

## AUSCULTACIÓN DE EFECTOS TÉRMICOS EN VIADUCTOS MIXTOS

### Miguel ORTEGA CORNEJO

Ingeniero de Caminos

IDEAM S.A.

Jefe de Proyectos

[miguel.ortega@ideam.es](mailto:miguel.ortega@ideam.es)

### Francisco MILLANES MATO

Dr. Ingeniero de Caminos

IDEAM S.A.

Presidente

[general@ideam.es](mailto:general@ideam.es)

### Juan Luis MANSILLA DOMÍNGUEZ

Ingeniero de Caminos

IDEAM S.A.

Ingeniero Proyectista

[juanluis.mansilla@ideam.es](mailto:juanluis.mansilla@ideam.es)

## RESUMEN

La instrumentación de temperaturas y movimientos empleada en el viaducto mixto de Alta Velocidad Arroyo las Piedras, ha permitido un seguimiento continuo de los efectos térmicos durante aproximadamente dos años (2008-2009), con medidas muy precisas con intervalos aproximados de 10 minutos, lo que permite suministrar una información muy fiable tanto de las variaciones diarias como estacionales de las acciones térmicas sobre el tablero. Estas medidas se han correlacionado con los registros continuos de la temperatura ambiente del aire a la sombra. El artículo describe en detalle el comportamiento térmico del tablero mixto del viaducto, análisis que ha permitido sacar importantes conclusiones, al comparar los resultados con la normativa española y el Eurocódigo, lo cual ha motivado cambios en la reciente revisión de las acciones térmicas en puentes en la normativa española.

**PALABRAS CLAVE:** Instrumentación de puentes, temperaturas, movimientos, viaducto mixto, Eurocódigos, IAP, gradiente térmico.

### 1. Introducción.

Con objeto de la revisión de la “Instrucción sobre las acciones a considerar en puentes de carretera” IAP-98 [1], los autores de la ponencia han realizado, en el marco del contrato de asesoría que IDEAM S.A. tiene en UTE junto a Fhecor ingenieros consultores y Torroja Ingeniería con el Ministerio de Fomento, bajo la dirección de Pilar Crespo, Jefa de Área de Estructuras, un análisis normativo de la respuesta térmica de tableros mixtos, y se han comparado los resultados establecidos por las normativas con los resultados de la instrumentación en puentes mixtos.

En los sucesivos apartados se repasan los antecedentes de la actual normativa de acciones térmicas y se comparan, para puentes mixtos, los resultados de la aplicación de la normativa española vigente con el Eurocódigo [2], para posteriormente contrastar la respuesta térmica real de puentes mixtos instrumentados.

Como se verá en el desarrollo de la ponencia, la propuesta del Eurocódigo [2], matizando los valores propuestos, es la que realmente mejor se adecúa al comportamiento térmico de los tableros mixtos en puentes.

## 2. Acciones térmicas en puentes mixtos según la IAP-72 y la IAP-98

La IAP-98 [1] mantiene la formulación de acciones térmicas en puentes mixtos de la IAP-72 [3], donde se establecía para el estudio de los efectos térmicos en elementos mixtos, las variaciones térmicas siguientes, referidas a una temperatura de montaje media de 15 °C.

Tabla 1 Variación uniforme de la temperatura en los diferentes materiales de un elemento mixto según IAP-98 [1] y IAP-72 [3].

	Hormigón	Acero
Calentamiento	$20 - 0,75 \cdot \sqrt{e}$	+35° C
Enfriamiento	$-20 + 0,75 \cdot \sqrt{e}$	-35° C

Esta formulación de temperaturas en secciones mixtas de la IAP-98 [1], presenta una discontinuidad clara con la formulación de las variaciones térmicas en secciones de hormigón y de acero, y lleva a incongruencias como que en un tablero mixto, la variación uniforme de temperatura pueda ser mayor que en la de un tablero metálico, cuestión que no tiene sentido lógico.

En la ponencia “Contraste normativo y experimental de los efectos térmicos en puentes de hormigón, metálicos y mixtos” [4] se incidirá en las diferencias entre la normativa española y el Eurocódigo EN 1991-1-5 [2] en puentes de hormigón y puentes metálicos.

## 3. Acciones térmicas en puentes según el Eurocódigo 1 parte 1-5 (EN-1991-1-5).

El Eurocódigo EN 1991-1-5 [2] define la acción térmica en puentes mixtos (tipo 2) de una manera análoga a la de los puentes de acero (tipo 1) o de hormigón (tipo 3), como dos componentes, la componente Uniforme de Temperatura y las componentes de la Diferencia de Temperatura.

### 3.1. Componente Uniforme de Temperatura

La componente uniforme de temperatura depende de la temperatura mínima y máxima que el puente alcance. Los valores de las componentes uniformes mínima  $T_{e,\min}$  y máxima  $T_{e,\max}$  de temperatura del puente se obtienen del gráfico de la Figura 6.1 de EN 1991-1-5 [2] entrando con los valores de las temperaturas mínima  $T_{\min}$  y máxima  $T_{\max}$  del aire a la sombra en el lugar del emplazamiento del puente. Para un puente mixto equivalen a:

$$T_{e,\min} = T_{\min} + 4,50 \text{ °C} \quad (1)$$

$$T_{e,\max} = T_{\max} + 4,50 \text{ °C} \quad (2)$$

### 3.2. Rango de la componente uniforme de temperatura del puente

El Eurocódigo 1-1-5 [2] indica que la temperatura inicial del puente  $T_0$ , en el momento en que la estructura está coaccionada, puede tomarse igual a 10°C. Este valor puede ser adecuado para centroeuropa pero para España parece más adecuado tomar un valor de 15°C, como ya proponía la IAP-98 [1] y la IAP-72 [3].

El valor característico de la máxima variación de contracción de la componente uniforme de la temperatura del puente,  $\Delta T_{N,\text{con}}$ , debería tomarse como:

$$\Delta T_{N,\text{con}} = T_0 - T_{e,\min} \quad (3)$$

y el valor característico de la máxima variación de dilatación de la componente uniforme de la temperatura del puente,  $\Delta T_{N,exp}$ , debería tomarse como:

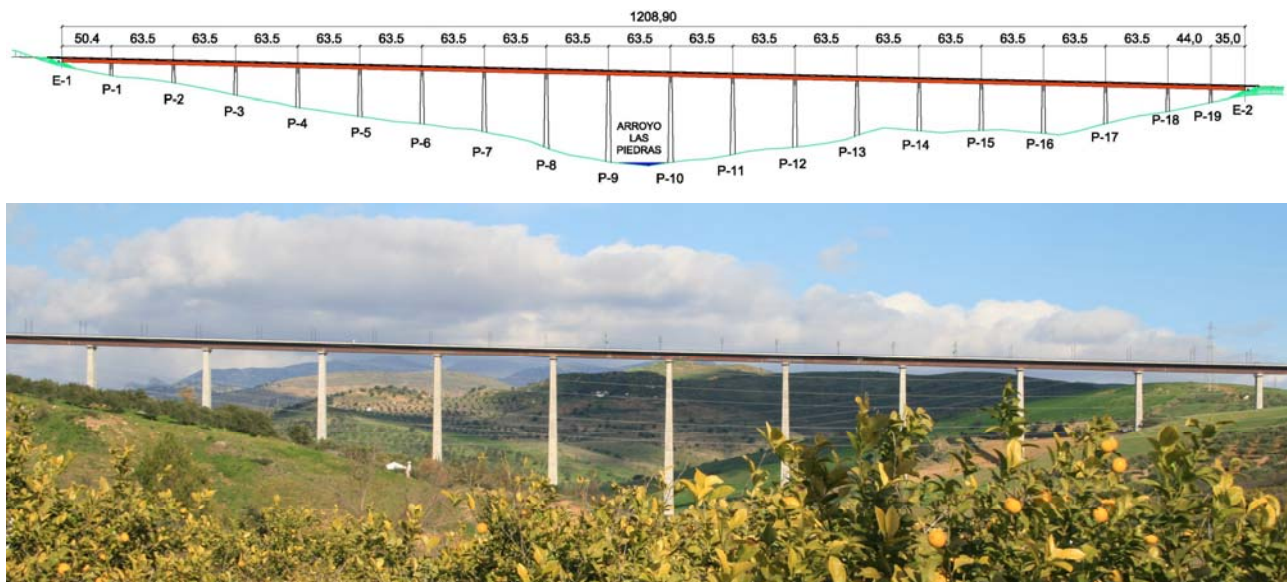
$$\Delta T_{N,exp} = T_{e,max} - T_0 \quad (4)$$

La variación total de la componente uniforme de la temperatura del puente es

$$\Delta T_N = T_{e,max} - T_{e,min} \quad (5)$$

#### 4. Resultados de la instrumentación de temperaturas del Viaducto mixto de Alta Velocidad “Arroyo las Piedras”.

La instrumentación empleada en el viaducto del Arroyo las Piedras [5] (Figs. 1a & 1b), primer viaducto mixto de Alta Velocidad de España, ha permitido un seguimiento continuo de los efectos térmicos durante aproximadamente dos años, desde Noviembre de 2007 hasta casi finales de 2009, con medidas muy precisas con intervalos aproximados de 10 minutos, lo que permite suministrar una información muy fiable tanto de las variaciones diarias como estacionales de las acciones térmicas sobre el tablero.



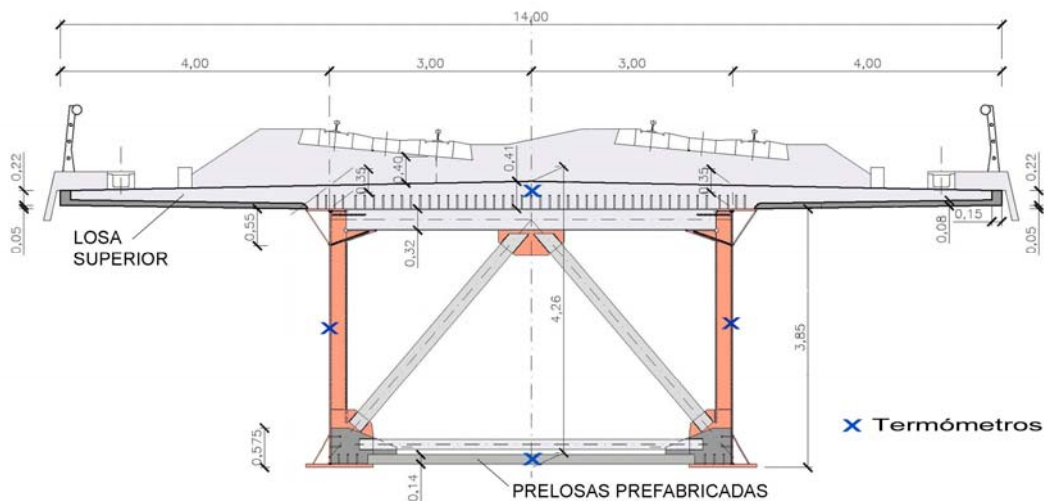
**Figuras 1a y 1b. Alzado y vista del Viaducto mixto de alta Velocidad “Arroyo las Piedras”.**

Se dispone de la información suministrada por 4 sensores térmicos instalados en la sección del centro del vano 6, en el interior de la losa superior de hormigón, en el interior de las prelasas de cierre inferior del fondo del cajón y en los centros de las dos almas metálicas (Fig.2).

A su vez, estas medidas de los 4 sensores térmicos pueden correlacionarse con los registros continuos de la temperatura ambiente (en sombra) suministrados por la estación meteorológica situada en el tablero del viaducto en las proximidades de la pila 15.

La información analizada permite avanzar datos concluyentes sobre los efectos térmicos en viaductos mixtos [6 y 7].

Durante el período registrado, la temperatura ambiente a la sombra ha oscilado entre un mínimo de +4°C y un máximo de +37°C, constatándose una holgura muy razonable dentro del rango establecido por la normativa española para la zona de ubicación del Viaducto, a unos 200 m de altitud, para la que establece una variación entre  $-8^{\circ}\text{C} \leq T_{\text{ambiente}} \leq 46^{\circ}\text{C}$ .



**Figura 2. Posición de sensores de temperatura en la sección del centro del vano 6.**

Se puede verificar que la temperatura en el interior de la losa superior de hormigón es muy estable, con variaciones diarias mínimas inferiores a  $1^{\circ}\text{C}$  ó  $2^{\circ}\text{C}$  (Figs. 3-6), muy amortiguadas, por tanto, respecto de las variaciones térmicas de la temperatura ambiente, debido al importante efecto aislante proporcionado por la impermeabilización superior del tablero y por el espesor del balasto, nunca inferior a los 40 cm. Los efectos térmicos en la losa superior de tableros de ferrocarril con balasto son, por tanto, sensiblemente más reducidos que en puentes de carretera. La inercia térmica de dichas losas superiores se manifiesta en su lento y suave comportamiento estacional, con temperaturas siempre ubicadas en el interior del rango diario de oscilaciones de la temperatura ambiente. Se han medido temperaturas entre  $11^{\circ}\text{C}$  y  $14^{\circ}\text{C}$  en invierno,  $13^{\circ}\text{C}$  y  $24^{\circ}\text{C}$  en primavera, y  $24^{\circ}\text{C}$  y  $33^{\circ}\text{C}$  en verano.

Las temperaturas registradas en las prelosas inferiores de hormigón, de 14 cm de espesor, siguen las pautas bien conocidas de los elementos de hormigón, donde la gran inercia térmica de este material y su posición en zonas de sombra dan lugar a unos variaciones térmicas diarias suaves y decaladas en el eje de las horas respecto de la temperatura ambiente, a cuyos valores extremos tienden a aproximarse (Figs. 3-6):

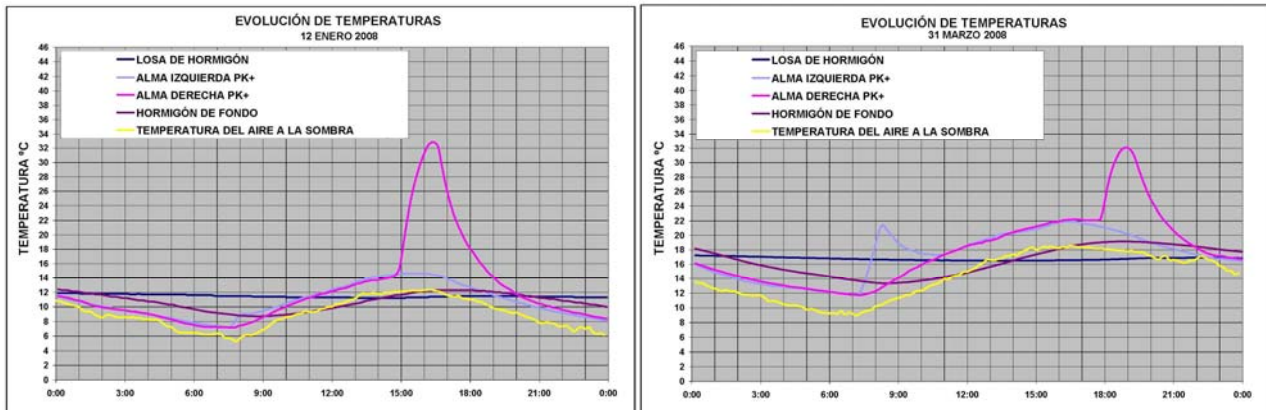
- las curvas de temperatura en el hormigón acompañan sensiblemente a las de temperatura ambiente, aunque decaladas entre 2 y 4 horas;
- los valores mínimos, aproximadamente a las 9 de la mañana, se sitúan en el entorno de los  $3^{\circ}\text{C}/4^{\circ}\text{C}$  por encima de los mínimos de temperatura ambiente, tanto en invierno como en verano;
- los valores máximos alcanzan a lo sumo medidas superiores en  $1^{\circ}\text{C}/2^{\circ}\text{C}$  a los de la temperatura ambiente en verano y ligeramente iguales o inferiores a la citada temperatura en invierno, corroborando así el efecto de la inercia térmica del hormigón respecto de las oscilaciones de la temperatura ambiental.

La evolución de las temperaturas en las almas metálicas está más influida, dada su pequeña inercia térmica, por las condiciones estacionales y, principalmente, de soleamiento:

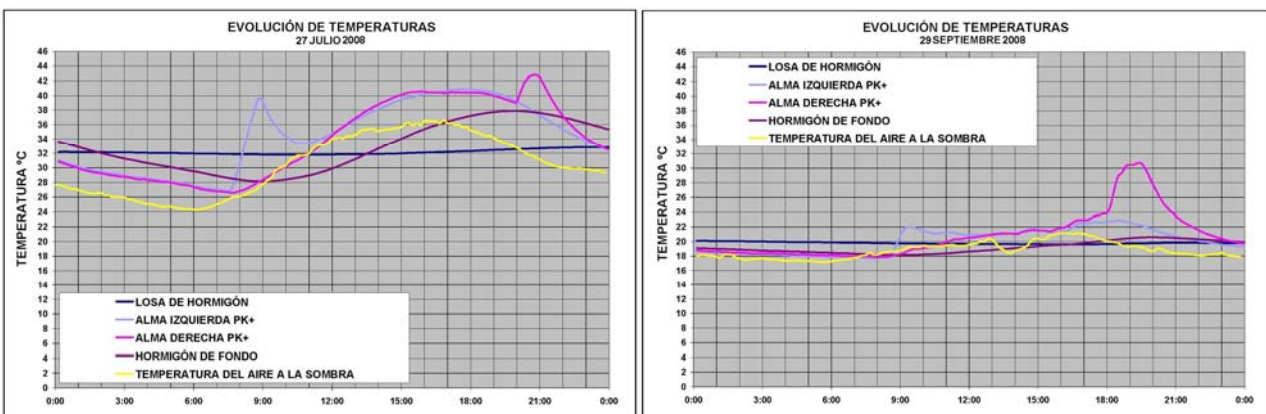
- durante la noche las temperaturas de las almas son prácticamente análogas y muy poco alejadas de la temperatura ambiente (Figs. 3-6), a la que acompañan fielmente en su

evolución, con pequeñas diferencias sólo en los valores mínimos, que en las almas metálicas suelen oscilar entre valores superiores en 0°C/ 2°C (invierno); 1°C/ 3°C (primavera); 2°C/ 4°C (verano) a los mínimos de la temperatura ambiente;

- las almas en sombra, durante el día, acompañan también muy fielmente a la temperatura ambiente (Figs. 3-6), con valores máximos en el entorno de los 2°C/ 4°C superiores a los máximos de la citada temperatura ambiente;



**Figuras 3 y 4. Temperatura ambiente y temperatura en los 4 sensores en un día típico de enero (invierno) y de marzo (primavera).**



**Figuras 5 y 6. Temperatura ambiente y temperatura en los 4 sensores en un día típico de julio (verano) y de septiembre (otoño).**

- la acción de la radiación por soleamiento directo incide, en cambio, muy sensiblemente en la temperatura de las almas metálicas, detectándose claramente unos bruscos e intensos “picos” de temperatura en el metal sometido a dicha radiación directa:
  - al atardecer en el alma del lado oeste con un “pico” máximo relativo entre ambas almas de hasta 16°C/ 18°C en invierno (Fig. 3) (ya que coincide con el máximo de temperatura ambiente, hacia las 15 h), de entre 8°C/ 10°C en primavera (Figs. 4) (menor que en invierno ya que coincide con una tendencia de bajada global de la temperatura ambiente) y todavía menor, entre 4°C/ 6°C en verano (Fig. 5) (pues el soleamiento se produce a una hora muy tardía con temperaturas ambiente descendentes, alrededor de las 21h).
  - al amanecer, en el alma del lado este, alcanzando hasta 10°C/ 12°C de temperatura diferencial en verano (Fig. 5) (hacia las 8 h), de 8°C/10°C en primavera (Fig. 4) y sólo

de 1°C/ 2°C en invierno (Fig. 3), dada la brevedad y pequeña magnitud de la radiación solar.

Como consecuencia del soleamiento, las almas afectadas han registrado temperaturas máximas de hasta 38°C en invierno, 36°C en primavera y 44°C en verano (alma del lado oeste al atardecer en todos los casos) (Figs. 3-5). El gradiente transversal máximo se produce, sorprendentemente, en invierno a primeras horas de la tarde (Fig. 3). En cualquier caso, la gran rigidez relativa de las losas de hormigón del tablero respecto a la flexibilidad de las almas metálicas, anula los efectos transversales del citado gradiente, que prácticamente no induce curvaturas o deformaciones transversales en el tablero. Las almas soleadas, muy coaccionadas por las citadas losas de hormigón, sufren una compresión inducida de aproximadamente 20/25 N/mm<sup>2</sup> sin prácticamente ninguna repercusión resistente.

El tablero del viaducto mixto tiende a comportarse como un tablero de un único material en el que se han compatibilizado las deformaciones térmicas de diferentes elementos. En el caso que nos ocupa, el juego de rigideces relativas de losas y metal da un valor de la “temperatura media equivalente” de aproximadamente:

$$T_{\text{med.eq.}} \approx 0,56T_{\text{losa sup}} + 0,14 T_{\text{losa inf}} + 0,30 T_{\text{acero medio}}$$

Lo que indica que un viaducto mixto tiende a comportarse con oscilaciones térmicas equivalentes del orden del 70% de las de un viaducto de hormigón y del 30% de un viaducto metálico, lo que confirma esta característica muy favorable de los viaductos mixtos respecto de las deformaciones impuestas.

Los valores registrados a lo largo del período de seguimiento para “la temperatura media equivalente” han sido:

- máximo 35°C ≈ máxima temperatura ambiente 37°C (el 13-08-08)
- mínimo 7°C ≈ 4°C por encima del mínimo de temperatura ambiente (el 16-12-08)

En las figuras 7 y 8 se representan las figuras que correlacionan la temperatura media equivalente de la sección transversal mixta con la temperatura ambiente del aire a la sombra.

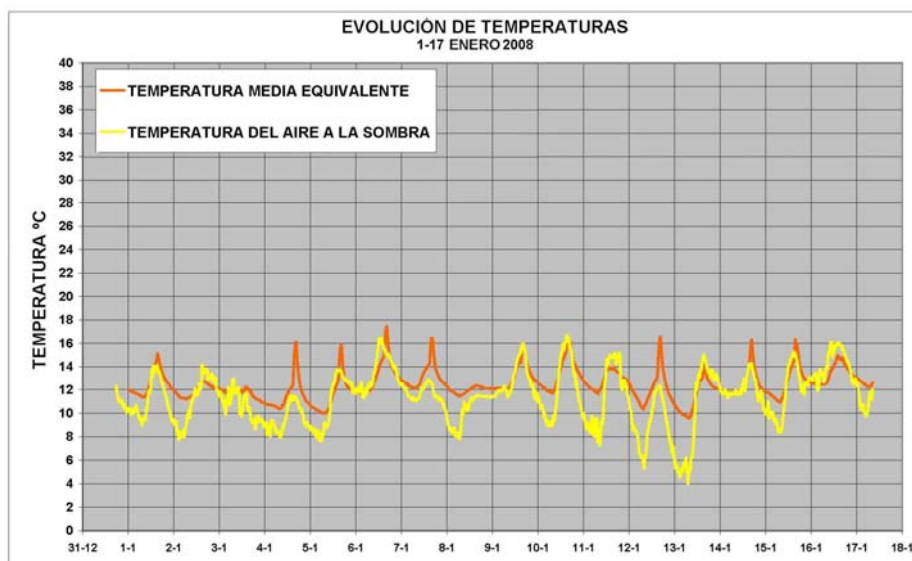


Figura 7. Relación entre temperaturas medias de la sección mixta y temperatura ambiente del aire a la sombra en enero (invierno).

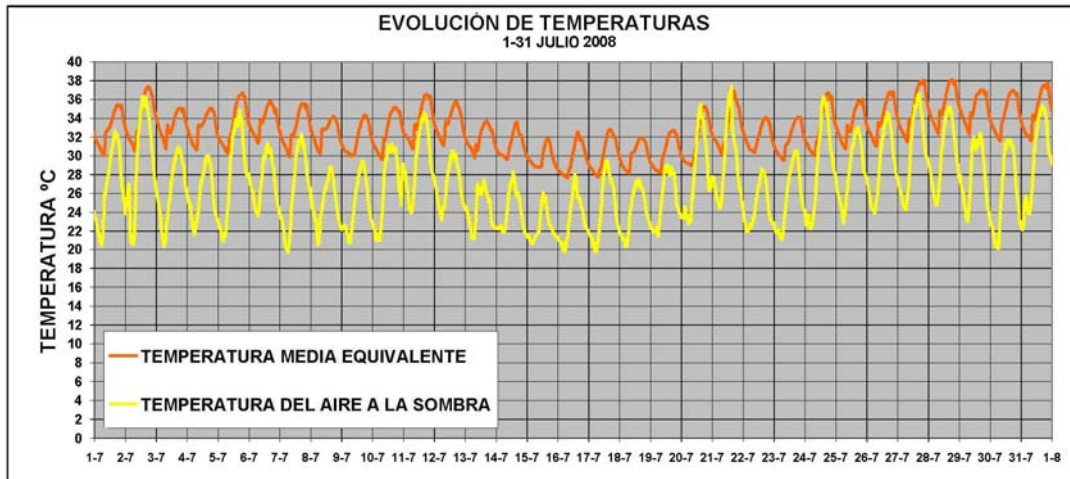


Figura 8. Relación entre temperaturas medias de la sección mixta y temperatura ambiente del aire a la sobre en julio (verano).

## 5. Contraste de los resultados de la instrumentación con el Eurocódigo EN-1991-1-5.

### 5.1. Componente Uniforme de Temperatura del puente.

Los valores de la temperatura media equivalente de la sección mixta, obtenida de los resultados de la instrumentación del tablero, parecen mucho más concordantes con los criterios de dimensionamiento establecidos por el Eurocódigo EN-1991-1-5 [1], que establecen unas temperaturas equivalentes máxima y mínima de diseño de tableros mixtos  $4,50^{\circ}\text{C}$  superiores a la temperatura ambiente (eq.1 y 2), lo que en nuestro caso llevaría a:

$$T_{e,\max} = 50^{\circ}\text{C}; T_{e,\min} = -3^{\circ}\text{C} \text{ y } \Delta T_N = 53^{\circ}\text{C}.$$

La figura 9 representa las rectas de ajuste de la temperatura máxima y mínima de una sección mixta según el Eurocódigo, y los resultados de la experimentación obtenida en el Viaducto mixto Arroyo las Piedras. Se puede apreciar cómo el ajuste de los resultados de la experimentación es muy adecuado.

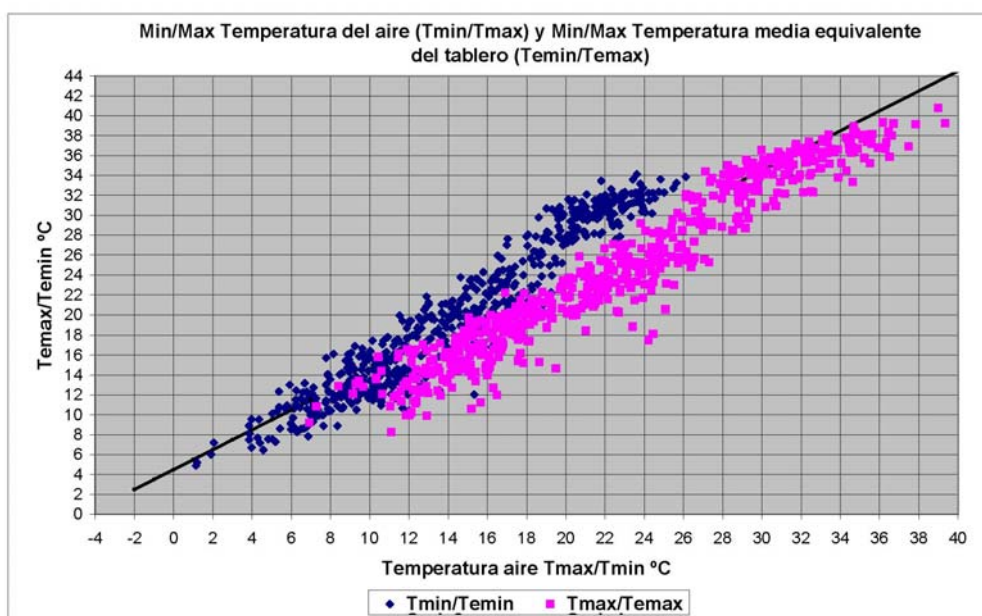


Figura 9. Relación entre  $T_{\max}/T_{\min}$  del aire a la sombra y  $T_{e,\max}/T_{e,\min}$  obtenidas de la instrumentación. Comparación con la formulación de EN-1991-1-5 [1].

Se confirma asimismo, tal y como establece el Eurocódigo, el orden de magnitud de la carrera total de la temperatura equivalente de un tablero mixto es similar al de la carrera de la temperatura ambiente, no superior en más de 5°C/7°C a la de un tablero de hormigón y muy inferior a la que se tendría en un viaducto completamente metálico.

En este caso, según la IAP-98 [1], el valor de  $\Delta T_N$  resultaría del orden de unos 44 °C, por debajo del resultado del Eurocódigo ( $\Delta T_N = 53^\circ\text{C}$ ).

## 5.2. Componente de la diferencia de temperatura vertical.

A este respecto, se ha podido observar de las mediciones de temperaturas registradas, cómo en general, durante el día, el acero está siempre más caliente que el hormigón, llegando a su máxima diferencia con la máxima temperatura del acero, mientras que en general, durante la noche, el acero siempre está más frío que el hormigón. Este hecho es además independiente de la época del año, ya sea invierno o verano, lo cual lleva a una conclusión importante.

Durante todos los días se produce un gradiente negativo (durante el día) con el acero más caliente que el hormigón, mientras que durante la noche siempre se produce un gradiente positivo, con el acero más frío que el hormigón (Fig. 10).

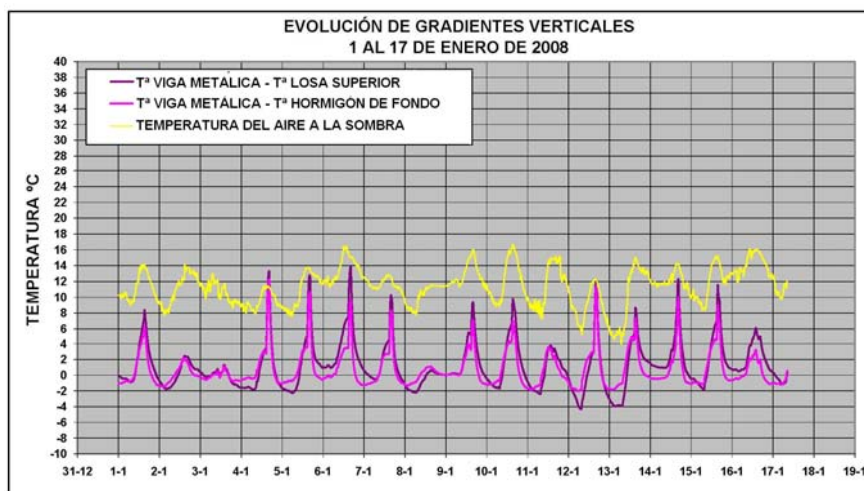


Figura 10. Diferencia de la temperatura media en el acero y la temperatura de la losa y del hormigón de fondo respectivamente en invierno.

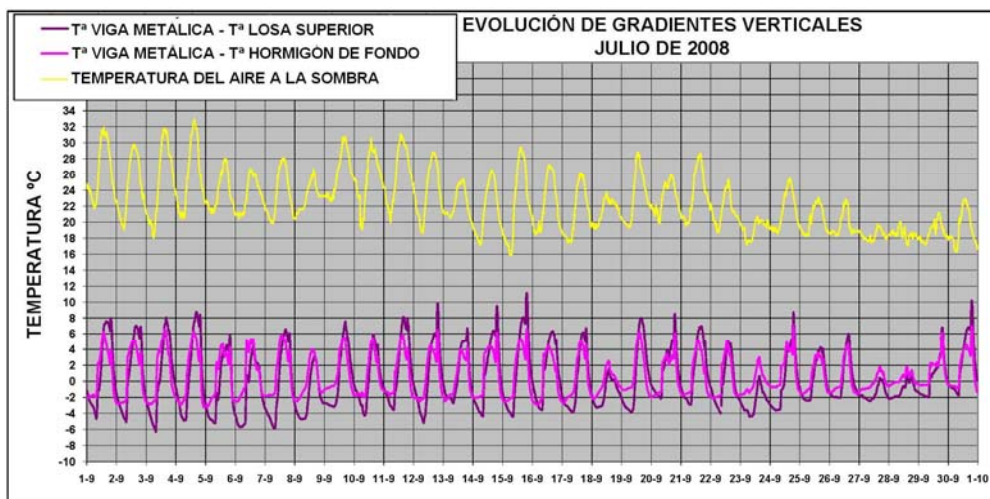


Figura 11. Diferencia de la temperatura media en el acero y la temperatura de la losa y del hormigón de fondo respectivamente en verano.



En la realidad, cada día, se produce la doble curvatura, gradiente negativo durante el día y positivo durante la noche (ya sea verano o invierno). Este hecho contradice la formulación de acciones térmicas en puentes mixtos empelada en la IAP desde el año 1972 (IAP-72 [3] y IAP-98[1]), donde concomitante con la máxima dilatación sólo se producía un gradiente negativo (con el acero más caliente que el hormigón), y concomitante con la máxima contracción sólo se producía un gradiente positivo (con el acero más frío que el hormigón).

Este descubrimiento contrastado por los resultados de la instrumentación, junto con el mejor ajuste del comportamiento térmico del resto de tableros de hormigón o de acero (ver ref. [4]) a la formulación del Eurocódigo [2], ha motivado la adopción de las acciones térmicas del Eurocódigo [2] para la nueva y reciente revisión de la IAP-98.

Los máximos valores observados de la diferencia de temperatura entre el acero y el hormigón son de +16 °C (durante el día en los meses de invierno Fig. 10) y -8 °C (durante la noche en los meses de verano Fig. 11).

Los valores positivos (acero más caliente) observados son en general siempre mayores que los propuestos por el Eurocódigo EN-1991-1-5 [2] en su planteamiento 2 simplificado para secciones mixtas, en el que se propone el empleo de +10°C.

En la nueva revisión de la IAP-98 [1] se ha propuesto el empleo de +18°C, valor similar a los históricamente empleados en la IAP-72 [3] y en la IAP.98 [1], y respetar el valor propuesto por el Eurocódigo de -10°C cuando el acero esté más frío que el hormigón.

### 5.3. Componente de la diferencia de temperatura horizontal.

Como se ha descrito en el apartado 5.2 la componente de la diferencia de temperatura horizontal, obtenida como la diferencia de la temperatura media de las dos vigas metálicas lleva a resultados bastante superiores a los propuestos por el Eurocódigo EN-1991-1-5 [1], el cual sólo en casos excepcionales recomienda el empleo de una diferencia de 5°C entre extremos de la sección transversal.

Los valores máximos medidos de la diferencia de temperatura horizontal llegan a valores de hasta 16°C/18°C entre las dos vigas al atardecer en los meses de invierno (Fig. 3) por el efecto del soleamiento directo al caer el sol de la viga del lado oeste respecto de la viga en sombra en el lado este.

Este valor máximo de los meses de invierno se reduce hasta unos 8°C/10°C en primavera (Fig. 4) y todavía menores en verano entre 4°C/6°C (Fig. 5) (pues el soleamiento se produce a una hora muy tardía con temperaturas ambiente descendentes, alrededor de las 21h).

La componente de la diferencia de temperatura horizontal al amanecer es en cambio menor con máximos en verano, con mayor soleamiento en la viga del lado este, alcanzando hasta 10°C/12°C de temperatura diferencial en verano (Fig. 5) (hacia las 8 h), de 8°C/10°C en primavera (Fig. 4) y sólo de 1°C/ 2°C en invierno (Fig. 3), dada la brevedad y pequeña magnitud de la radiación solar.

## 6. Referencias

- [1] "Instrucción sobre las acciones a considerar en el proyecto de puentes de carretera". IAP-98. Ministerio de Fomento. Secretaría de Estado de Infraestructuras y Transportes. Dirección General de Carreteras. 1998.
- [2] EN 1991-1-5 "Eurocode 1: Actions on structures. Part 1-5: General Actions-Thermal actions"

November 2003.

- [3] “Instrucción relativa a las acciones a considerar en el proyecto de puentes de carretera”. *IAP-72*. Orden de 28 de Febrero de 1972. Ministerio de Obras Públicas.
- [4] ORTEGA M., MILLANES F., MANSILLA J.L., “Contraste normativo y experimental de los efectos térmicos en puentes de hormigón, metálicos y mixtos”. *V Congreso ACHE*. Barcelona. Oct- 2011
- [5] MILLANES, F.; PASCUAL, J.; ORTEGA, M. “Viaducto Arroyo las Piedras. Primer viaducto mixto de las Líneas de Alta Velocidad Españolas”. *Hormigón y Acero nº 243*. ACHE. Madrid 2007. pp. 5-38
- [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*. Volumen 61. Nº 258. ACHE. Madrid 2010. pp 81-97.
- [7] ORTEGA M., MILLANES F., MANSILLA J.L. "Thermal actions on composite concrete-steel bridges. Comparison between Eurocode and the results obtained on monitored bridges" *Proceedings of the Joint IABSE-fib Conference "Codes in Structural Engineering Developments and Needs for International Practice"*. Dubrovnik 2010. Volumen I. Pp 465-472. Ed. SECON-CSSE