min}$ temperaturas equivalentes máximas y mínimas diarias (eje de ordenadas) de la sección mixta en el Viaducto de Archidona. Comparación con la formulación del Eurocódigo [3]**Figura 7.** Relación entre la temperatura media equivalente del tablero, la temperatura del aire del interior de la sección mixta del Viaducto de Archidona y la temperatura exterior del aire a la sombra

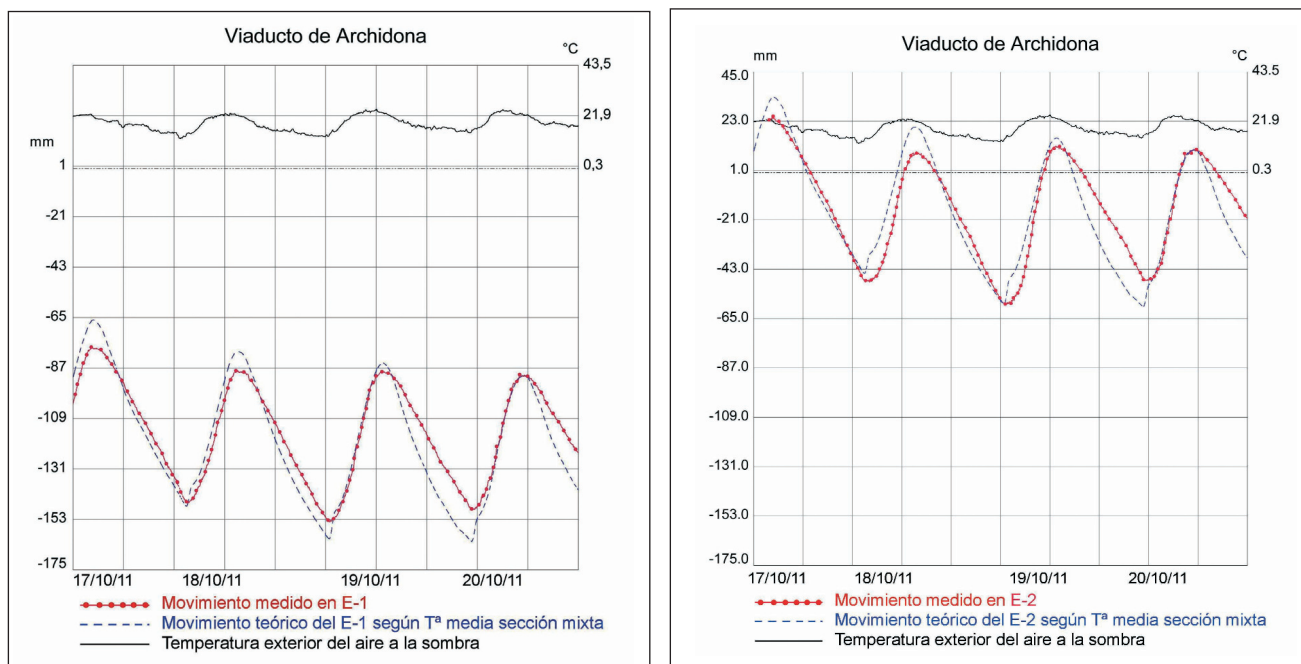


Figura 8a y 8b. Relación entre los movimientos medidos en los extremos del tablero en ambos estribos y el movimiento teórico en función de la temperatura media equivalente obtenida del tablero, y su relación con la temperatura ambiente del aire a la sombra en los mismos días del mes de octubre de 2011

siguen con una cierta inercia térmica a la temperatura ambiente exterior del aire a la sombra (en trazo continuo y color negro en la Figura 7).

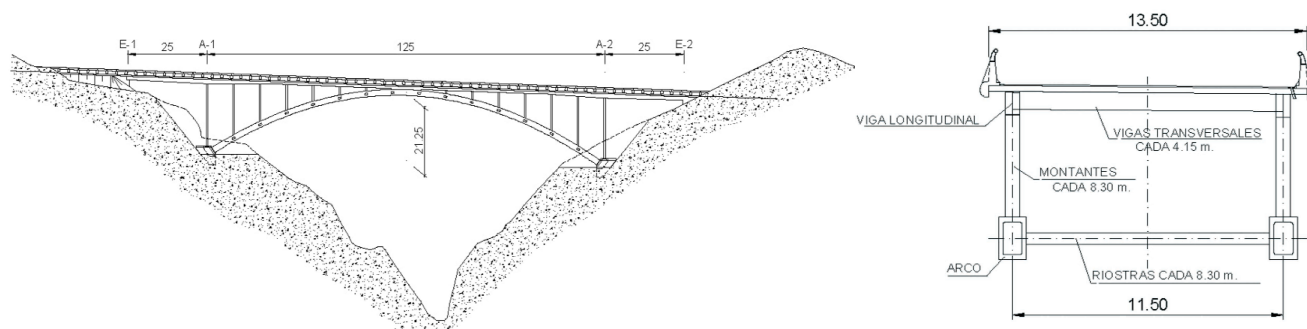
La Figura 8 muestra la comparación entre los movimientos medidos en los extremos del tablero en ambos estribos (la Figura 8a muestra la comparación del E-1, y la de 8b la del E-2), instrumentados mediante transductores de movimiento longitudinal laser, y el movimiento teórico que se obtendría en dichos extremos en función de la temperatura media equivalente obtenida del tablero, teniendo en cuenta la longitud desde el extremo del estribo al punto fijo, y su relación con la temperatura ambiente del aire a la sombra en los mismos días del mes de octubre de 2011. Como se puede comprobar en ambos gráficos, la correlación es muy buena y permitiría predecir los movimientos partiendo de la temperatura media de la sección en caso de no disponer de transductores de movimiento longitudinal en estribos, y permite asimismo confirmar con mucha precisión los máximos movimientos que sucederán en las juntas en estribos partiendo de la previsión de temperaturas máximas

y mínimas en la sección transversal, en función de la formulación establecida por el Eurocódigo [3], tal y como confirma el gráfico de la Figura 7.

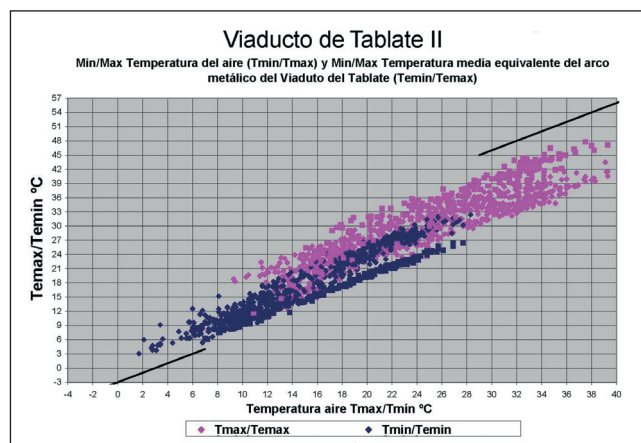
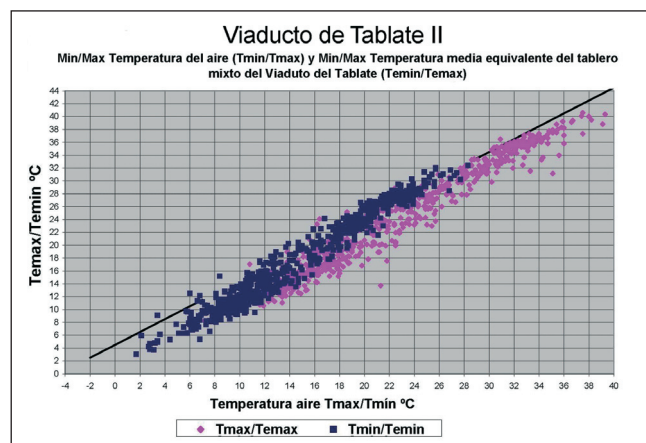
2.4. Viaducto de Tablete II

El viaducto de Tablete II (Figuras 9a y 9b) en la autovía A-44 entre Granada y Motril, es un doble arco metálico de 125 m de luz, con tablero superior mixto, proyecto de Torroja Ingeniería. El arco metálico presenta una sección transversal con dos secciones rectangulares metálicas en cajón cerrado de 1,80 m de canto por 1,20 m de ancho, y el tablero mixto se compone de dos vigas metálicas doble T conectadas en simple acción mixta con la losa superior que materializa la calzada.

Las Figuras 10a y 10b muestran los resultados de una comparación análoga a las anteriores en las secciones del tablero mixto y en la sección de uno de los dos arcos metálicos que componen la sección transversal, comparados los resultados de las temperaturas máximas y mínimas de cada sección del tablero (mixto) y



Figuras 9a y 9b. Alzado y sección transversal del Viaducto de Tablete II.



Figuras 10a y 10b. Relación diaria de $T_{\max}/T_{\min}$ y $T_{e,\max}/T_{e,\min}$ de la sección mixta del tablero (figura izquierda), y de la sección metálica del arco del Viaducto de Tablete II (figura derecha)

del arco (metálico) del puente en función de las temperaturas máximas y mínimas del aire a la sombra con la formulación del Eurocódigo [3].

Como ya sucedía con el tablero mixto del Viaducto Arroyo las Piedras (Figura 3) y el Viaducto de Archidona (Figura 6), los valores medidos de las temperaturas máximas en el tablero mixto del Viaducto de Tablete II quedan ligeramente por debajo en la recta superior del gráfico, confirmando el suficiente margen con la formulación del Eurocódigo, y en cambio parece que se produce un cierto desajuste en la zona de temperaturas mínimas, con valores ligeramente inferiores de los teóricos de la formulación del Eurocódigo.

Estos pequeños desajustes en las zonas de temperaturas mínimas ya los detectó también P. Crespo en el tablero de hormigón del Viaducto del río Iregua [5], y como se aprecia en las Figuras 3 y 6 sucedía también algo similar en el tablero mixto del Viaducto Arroyo las Piedras y en el de Archidona respectivamente. A nuestro juicio este hecho es bastante razonable, tanto en tableros de hormigón como en tableros mixtos, en los cuales la sección parcial de hormigón (de la losa y el hormigón de fondo) tienen siempre una gran influencia en la respuesta térmica de la sección por su mayor área relativa, dado que las temperaturas mínimas medidas en los puentes instrumentados se limitan a un periodo reducido de tiempo

(en el mejor de los casos de unos pocos años), y las temperaturas mínimas registradas quedan bastante lejos de las temperaturas mínimas absolutas previsibles en la zona donde se ubica el puente para una vida útil de 100 años. En este caso, no se han observado temperaturas mínimas por debajo de $+1,5^{\circ}\text{C}$, y con toda probabilidad cuando la temperatura ambiente baje más y alcance valores negativos por debajo de 0°C , las temperaturas de la sección mixta acabarán por ubicarse por encima de la recta inferior prevista por el Eurocódigo (Figura 10a), y más pensando que la previsión de temperatura mínima absoluta del aire a la sombra podría llegar a $-15,5^{\circ}\text{C}$ en la zona de ubicación del puente.

En cambio, el gráfico con la nube de puntos con las temperaturas máximas y mínimas del arco metálico (Figura 10b) en función de las temperaturas máximas y mínimas del aire a la sombra, quedan perfectamente dentro de los márgenes de las dos rectas establecidas por el Eurocódigo [3], confirmando el adecuado margen de su formulación.

Como sucedía en la sección transversal mixta del Viaducto Arroyo las Piedras [8] y en la del Viaducto de Archidona (Figura 7), la temperatura media de la sección metálica del arco coincide también con gran precisión con la temperatura del aire del interior de la sección rectangular. En la Figura 11 se representan 4 días del mes

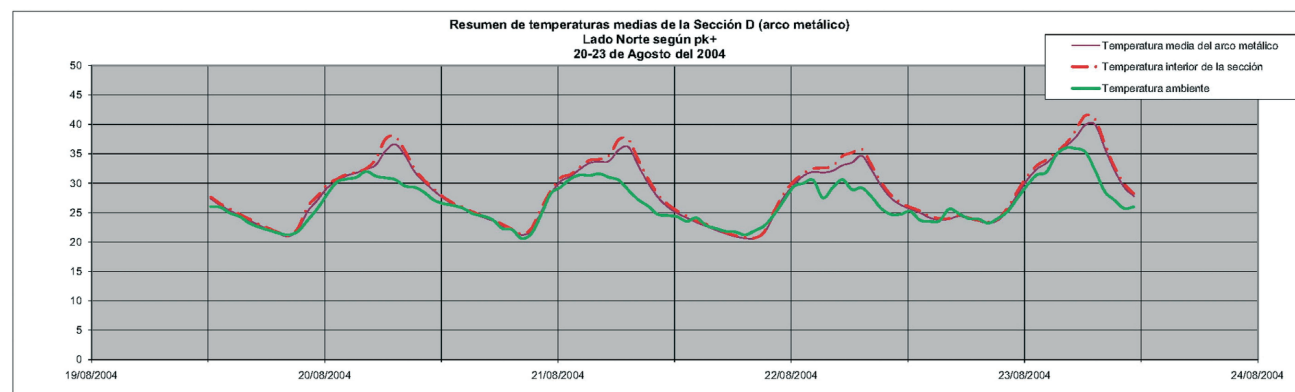


Figura 11. Relación entre la temperatura media equivalente del tablero, la temperatura del aire del interior de la sección metálica del Viaducto de Tablete II y la temperatura exterior del aire a la sombra.

Tabla 4. Resultados de la instrumentación de la sección mixta del tablero del Viaducto de Tablate II

(3 años de medidas 2002-2005)	$T_{e,max} / (T_{max})$	$T_{e,min} / (T_{min})$	ΔT_N
Valores medidos	+40,5°C / (+39,0°C)	+3,0°C / (1,5°C)	37,5°C
Valores teóricos IAP-98 [2]	–	–	47,0°C
Valores teóricos Eurocódigo [3]	+52,8°C / (+48,8°C)	-11,5°C / (-15,5°C)	64,3°C

Tabla 5. Resultados de la instrumentación de la sección metálica del arco del Viaducto de Tablate II

(3 años de medidas 2002-2005)	$T_{e,max} / (T_{max})$	$T_{e,min} / (T_{min})$	ΔT_N
Valores medidos	+48°C / (+39°C)	+3,0°C / (1,5°C)	45,0°C
Valores teóricos IAP-98 [2]	–	–	53,0°C
Valores teóricos Eurocódigo [3]	+64,8°C / (+48,8°C)	-18,5°C / (-15,5°C)	83,3°C

de agosto de 2004 con resultados muy similares de la temperatura media de la sección metálica del arco (en trazo continuo y color morado) con la temperatura interior del aire de la sección rectangular (en trazo discontinuo y color rojo), con ligeras diferencias con la temperatura del aire exterior a la sombra (en trazo continuo y color verde), y los lógicos decalajes en función del soleamiento directo sobre el arco metálico, que se denota con el pico que se aprecia al iniciar la tarde e incidir el sol directamente sobre la sección instrumentada.

La tabla 4 resume los resultados del tablero mixto de la Figura 10a y la tabla 5 los del arco metálico de la Figura 10b, comparando los resultados con las formulaciones de la sección instrumentadas con los de aplicar la antigua IAP-98 [2] y el Eurocódigo [3].

Como podemos apreciar en las tablas 4 y 5, en un periodo de mediciones de apenas 3 años, se han medido variaciones uniformes de temperatura (37,5 °C en la sección mixta del tablero, y 45,0°C en la sección metálica del arco) relativamente cercanas a las teóricas establecidas por la antigua IAP-98 (47°C y 53°C respectivamente), en el entorno del 78% para la sección mixta y del 85% para la sección metálica, mientras que si se comparan las mediciones realiza-

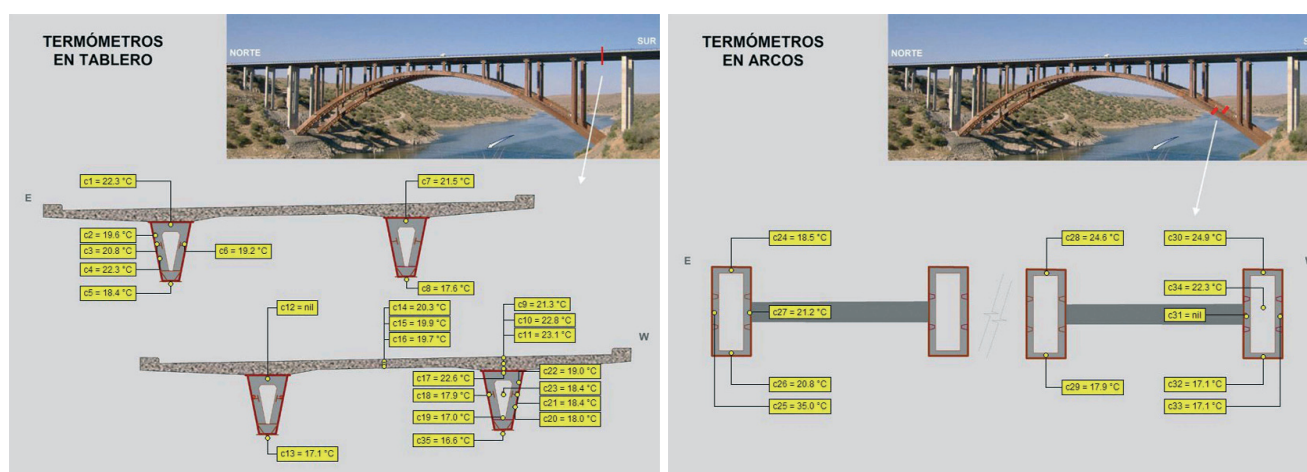
das con las teóricas establecidas por el Eurocódigo para un periodo de retorno de 100 años (64,3°C y 83,3°C respectivamente) queda mucho más margen (con valores medidos en 3 años en el entorno ambas del 55% de los teóricos tipificados), lo cual parece bastante más razonable tratándose de mediciones observadas durante sólo 3 años.

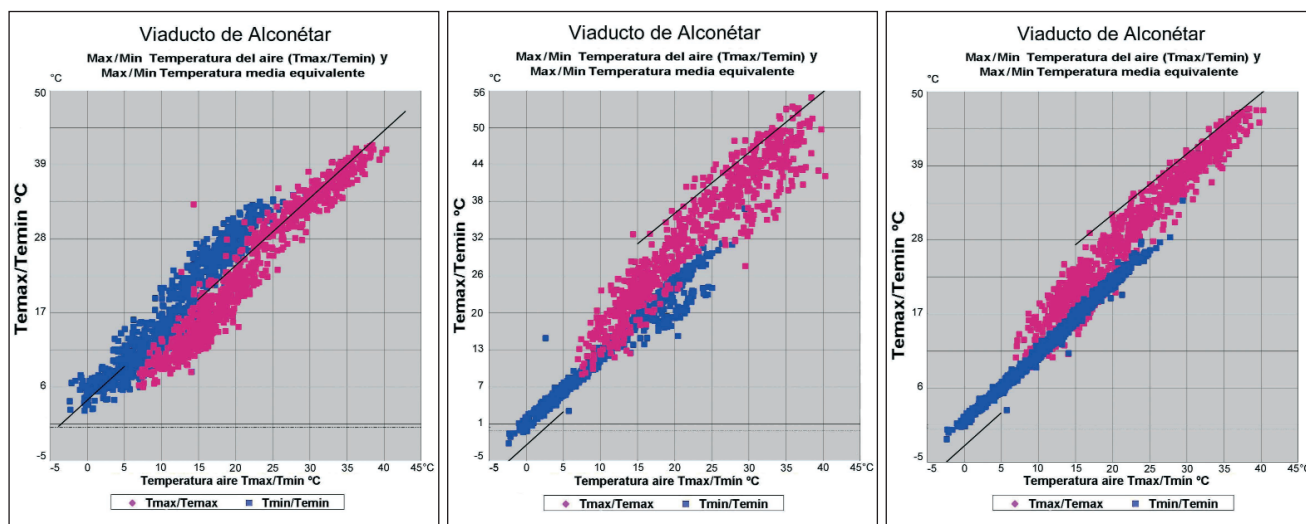
2.5. Viaducto de Alconétar sobre el río Tajo.

El viaducto doble de Alconétar [11], situado sobre el río Tajo en la cola del embalse de Alcántara en la autovía A-66, proyectado por Eipsa, es un arco metálico de 220 m de luz, con tablero superior mixto. IDEAM participó como asesoría especializada en estructuras en la Asistencia Técnica a la Dirección de las Obras.

La sección transversal del arco es un cajón rectangular cerrado metálico, y el tablero mixto se materializa mediante dos vigas metálicas con forma trapezoidal cerrada conectadas a la losa superior, materializando una sección en simple acción mixta.

Las Figuras 12a y 12b muestran dos infogramas de la instrumentación de temperaturas del tablero mixto y del

**Figuras 12a y 12b. Infogramas con instrumentación térmica del tablero mixto y del arco metálico del viaducto**



Figuras 13a, 13b y 13c. Relación diaria de $T_{\max}/T_{\min}$ y $T_{e,\max}/T_{e,\min}$ de la sección mixta del tablero del lado oeste (figura izquierda), del arco izquierdo de la calzada este (figura central) y del arco derecho de la calzada oeste (figura derecha)

arco metálico (imágenes cortesía de Kinesia Ingeniería, encargada de la instrumentación del viaducto).

De un análisis de las temperaturas medias de las secciones instrumentadas en el tablero y los arcos metálicos, se ha realizado la misma comparación diaria de máximos y mínimos, realizada en el resto de viaductos descritos con anterioridad. La Figura 13 muestran los resultados con las nubes de puntos de la comparación de los resultados diarios de la relación entre temperaturas ambientes del aire a la sombra máxima y mínima de ($T_{\max}/T_{\min}$) y las temperaturas medias equivalentes máxima y mínima de las secciones ($T_{e,\max}/T_{e,\min}$) del tablero mixto (Figura 13a) y de dos de las secciones del arco, una de la calzada Este (Figura 13b) y otra de la calzada Oeste (Figura 13c), comparando los resultados, como en casos anteriores con los obtenidos de aplicar la formulación del Eurocódigo [3].

En dichos gráficos se aprecia que, tanto la sección mixta del tablero como las secciones metálicas de los arcos instrumentados, presentan resultados de tem-

peraturas máximas y mínimas, en sus zonas extremas, contenidas dentro de los límites establecidos por el Eurocódigo, confirmando el correcto ajuste de su formulación, como en general ocurría con las instrumentaciones del resto de viaductos analizados previamente.

Se aprecia, de forma parecida a lo que ocurría con las secciones metálicas del arco de Tablate II (Figura 10b), que las temperaturas mínimas, en secciones metálicas, siguen con mucha fidelidad una línea con poca dispersión (Figuras 13b y 13c), bastante menor que la observada en la zona de temperaturas máximas, al no existir soleamiento al suceder la temperatura mínima siempre de noche. Esta nube de puntos con las mínimas diarias se ajusta también bastante bien a la recta inferior propuesta por el Eurocódigo [3].

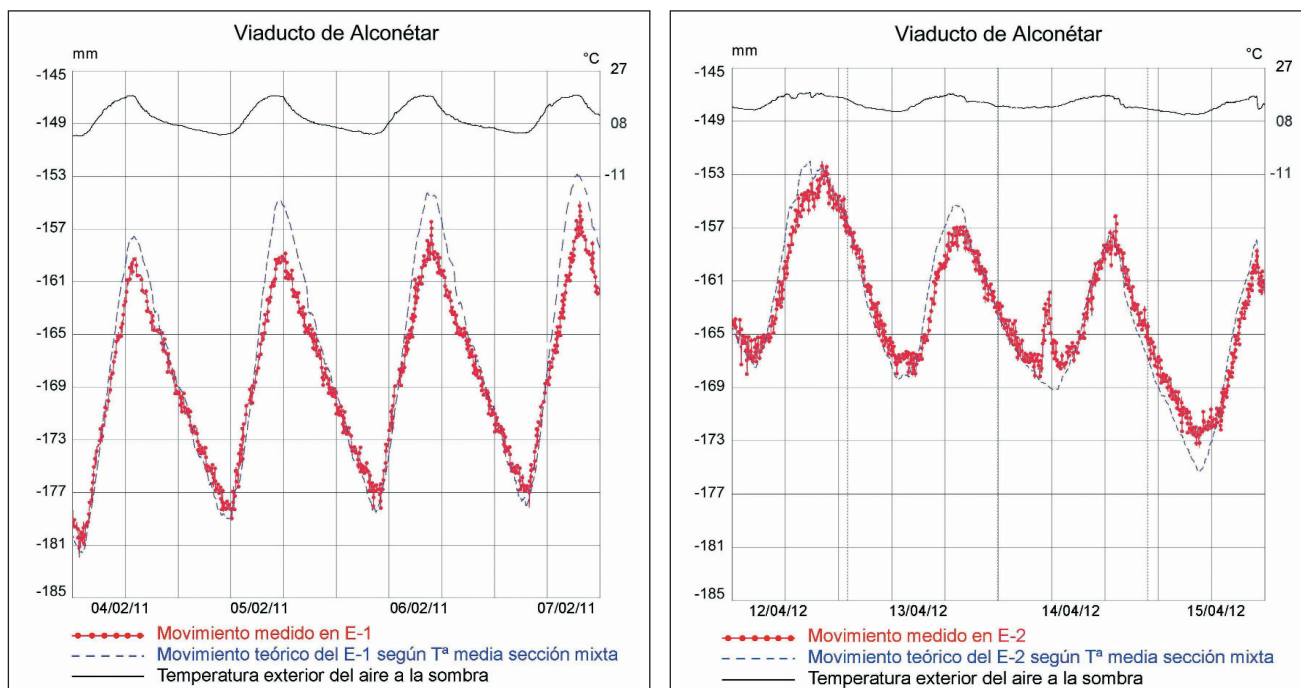
La tabla 6 resume los resultados del tablero mixto y la tabla 7 los de las dos secciones de los arcos metálicos instrumentados, comparando los resultados con las formulaciones de aplicar para esas secciones la antigua IAP-98 [2] y el Eurocódigo [3].

Tabla 6. Resultados de la instrumentación de la sección mixta del tablero del Viaducto de Alconétar

(3 años y 5 meses de medidas)	$T_{e,\max} / (T_{\max})$	$T_{e,\min} / (T_{\min})$	ΔT_N
Valores medidos	+42,0°C / (+38,4°C)	+2,5°C / (2,0°C)	39,5°C
Valores teóricos IAP-98 [2]	—	—	46,0°C
Valores teóricos Eurocódigo [3]	+53,8°C / (+49,8°C)	-7,1°C / (-11,1°C)	60,9°C

Tabla 7. Resultados de la instrumentación de las secciones metálicas de los arcos del Viaducto de Alconétar

(3 años y 5 meses de medidas)	$T_{e,\max} / (T_{\max})$	$T_{e,\min} / (T_{\min})$	ΔT_N
Valores medidos arco izquierdo de la calzada este	+50°C / (+38,4°C)	-2,4°C / (-2,4°C)	52,4°C
Valores medidos arco derecho de la calzada oeste	+53,5°C / (+37,4°C)	-2,6°C / (-2,4°C)	56,1°C
Valores teóricos IAP-98 [2]	—	—	55,0°C
Valores teóricos Eurocódigo [3]	+65,8°C / (+49,8°C)	-14,1°C / (-11,1°C)	79,9°C



Figuras 14a y 14b. Relación entre los movimientos de los extremos del tablero en ambos estribos y el movimiento teórico en función de la temperatura media equivalente obtenida del tablero, y su relación con la temperatura ambiente del aire a la sombra durante varios días del mes de febrero de 2011

Con un periodo de mediciones de temperaturas limitado a sólo 3 años y 5 meses, se aprecia de los resultados resumidos en la tabla 7 cómo la variación uniforme de temperatura medida en las secciones metálicas de los arcos (en un caso de 52,4°C y en el otro de 56,1°C), rondan ya el valor previsto por la antigua IAP-98 [2] (55°C), mientras que queda todavía bastante margen hasta el valor establecido por el Eurocódigo [3] (79,9°C) para 100 años de periodo de retorno, lo cual vuelve a demostrar, esta vez en una sección metálica, que la formulación de la IAP-98 [2] se quedaba escasa en cuanto a la valoración de las variaciones uniformes de temperatura en puentes, y que la formulación del Eurocódigo se adecúa bastante mejor a su respuesta térmica real.

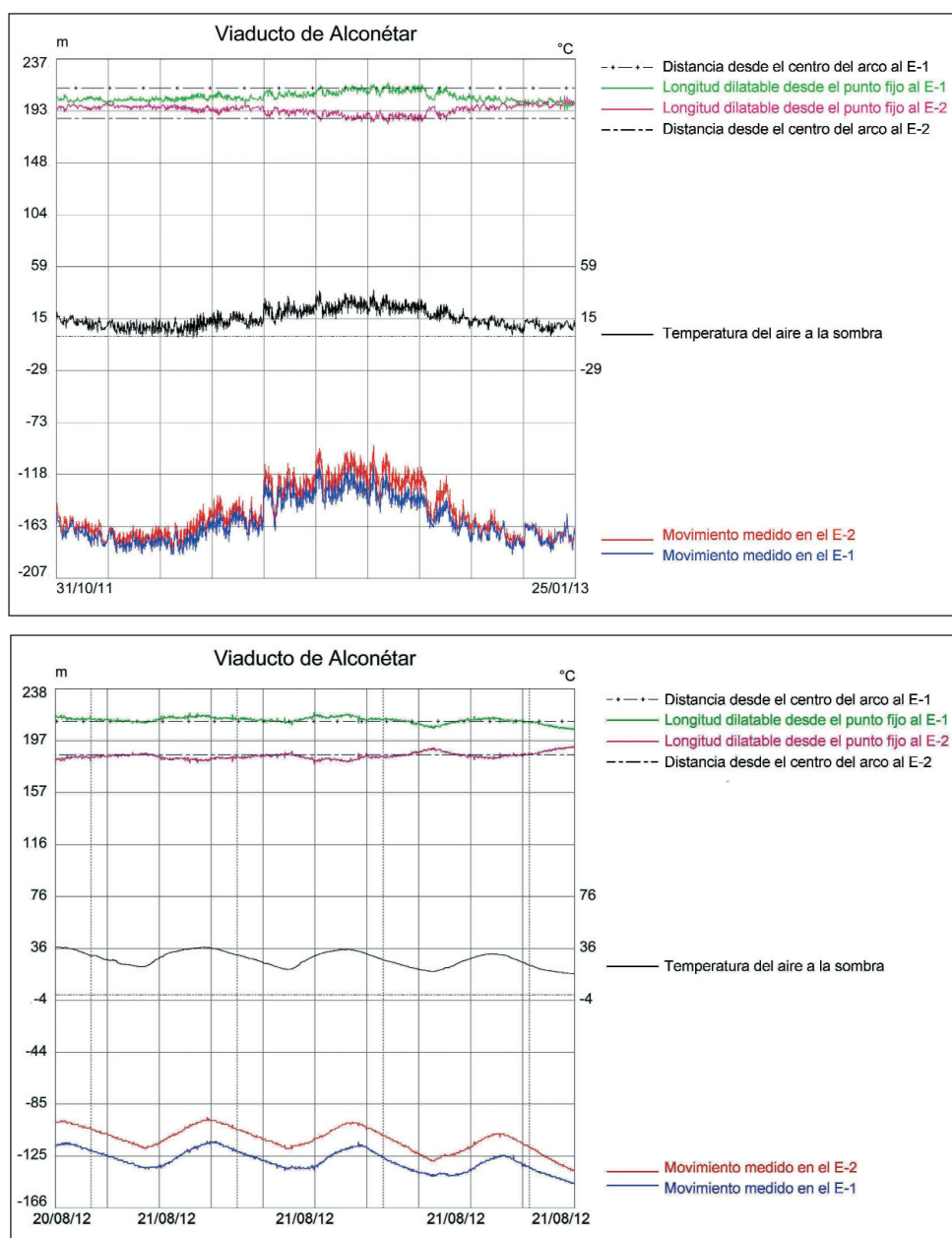
Los resultados de la sección mixta del tablero del Viaducto de Alconetar (tabla 6), son bastante similares a los obtenidos en las instrumentaciones de otras secciones mixtas analizadas (tablas 2, 3 y 4), confirmándose que la IAP-98 [2] parece infravalorar las variaciones uniformes de temperatura frente a los resultados de la formulación del Eurocódigo [3], que como en casos anteriores parece que se adecúa bastante mejor a la respuesta térmica real del tablero.

El tablero mixto del viaducto de Alconétar se apoya en aparatos de apoyo de neopreno zunchado convencionales en las pilastras del arco, mientras que en los vanos de acceso se apoya en apoyos deslizantes en dirección longitudinal. Para controlar los movimientos longitudinales del tablero, se han comparado los resultados medidos en los transductores de movimiento longitudinal dispuestos en ambos estribos, que miden la apertura y el cierre de la junta en función de las variaciones

de la temperatura, con los movimientos teóricos esperados que se obtendrían calculándolos con la temperatura media obtenida de la instrumentación del tablero. Para valorar los movimientos teóricos longitudinales del tablero por efectos térmicos, se ha estimado a priori la posición del punto fijo situado en el centro geométrico del arco, que no coincide con el centro geométrico del tablero. En realidad, el punto fijo variará ligeramente su posición con el tiempo, en función de la rigidez relativa de las pilas, pilastras, neoprenos zunchados y el rozamiento de apoyos deslizantes.

En las Figuras 14a y 14b se puede observar una correlación muy ajustada entre los movimientos teóricos medidos por los sensores situados en los extremos del tablero en los Estribos 1 y 2, con los movimientos teóricos estimados a partir de la temperatura equivalente de la sección (representados con trazo discontinuo y color azul), confirmándose la bondad en la estimación de esta última variable y, en consecuencia, en el estudio realizado en las nubes de puntos expuestas anteriormente.

Para poder confirmar que la hipótesis realizada de que el punto fijo del tablero se ubica aproximadamente en el centro del arco (a 213 m del E-1 y 187 m del E-2), frente a movimientos de dilatación y contracción, se han realizado las gráficas de la Figura 15. La Figura 15a representa, en 15 meses de medidas, la relación entre los desplazamientos reales medidos en los extremos del tablero en ambos estribos (curva inferior en color azul (E-1) y curva inferior en color rojo (E-2)), y la variación de la longitud dilatante libre medida desde ambos estribos comparada con la teórica de suponer el punto fijo en el centro del arco. Como



Figuras 15a y 15b. Relación entre los movimientos medidos y los teóricos previstos en los extremos del tablero en ambos estribos, y variación de la longitud dilatada libre medida desde ambos estribos comparada con la teórica de suponer el punto fijo en el centro del arco

era de esperar ambas oscilan en el entorno de una distancia libre dilatada de 213 m (para la del E-1), y en el de 187 m para la del E-2.

La Figura 15b muestra las mismas curvas de la Figura 15a en detalle para 4 días del mes de agosto de 2012. La temperatura del aire exterior a la sombra se representa en la parte central del gráfico.

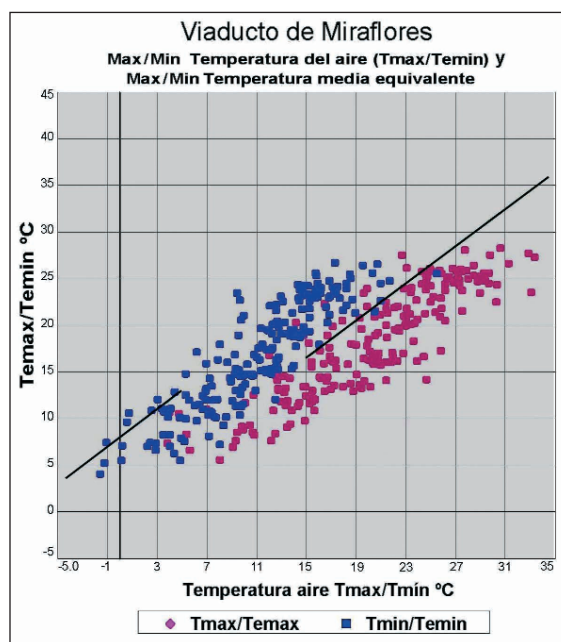
2.6. Viaducto Arroyo del Valle en Miraflores

El viaducto Arroyo del Valle (Figura 16a) de la línea de alta velocidad Madrid-Valladolid, es un cajón continuo de hormigón pretensado de alta velocidad con 1.755 m de longitud total y una distribución de luces de 52,5+25x66,0+52,5 m, con proyecto original de Siegrist y Moreno S.L. y proyecto modificado de Proes. Dada

su importante longitud y con objeto de no disponer juntas intermedias en el tablero, se materializó un punto fijo en la pila 15, pila diseñada con forma ojival para recoger los esfuerzos longitudinales del tablero, partiendo la longitud dilatada del tablero en dos tramos de 976,5 y 778,5 m, con sendas juntas y aparatos de dilatación de vía en ambos estribos.

La Figura 16b resume la nube de puntos resultado de la instrumentación de temperaturas del tablero comparándola con temperatura ambiente del aire a la sombra durante el corto periodo en el que se disponen de datos durante la ejecución del viaducto, que no llegó a un año.

En el periodo de tiempo de control de temperaturas de menos de un año, se llegó a medir una variación



Figuras 16a y 16b. Vista del Viaducto Arroyo del Valle en Miraflores, y relación diaria de $T_{\max}/T_{\min}$ y $T_{e,\max}/T_{e,\min}$ para de la sección cajón de hormigón del tablero

Tabla 8. Resultados de la instrumentación del Viaducto Arroyo del Valle

(menos de 1 año de medidas durante la ejecución)	$T_{e,\max} / (T_{\max})$	$T_{e,\min} / (T_{\min})$	ΔT_N
Valores medidos	+28,3°C / (+31°C)	+4,1°C / (-1,6°C)	24,2°C
Valores teóricos IAP-98 [2]	—	—	35,4°C
Valores teóricos Eurocódigo [3]	+45,6°C / (+43,6°C)	-9,8°C / (-17,8°C)	55,4°C

uniforme de temperatura en el tablero de algo más de 24°C, mientras que los resultados teóricos que resultarían de aplicar la IAP-98 [2] serían 35,4°C, y los resultados de aplicar el Eurocódigo [3] serían bastante superiores, 57,5°C para un periodo de retorno de 100 años. Parece evidente, como en casos anteriores, que la IAP-98 [2] también se queda escasa en la valoración de la variación uniforme de temperatura en secciones de hormigón para los 100 años de vida útil del puente (tabla 8).

El gráfico de la Figura 17 muestra la relación entre la temperatura media del tablero (en trazo discontinuo y color azul), obtenida ponderando las temperaturas obtenidas de los sensores dispuestos en el cajón de hormigón, con la temperatura del aire del interior de la sección cajón (en trazo de línea con puntos y color rojo) y la temperatura exterior del aire a la sombra (en trazo continuo y color negro).

Como era de esperar, la variación de la temperatura medida en el tablero oscila muy poco respecto de la temperatura medida del aire del interior de la sección cajón, pudiendo confirmar que la temperatura del aire del interior del cajón representa con bastante fiabilidad la temperatura media de la sección transversal. Como en casos anteriores, la temperatura de la sección de hormigón presenta una cierta inercia térmica respecto de la variación uniforme de temperatura

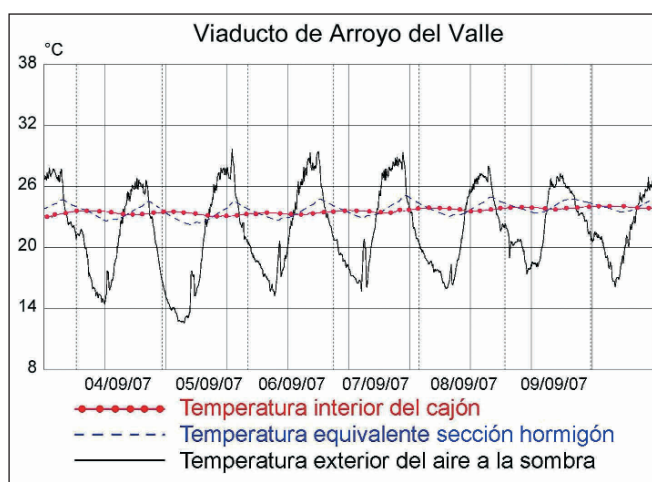
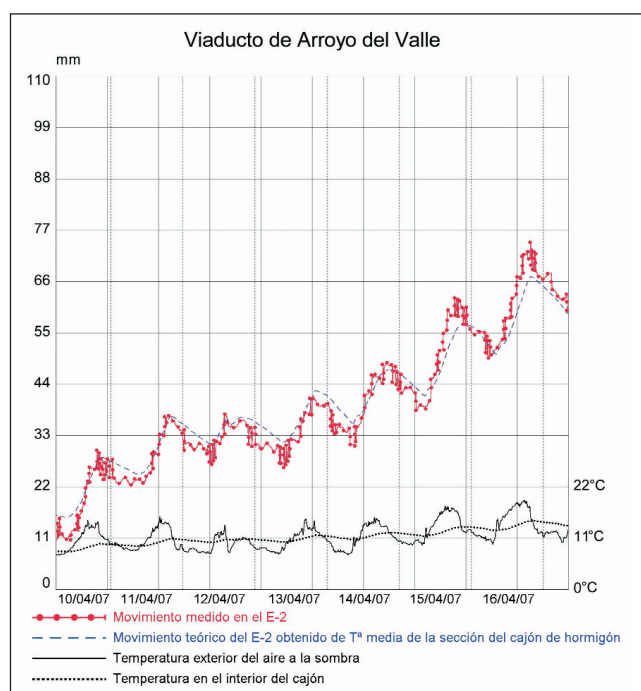
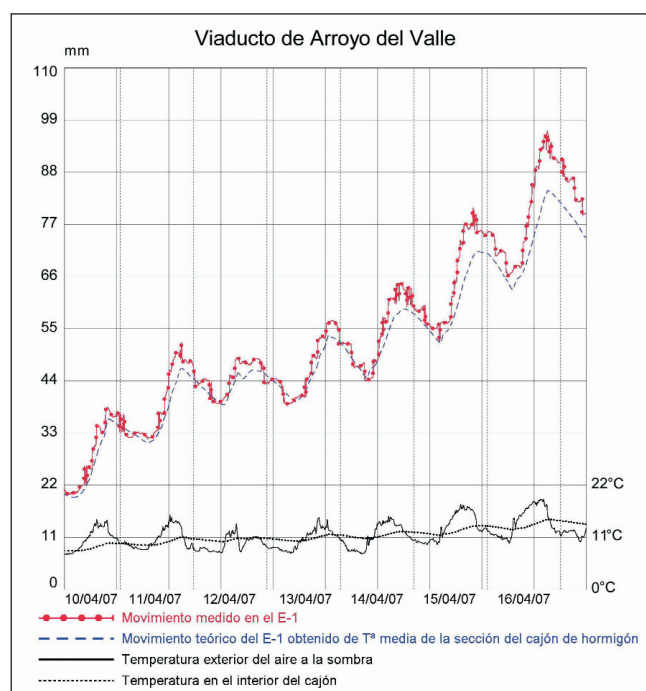


Figura 17. Relación entre la temperatura media del tablero con la temperatura del aire del interior del cajón de hormigón y la temperatura del aire a la sombra

del aire exterior a la sombra, que presenta oscilaciones diarias mayores.

En este caso, el punto fijo del tablero frente a movimientos longitudinales se ubica en la pila con forma ojival y parte la longitud del viaducto en dos tramos de 976,5 m hasta el E-1 y 778,5 m hasta el E-2. Para confirmar la adecuada respuesta térmica del tablero, se han comprobado los movimientos medidos en ambos estribos



Figuras 18a y 18b. Movimientos diarios medido y teórico en Estribo 1 y Estribo 2

mediante sendos transductores de movimiento longitudinal, comparándolos con los teóricos que resultarían del cálculo de la variación de la temperatura media de la sección del tablero. Las Figuras 18a y 18b representan, entre el 10 y el 17 de abril de 2007, en las curvas superiores dicha comparación, mientras que en las curvas inferiores se incluye la comparación de la temperatura del aire en el interior del cajón (que se aproxima mucho a la temperatura media de la sección) con la del aire exterior a la sombra.

Del análisis de estos gráficos se puede comprobar cómo en efecto la correlación entre la estimación y la medida de la apertura y cierre de la junta en estribos es muy buena, confirmando que el punto fijo a efectos de dilataciones se ubica en la pila ojival, como no podía ser de otra manera. Asimismo se aprecia un aumento progresivo de la temperatura en esos días de primavera, denotado por oscilaciones crecientes en los movimientos en los extremos del tablero.

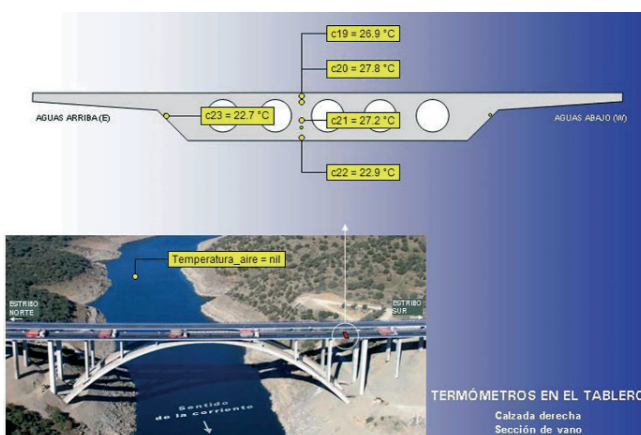
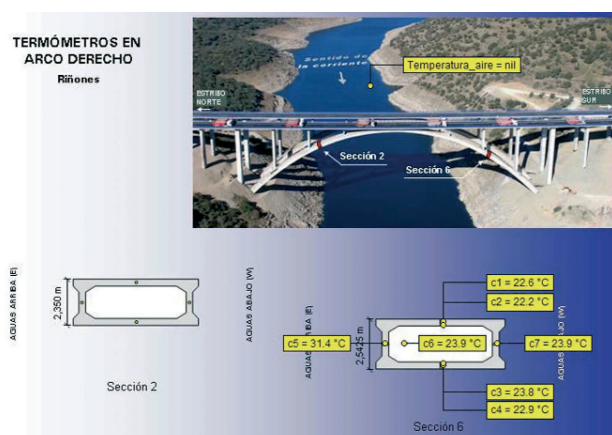
2.7. Puente sobre el río Almonte

El doble puente arco sobre el río Almonte [12], en el tramo Hinojal – Cáceres de la A-66, uno por cada calzada de la autovía de la Plata, salva el cauce del río mediante sendos arcos de hormigón de 184 m de luz y 42 m de flecha en clave. El tablero de los dos puentes paralelos se materializa mediante losas aligeradas de hormigón pretensado con vanos tipo de 22,0 m, con una longitud total de tablero de 432 m.

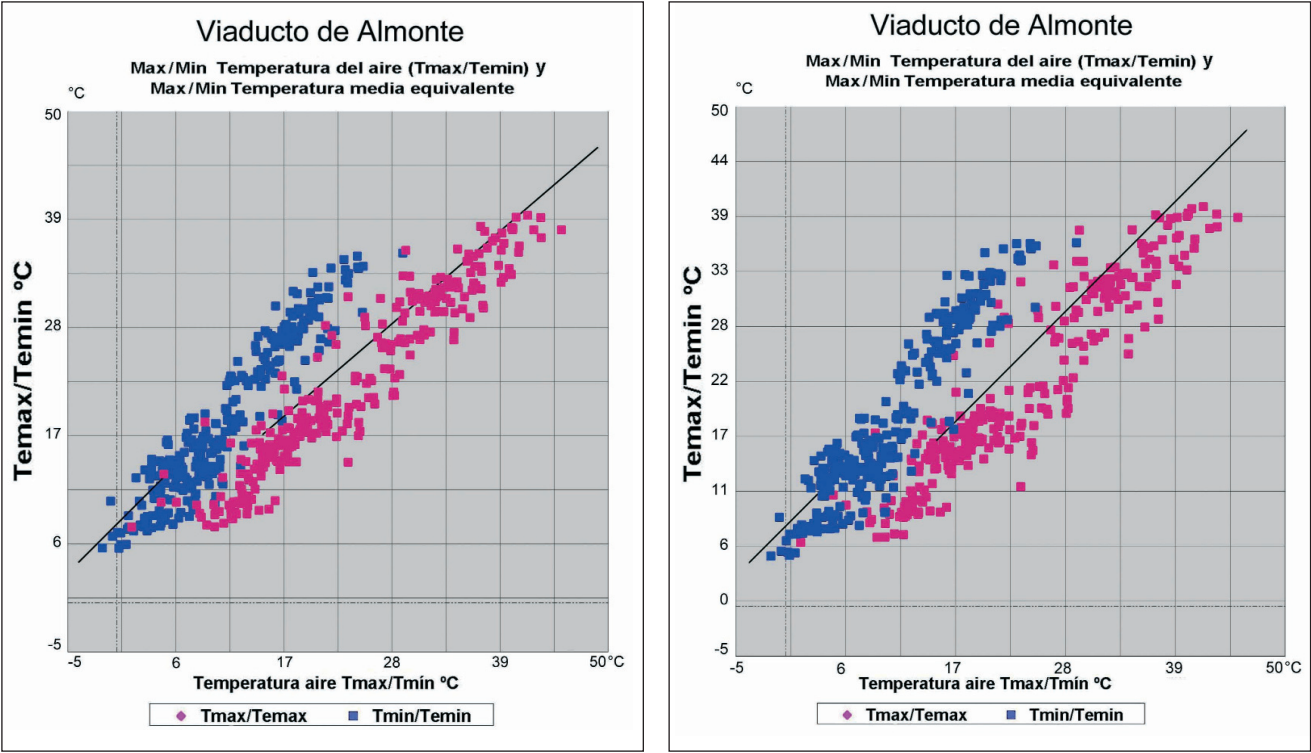
El puente es proyecto de Siegrist y Moreno S.L. y en la Asistencia Técnica a la Dirección de Obra participó IDEAM como asesor especializado en estructuras.

La sección transversal del arco es un cajón rectangular con ancho constante de 6,6 m y canto variable entre 3,0 m en arranques y 1,80 m en clave.

Las Figuras 19a y 19b muestran dos infogramas de la instrumentación de temperaturas del arco de hormigón



Figuras 19a y 19b. Infogramas con instrumentación térmica del arco de hormigón de la calzada derecha y de la sección de losa aligerada instrumentada del tablero



Figuras 20a y 20b. Relación diaria de $T_{\max}/T_{\min}$ y $T_{e,\max}/T_{e,\min}$ para la sección del arco de la calzada derecha instrumentada (fig. izq. 20a) y para la sección de la losa aligerada del tablero de hormigón de la calzada derecha (fig. der. 20b)

de la calzada derecha y de la losa aligerada de hormigón del tablero (imágenes cortesía de Kinesia Ingeniería, responsable de la instrumentación del viaducto).

Los gráficos con las nubes de puntos (Figuras 20a y 20b), comparando la temperatura máxima y mínima del tablero (en ordenadas), con la temperatura máxima y mínima del aire a la sombra (en abscisas) demuestra, como ya se comprobó en las secciones mixtas y metálicas previas analizadas, que en la zona de temperaturas máximas, los valores medidos se ajustan siempre por debajo de la estimación realizada por el Eurocódigo [3]. En la zona de temperaturas mínimas, ocurre lo mismo que ya se detectó en las secciones mixtas. Dado que en el breve periodo de medición de datos, la temperatura ambiente no llega a ser demasiado baja, sólo se midió hasta $-1,5^{\circ}\text{C}$, frente a los -11°C previstos para 100 años de vida útil, los

valores de las temperaturas mínimas del tablero se encuentran por debajo de la previsión del Eurocódigo [3]. Como ya se ha explicado en el caso de los puentes mixtos, en los puentes de hormigón parece todavía más razonable pensar que cuando la temperatura mínima ambiente baje y se acerque a la mínima absoluta prevista (-11°C en este caso), la temperatura mínima del tablero se mantendrá por encima de la recta prevista por el Eurocódigo [3], que implica que $T_{e,\min} = T_{\min} + 8^{\circ}\text{C}$.

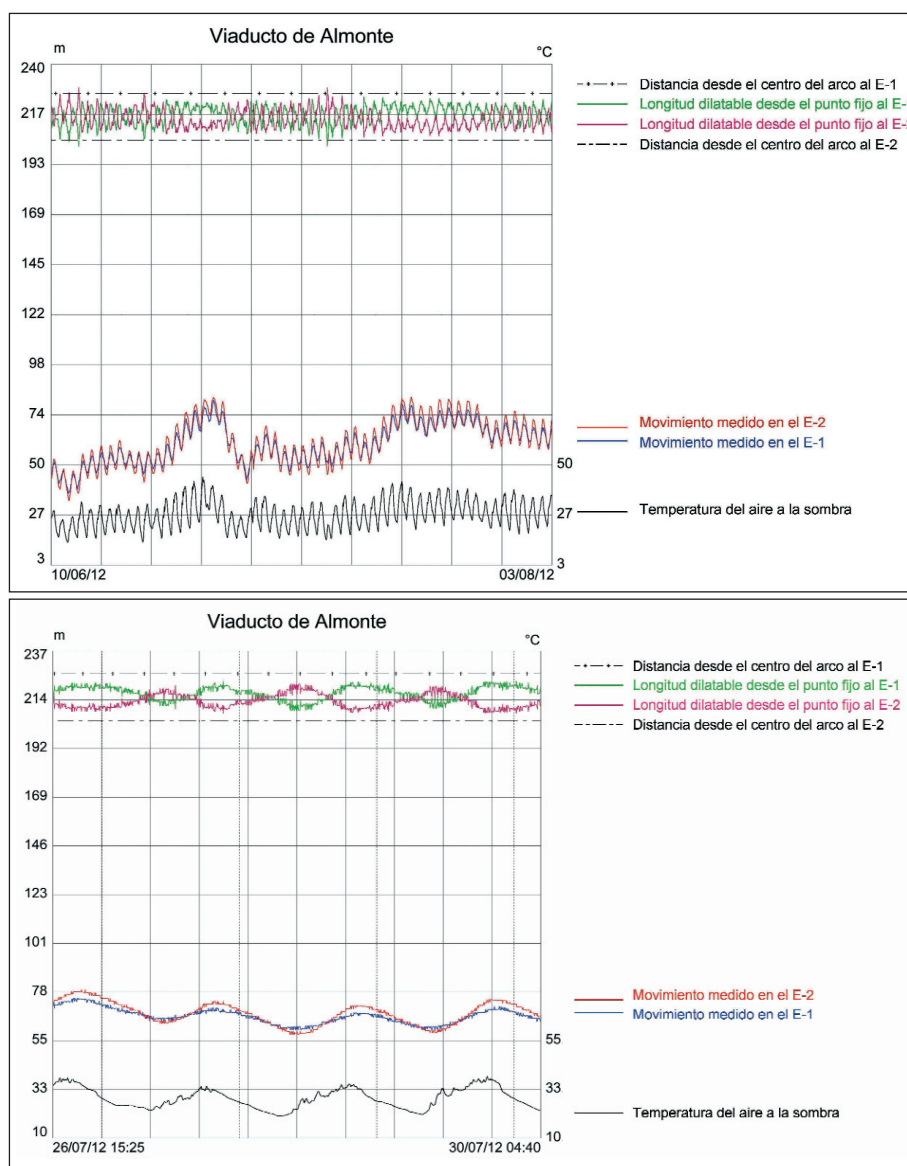
En el periodo de tiempo de control de temperaturas de apenas dos años, se llegó a medir una variación uniforme de temperatura en el arco y en el tablero de $33,8^{\circ}\text{C}$ y 35°C respectivamente, mientras que los resultados teóricos que resultarían de aplicar la IAP-98 [2] estarían demasiado cerca de los medidos en apenas dos años: 41°C para el arco y $39,5^{\circ}\text{C}$ para la losa aligerada del

Tabla 9. Resultados de la instrumentación de la sección del arco derecho. Cajón de hormigón

(2 años de medidas)	$T_{e,\max} / (T_{\max})$	$T_{e,\min} / (T_{\min})$	ΔT_N
Valores medidos	$+39,4^{\circ}\text{C} / (+41,8^{\circ}\text{C})$	$+5,6^{\circ}\text{C} / (-1,5^{\circ}\text{C})$	$33,8^{\circ}\text{C}$
Valores teóricos IAP-98 [2]	–	–	$41,0^{\circ}\text{C}$
Valores teóricos Eurocódigo [3]	$+51,8^{\circ}\text{C} / (+49,8^{\circ}\text{C})$	$-3,1^{\circ}\text{C} / (-11,1^{\circ}\text{C})$	$54,9^{\circ}\text{C}$

Tabla 10. Resultados de la instrumentación de la sección de la losa aligerada instrumentada del tablero

(2 años de medidas)	$T_{e,\max} / (T_{\max})$	$T_{e,\min} / (T_{\min})$	ΔT_N
Valores medidos	$+40^{\circ}\text{C} / (+41,8^{\circ}\text{C})$	$5,0^{\circ}\text{C} / (-1,5^{\circ}\text{C})$	$35,0^{\circ}\text{C}$
Valores teóricos IAP-98 [2]	–	–	$39,5^{\circ}\text{C}$
Valores teóricos Eurocódigo [3]	$+51,8^{\circ}\text{C} / (+49,8^{\circ}\text{C})$	$-3,1^{\circ}\text{C} / (-11,1^{\circ}\text{C})$	$54,9^{\circ}\text{C}$



Figuras 21a y 21b. Relación entre los movimientos medidos y los teóricos previstos en los extremos del tablero en ambos estribos, y variación de la longitud dilatable libre medida desde ambos estribos comparada con la teórica de suponer el punto fijo en el centro del arco

tablero. En cambio los valores teóricos que resultarían de la aplicación del Eurocódigo [3] serían bastante superiores, 54,9°C tanto para el arco como para la losa aligerada del tablero para un periodo de retorno de 100 años. Parece de nuevo confirmarse para tableros de hormigón, ya sean secciones cajón o losas aligeradas, que la IAP-98 [2] infravalora la variación uniforme de temperatura para 100 años de vida útil del puente (ver resultados en tablas 9 y 10), y que la previsión establecida en la formulación de acciones térmicas del Eurocódigo 1 parte 1-5 [3] se ajusta mejor a la respuesta térmica real también en puentes de hormigón.

El tablero se apoya sobre aparatos de neopreno zunchado en las pilas del arco, se empotra en las pilas que enmarcan el arco, y se apoya sobre aparatos de neopreno-teflón deslizantes sobre las pilas cimentadas en el terreno natural y en los estribos. La longitud dilatable libre desde ambos estribos al centro teórico del arco, en la calzada de la derecha, que es en la que se instrumentó la losa, es de 205 m desde el E-1 y 227 desde el E-2, al

tener un vano de acompañamiento más en la zona del acceso desde el E-2.

Como ya se analizó en el tablero mixto del viaducto de Alconétar, para controlar los movimientos longitudinales del tablero, se han comparado los resultados medidos en los transductores de movimiento longitudinal dispuestos en ambos estribos, con los movimientos teóricos esperados que se obtendrían calculándolos partiendo de la temperatura media obtenida de la instrumentación de la losa aligerada.

Se ha estimado a priori que la posición del punto fijo se sitúa en el centro del arco, y como ocurría en el caso anterior tampoco coincide con el centro geométrico del tablero.

Para conocer en realidad la posición teórica del punto fijo, o punto neutro frente a dilataciones/contracciones del tablero, se han realizado las gráficas de la Figura 21. La Figura 21a representa durante 2 meses de medidas la relación entre los desplazamientos



Figuras 22a y 22b. Infogramas con instrumentación térmica del tablero del viaducto y una de las secciones de una pila

reales medidos en los extremos del tablero en ambos estribos (curva intermedia de color azul (E-1) y curva intermedia de color rojo (E-2)), y la variación de la longitud dilatada libre medida desde ambos estribos comparada con la teórica de suponer el punto fijo en el centro del arco (curvas superiores). La Figura 21b muestra un detalle de la Figura 21 a para 4 días del mes de julio de 2012.

Del análisis de estas Figuras se aprecia que el punto fijo del tablero no se sitúa en el centro del arco como sería previsible (a 205 m del E-1 y 227 m del E-2), sino que se ubica bastante cercano al centro geométrico del tablero a 211 m de ambos estribos.

2.8. Viaducto de Montabliz

El Viaducto de Montabliz [13], proyecto de Apia XXI, permite el paso de la autovía Cantabria-Meseta sobre el valle del río Bisueña, en la provincia de Cantabria, mediante un gran viaducto con una altura de pila máxima de 145 m y con un vano central de 175 m de luz. El tablero se materializa mediante un cajón de hormigón pretensado de 26,10 m de ancho y canto variable, ejecutado por avance en voladizos sucesivos.

El tablero del viaducto, con un radio en planta de 700 m, tiene 721 m de longitud, y luces de 110+155+175+155+126 m.

Las Figuras 22a y 22b muestran dos infogramas de la instrumentación de temperaturas de dos secciones del tablero, y de una sección de la trepa 12 de la P-2 (imágenes cortesía de Kinesia Ingeniería, responsable de la instrumentación del viaducto).

Comparando los resultados de las temperaturas máximas y mínimas del aire a la sombra diarias ($T_{\max}$ y $T_{\min}$), con las temperaturas equivalentes de la sección

instrumentada máximas y mínimas ($T_{e,\max}$ y $T_{e,\min}$) se pueden sacar conclusiones análogas a las obtenidas en las instrumentaciones de otros viaductos de hormigón analizados (ver Figuras 23a y 23b).

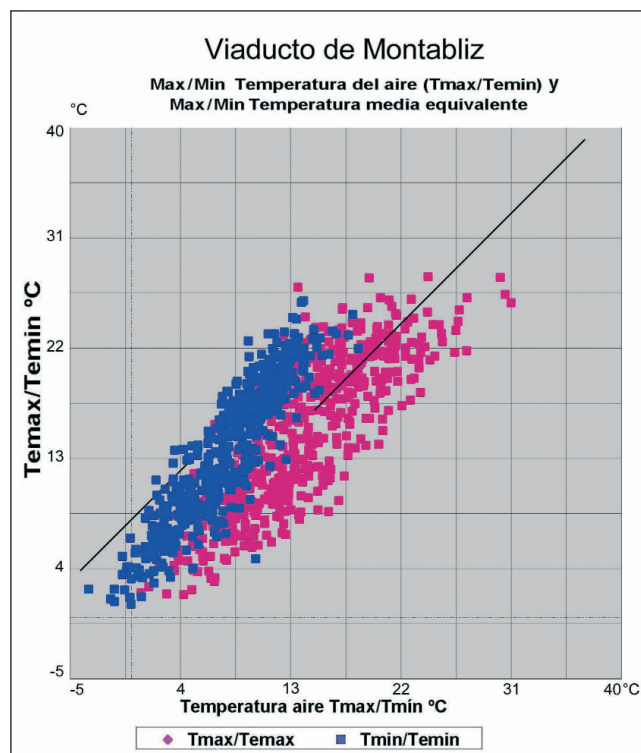
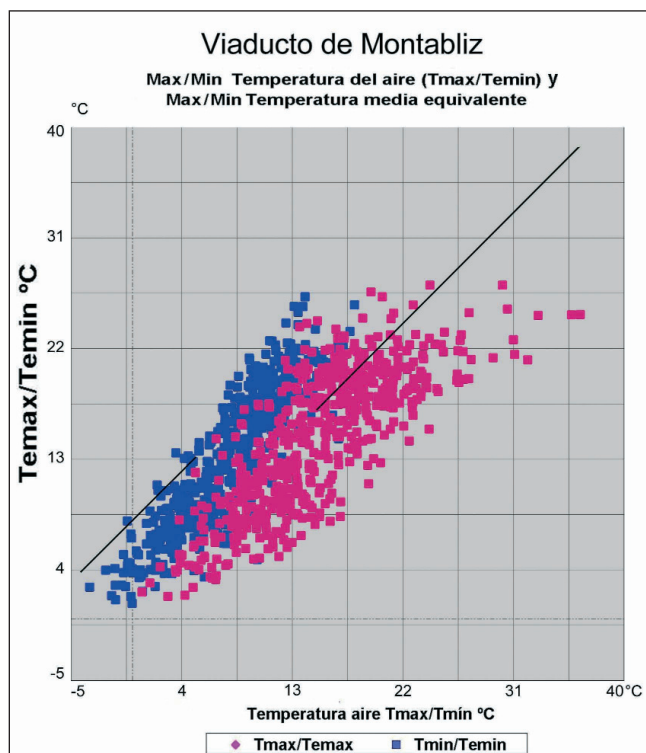
Para los máximos diarios los valores medidos extremos quedan contenidos por debajo de la previsión del Eurocódigo [3], mientras que en la zona de temperaturas mínimas, y dada la escasez de datos medidos, con sólo 3 años de datos analizados, la temperatura ambiente no ha llegado a ser demasiado baja. El mínimo absoluto medido del aire a la sombra en ese periodo no bajó por debajo de 0°C, cuando la previsión de temperatura mínima en la zona es de hasta -15°C para 100 años de periodo de retorno. En el periodo de medición de temperaturas los valores de las temperaturas mínimas del tablero se encuentran por debajo de la previsión del Eurocódigo [3], aunque como ocurría en casos anteriores, esto parece razonable debido a que no se ha aproximado el mínimo al mínimo absoluto previsto (-15°C). Previsiblemente, cuando se alcancen valores de mínimos de la temperatura ambiente tan bajos, la temperatura del tablero no llegará a esos niveles, manteniéndose dentro de los límites previstos de $T_{e,\min} = T_{\min} + 8^\circ\text{C}$ por el Eurocódigo de acciones térmicas [3].

La tabla siguiente (tabla 11) resume los resultados de la instrumentación de las dos secciones del tablero, con canto máximo junto a pila, y con canto mínimo en centro del vano central.

Como ha sido la tónica general en el resto de tableros analizados, ya sean de hormigón, mixtos o metálicos, los valores de la variación uniforme de temperatura medidos en el reducido periodo de la instrumentación, que en este caso ha sido de 3 años, se aproxima demasiado a la previsión establecida por la antigua

Tabla 11. Resultados de la instrumentación de las secciones del tablero de hormigón

(3 años y 5 meses de medidas)	$T_{e,\max} / (T_{\max})$	$T_{e,\min} / (T_{\min})$	ΔT_N
Valores medidos en la sección de canto mayor	+27,2°C / (+30,1°C)	+1,3°C / (0,0°C)	25,9°C
Valores medidos en la sección de canto menor	+27,8°C / (+30,1°C)	+1,1°C / (0,0°C)	26,7°C
Valores teóricos IAP-98 [2]	—	—	29,0°C
Valores teóricos Eurocódigo [3]	+47,6°C / (+45,6°C)	-7,0°C / (-15,0°C)	54,6°C



Figuras 23a y 23b. Relación diaria de $T_{\max}/T_{\min}$ y $T_{e,\max}/T_{e,\min}$ para la sección del tablero con canto máximo en zona cercana a pila (fig. izq. 24a) y para la sección de canto mínimo próxima al centro de vano (fig. der. 24b)

IAP-98[2]; en este caso los valores se encuentran en el entorno del 90% de la previsión de la IAP-98[2] para 100 años de vida útil, mientras que el margen frente a la previsión del Eurocódigo para 100 años es mucho mayor, con valores medidos en el entorno del 48% de la previsión del Eurocódigo [3].

3. CONCLUSIONES

Tras el análisis normativo realizado en la referencia [1], en este artículo se ha realizado un análisis de la instrumentación de temperaturas en cuatro tableros mixtos, cuatro tableros de hormigón, dos arcos metálicos dobles y un doble arco de hormigón. Los resultados de dichas instrumentaciones se han comparado con lo que resultaría de aplicar la antigua IAP-98[2] y el Eurocódigo de acciones térmicas (EN 1991-1-5) [3].

Como ya se adelantó en la referencia [1], los resultados de las variaciones uniformes de temperatura obtenidas según la antigua IAP-98 [2] son muy inferiores de los obtenidos aplicando el Eurocódigo de acciones térmicas [3], y en muchos casos quedan claramente del lado de la inseguridad, tal y como se ha podido comprobar del análisis de la instrumentación realizada tanto en puentes de hormigón con sección en cajón o losa (maciza o aligerada), como en tableros mixtos o en secciones metálicas puras.

En general, la formulación del Eurocódigo de acciones térmicas [3] para la obtención de la variación uniforme de temperatura en un tablero, se adecúa muy bien a los resultados reales obtenidos de la

instrumentación de temperaturas de los puentes analizados, y por lo tanto todos estos motivos han justificado la adopción en la nueva instrucción de acciones en puentes de carretera (IAP-11 [4]) de la formulación de las acciones térmicas para las variaciones uniformes de temperatura del Eurocódigo 1 parte 1-5 [3].

Agradecimientos

Tenemos que agradecer la gran ayuda prestada para la realización de estos análisis, a los profesionales, empresas y administraciones siguientes, por las facilidades prestadas con el suministro de los datos de los puentes y de las instrumentaciones de temperaturas de los puentes referidos en este artículo.

- Ministerio de Fomento. Dirección General de Carreteras: Dña. Pilar Crespo y D. Carlos Paradela
- ADIF: D. Alfonso González y D. Eduardo Gantes
- Kinesia Ingeniería: D. Vicente Puchol
- Ineco-Tifsa: D. Justo Carretero

REFERENCIAS

- [1] ORTEGA, M.; MILLANES, F.; MANSILLA, J.L. "Análisis normativo de la variación uniforme de la temperatura en puentes. Comparación de la normativa española con el Eurocódigo de acciones térmicas". *Hormigón y Acero*, 2013, vol. 64, nº 269, p. 47-61.

- [2] IAP-98. *Instrucción sobre las acciones a considerar en el proyecto de puentes de carretera*. Ministerio de Fomento. Secretaría de Estado de Infraestructuras y Transportes. Dirección General de Carreteras. Orden de 12 de Febrero de 1998. Madrid: BOE núm. 54, de 4 de marzo de 1998, p. 7459-7497.
- [3] EN 1991-1-5:2003. *Eurocode 1: Actions on structures. Part 1-5: General Actions-Thermal actions*. Brussels: European Committee for Standardization (CEN), 2003.
- [4] IAP-11. *Instrucción sobre las acciones a considerar en el proyecto de puentes de carretera*. Ministerio de Fomento. Secretaría de Estado de Planificación e Infraestructuras. Secretaría de Infraestructuras. Dirección General de Carreteras. 2011. Orden FOM 2842/2011 de 29 de Septiembre de 2011. Madrid: BOE núm. 254, de 21 de octubre de 2011, p. 110164-110225.
- [5] CRESPO, P. "Contraste experimental de las variaciones térmicas en puentes". *III Congreso de ACHE de Puentes y Estructuras. Volumen I de comunicaciones*. Madrid: ACHE, 2005. p. 371-385.
- [6] ORTEGA, M.; MILLANES, F.; MANSILLA, J.L. "Análisis de la instrumentación de temperaturas del viaducto mixto de alta velocidad "Arroyo las Piedras". *Hormigón y Acero*, 2010, vol. 61, n° 258, p. 81-97.
- [7] MILLANES, F.; PASCUAL, J.; ORTEGA, M. "Viaducto Arroyo las Piedras. Primer viaducto mixto de las Líneas de Alta Velocidad Españolas". *Hormigón y Acero*, 2007, n° 243, p. 5-38.
- [8] MILLANES, F.; PASCUAL, J.; ORTEGA, M. "Arroyo las Piedras Viaduct: The first composite steel-concrete high speed railway bridge in Spain". *Structural Engineering International*, 2007, vol. 17, n° 4, p. 292-297.
- [9] ORTEGA, M.; MILLANES, F.; MANSILLA, J.L. "Thermal actions on composite concrete-steel bridges. Comparison between Eurocode and the results obtained on monitored bridges". *Codes in structural engineering: Development and needs for international practice: Joint IABSE-Fib Conference*, Dubrovnic, Croacia, May 3-5, 2010, editors, Manfred A. Hirt, Jure Radic, Ana Mandic. Zagreb: SECON-CSSE, 2010, vol. 1, p. 465-472.
- [10] MILLANES, F.; BORDÓ, E.; MARTÍN, J.; MANSILLA, J.L. "Viaducto de Archidona (LAV Antequera-Granada), 3.150 m de dintel mixto sin juntas de dilatación". *Hormigón y Acero*, 2013, vol. 64, n° 270, p. 5-30.
- [11] LLOMBART, J.A.; REVOLTÓS, J.; COUTO, S. "Puente sobre el río Tajo, en el embalse de Alcántara («Arcos de Alconétar»)". *Hormigón y Acero*, 2006, n° 242, p. 5-38.
- [12] SIEGRIST, G. "Arco de Almonte. Autovía de la Plata. Tramo: Hinojal-Cáceres". *Hormigón y Acero*, 2006, n° 240, p. 5-29.
- [13] VILLEGAS, R.; PANTALEÓN, M.J.; REVILLA, R.; OLAZÁBAL, P. "Viaducto de Montabliz". *Hormigón y Acero*, 2008, vol. 59, n° 248, p. 9-40.