

Análisis de la instrumentación de temperaturas del viaducto mixto de alta velocidad "Arroyo las Piedras"

Analysis of temperature instrumentation on the "Arroyo las Piedras" composite high speed rail viaduct

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

Recibido | Received: 04-01-2010
Aceptado | Accepted: 10-05-2010

Resumen

La instrumentación de temperaturas y movimientos empleada en el viaducto del Arroyo las Piedras, primer viaducto mixto de Alta Velocidad de España, 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 (en sombra). El artículo describe en detalle el comportamiento térmico del tablero mixto del viaducto, análisis que ha permitido sacar importantes conclusiones, que permitirán mejorar las futuras normativas de acciones térmicas en puentes mixtos.

Palabras clave: Instrumentación de puentes, temperatura, movimiento, viaducto mixto, Eurocódigo, IAP, gradiente térmico.

Abstract*

Temperatures' and movements' instrumentation of "Arroyo las Piedras" Viaduct, the first Spanish composite steel-concrete High Speed Railway Bridge, has allowed the continuous following of the thermal effect during approximately two years (2008-2009), with very precise measurements with intervals of 10 minutes, what gives a very reliable information for the diary and seasonal temperatures' evolution of the viaduct's deck. These measures have been correlated with the continuous registers of the air shade temperature. This paper describes in detail the thermal behavior of the composite viaduct's deck, analysis that has permitted to obtain important conclusions that will help to improve future codes in thermal actions for composite bridges.

Keywords: Monitored bridges, temperature, movement, composite viaduct, Eurocode, IAP, thermal gradient.

* An extensive English language summary of the present article is provided on page 103 of this issue both for the convenience of non-Spanish-speaking readers and inclusion in databases.

(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. E. T. S. 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. DESCRIPCIÓN DE LA INSTRUMENTACIÓN DE TEMPERATURAS Y MOVIMIENTOS

La instrumentación de temperaturas y movimientos empleada en el viaducto del Arroyo las Piedras, primer viaducto mixto de Alta Velocidad de España (Figuras 1a y 1b), 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 [1].

El viaducto tiene una longitud total de 1208,90 m, con vanos tipo de 63,50 m y altura máxima de pilas de hasta 96 m [2 y 3]. La elevada longitud del puente y su situación en una zona de alta sismicidad, obligó a fijar en sentido longitudinal el tablero de manera elástica en las 4 pilas centrales (pilas P-8 a P-11), pilas muy flexibles, y disponer amortiguadores con función de transmisores de impacto en los dos estribos.

Al tratarse por tanto de un puente con sus dos extremos libres frente a los movimientos de dilataciones/contracciones, y ser el primer viaducto mixto de alta velocidad de España, ADIF propuso una instrumentación durante los dos primeros años de puesta en servicio para confirmar las previsiones de movimientos del tablero producidos por la temperatura y retracción de la losa y hormigón de fondo.

Esta instrumentación ha servido para conocer con detalle el comportamiento térmico de los tableros mixtos,

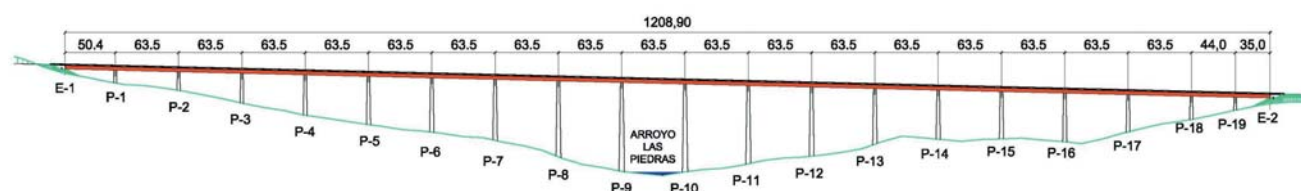
con conclusiones muy interesantes que servirán para mejorar las futuras normativas relativas a acciones térmicas en puentes mixtos, como se describirá más adelante.

Por motivos de extensión, el presente artículo se va a centrar en el análisis de la instrumentación de temperaturas del tablero, dejando para otro artículo posterior el análisis detallado de los movimientos de los extremos libres del tablero y su correlación con las temperaturas, además de otros análisis de interés como la evolución temporal del punto fijo del tablero, y las diferentes fases de rozamiento y deslizamiento del tablero sobre las pilas apoyado en los apoyos esféricos deslizantes en función de las dilataciones-contracciones diarias.

1.1. Sensores de temperatura y movimientos dispuestos en el puente

Inicialmente se dispusieron 4 sensores térmicos instalados en la sección del centro del vano 6, uno en el interior de la losa superior de hormigón en el eje de la sección transversal bajo el balasto, otro en el interior de las prelasas de cierre inferior del fondo del cajón, prelasas que tienen 14 cm de espesor, junto con otros dos termómetros de contacto para medir la temperatura del metal, situándolos en cada centro de las dos almas de las vigas metálicas (Figura 2).

Estos 4 sensores han servido para analizar la evolución de temperaturas y movimientos del tablero del viaducto durante el año 2008, y tras los análisis realizados y las mediciones observadas, a petición de IDEAM, ADIF de-



Figuras 1a y 1b. Alzado y vista del Viaducto Arroyo las Piedras

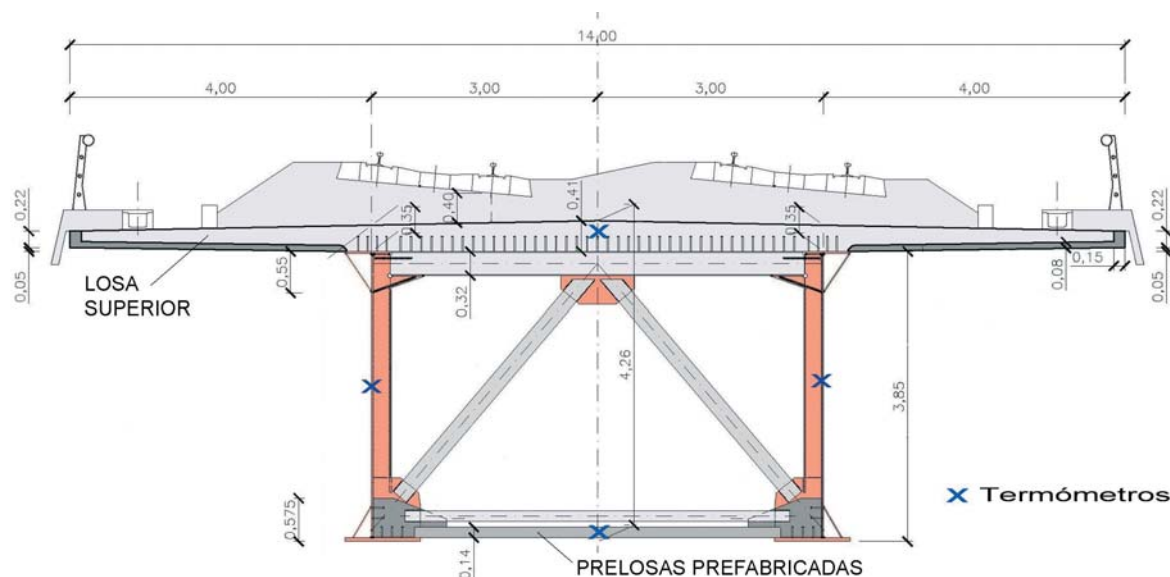


Figura 2. Posición de sensores de temperatura en la sección del centro del vano 6

ció incrementa la instrumentación, para confirmar una serie de hipótesis que se describen y confirman más adelante.

Se añadieron 2 sensores de temperatura más en la losa superior, disponiéndolos en los voladizos en la zona de paseos laterales donde la losa no está protegida por el balasto de la plataforma ferroviaria.

Para poder analizar la influencia del espesor del hormigón inferior en la temperatura, se añadió otro termómetro en el centro del hormigón de fondo en la zona de máximo espesor (50 cm), para así poder comparar los resultados con los obtenidos del termómetro dispuesto en la prelosa inferior de centro de vano, con 14 cm de espesor.

Adicionalmente se dispusieron otros dos sensores de temperatura más en cada una de las vigas metálicas, colocándolos en la parte superior e inferior de las almas, para ver la influencia y evolución del soleamiento en diferentes puntos de las vigas, y para contrastar la evolución de las temperaturas medias de la sección mixta se colocaron además tres termómetros dentro de la sección cajón para medir la temperatura del aire del interior del tablero del puente de 1208,90 m de longitud.

Todas las medidas de temperaturas se han podido correlacionar con los registros continuos de la temperatura ambiente exterior del aire a la sombra suministrados por una estación meteorológica situada en el tablero del viaducto en las proximidades de la pila 15.

Junto a estos sensores de temperaturas, se colocaron transductores de movimientos longitudinales en los extremos del tablero en los dos estribos y en tres pilas intermedias, para conocer los desplazamientos relativos del tablero respecto de las cabezas de dichas pilas. En esas mismas pilas se dispusieron además clinómetros para medir el giro longitudinal en la cabeza de pila.

2. DESCRIPCIÓN DE LOS RESULTADOS DE TEMPERATURAS MEDIDAS EN EL TABLERO

El Viaducto Arroyo las Piedras presenta un azimuth en planta de aproximadamente 163°, lo que supone una orientación sensible a la dirección Norte-Sur, de forma que los rayos del sol inciden sobre el lado izquierdo del tablero según avance de P.K.+ (lado este) por las mañanas y sobre el lado derecho (lado oeste) por las tardes, lo que supone una evolución de la temperatura en las vigas metálicas y en el hormigón de la sección a lo largo del día. Estos efectos también son evolutivos a lo largo del año y suponen la aparición de diferencias de temperaturas verticales y transversales, lo que provoca unos gradientes en la sección tanto en sentido vertical como horizontal.

Seguidamente se van a analizar las temperaturas registrada en los sensores los días más representativos de cada mes, estudiando su evolución anual.

2.1. Meses de invierno más fríos. Diciembre-Enero

En general el comportamiento durante los meses de invierno es muy similar.

- La temperatura ambiente del aire a la sombra presenta su mínimo sobre las 7:30 h, con un valor mínimo registrado durante los dos años de mediciones de 5°C en enero, y con un máximo que se produce entre las 13:00 h y las 15:00 h de unos 15°C medidos en el mes de diciembre. La variación de temperatura ambiente diaria es de unos 7°C tanto en diciembre como en enero (Figuras 3 y 4)
- La losa superior presenta una variación térmica diaria muy pequeña con oscilaciones de menos de 1°C

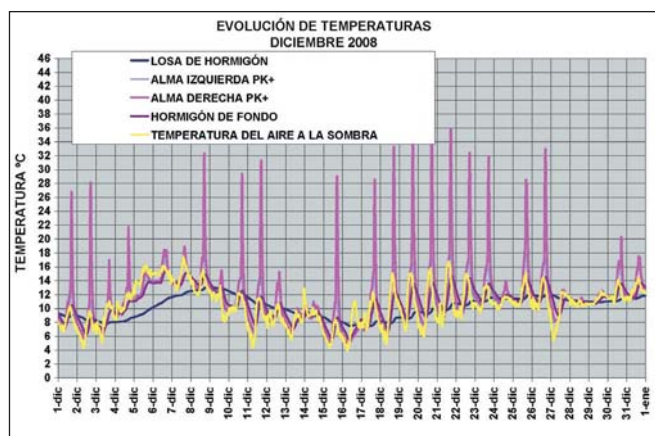


Figura 3. Temperatura ambiente y temperatura en los 4 sensores en un mes de invierno (diciembre-08)

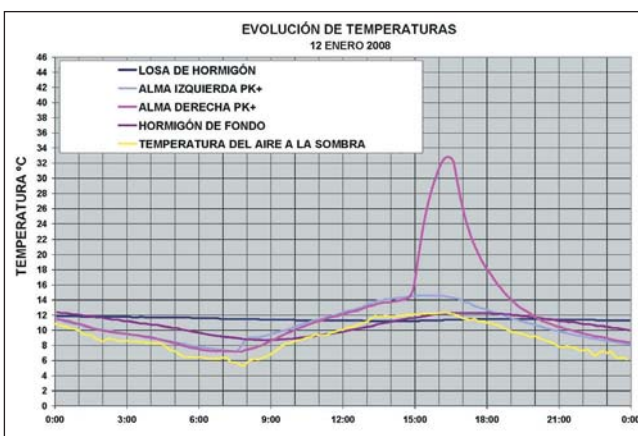


Figura 4. Temperatura ambiente y temperatura en los 4 sensores en un día de invierno característico (21-enero-08)

(Figura 4). Se han medido temperaturas entre 11°C y 14°C en invierno. Este hecho se debe al gran aislamiento superior que supone la capa de impermeabilización más el balasto, con un espesor medio de más de 65 cm sobre la losa. En un puente de carretera no se produce este efecto de manera tan marcada, ya que la capa del pavimento de rodadura, de menor espesor, no es capaz de aislar tanto a la losa, haciendo que la temperatura de la misma oscile algo más que en un puente de ferrocarril.

Para contrastar este comportamiento, tras el primer año de análisis, se dispusieron dos sensores de temperatura adicionales para medir la temperatura de la losa en los voladizos en la zona de los paseos, donde no hay balasto. En apartados sucesivos se describen las diferencias entre estas zonas y la zona central bajo la plataforma ferroviaria.

- La temperatura del hormigón de fondo, medida en la prelosa inferior de 14 cm de espesor situada en centros de vano, presenta en cambio una variación de temperatura diaria mayor que la de la losa superior (Figura 4). Su temperatura mínima se alcanza sobre las 9:00 h, decalada una hora y media respecto de la mínima temperatura ambiente diaria, con un valor mínimo de unos 9 °C en enero (aproximadamente 4°C más que la mínima temperatura ambiente diaria).

De una manera análoga, el valor de la temperatura máxima del hormigón de fondo se alcanza con un decalaje de unas 2 a 3 horas respecto del máximo de temperatura ambiente, con un valor prácticamente igual que el de la temperatura ambiente (unos 12°C en Enero).

- La temperatura del acero, medida en las almas de las 2 vigas laterales presenta el comportamiento siguiente (Figuras 3 y 4).

Durante la noche, la temperatura de las 2 vigas metálicas es prácticamente idéntica y muy similar a la temperatura ambiente, con diferencias muy ligeras de apenas 1 a 2°C superiores a esta última.

Durante el día las temperaturas de las 2 vigas presentan una serie de singularidades debido al soleamiento diferencial de una respecto de la otra. Así al amanecer sobre las 7:30 h el sol incide durante una media hora (hasta las 8:00 h) sobre la viga situada en el lado este (lado izquierdo según PK+), y aparece un ligerísimo aumento de la temperatura de esta viga respecto de la del lado oeste (lado derecho según PK+), que permanece en sombra. Este aumento es de apenas 1 a 2°C (Figura 4).

El sol enseguida sube y deja en sombra a la viga del lado este, tapada por el voladizo de la losa superior, por lo que desde las 8:00 h hasta las 14:30- 15:00 h la temperatura de las 2 vigas metálicas en sombra se igualan subiendo suavemente hasta alcanzar su máximo por encima de la temperatura ambiente unos 2 o 3°C.



Figura 5. Vista de la viga del lado oeste al caer el sol al inicio del atardecer, con la parte inferior de la viga expuesta al sol y el resto de la viga todavía en sombra (fotografía de enero-09)

Desde las 14:30-15:00h hasta las 16:00 h se produce un importante aumento de temperatura relativa de unos 16 a 19°C entre la viga del lado oeste y la del lado este. Esto es debido al soleamiento directo de la primera a las horas de más calor del día (Figuras 4 y 5), coincidiendo este soleamiento con el inicio del descenso del sol que llega a incidir a estas horas di-

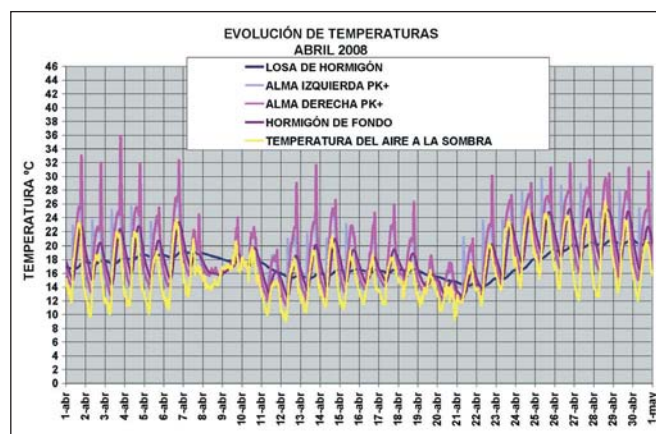


Figura 6. Temperatura ambiente y temperatura en los 4 sensores en un mes de primavera (abril-08)

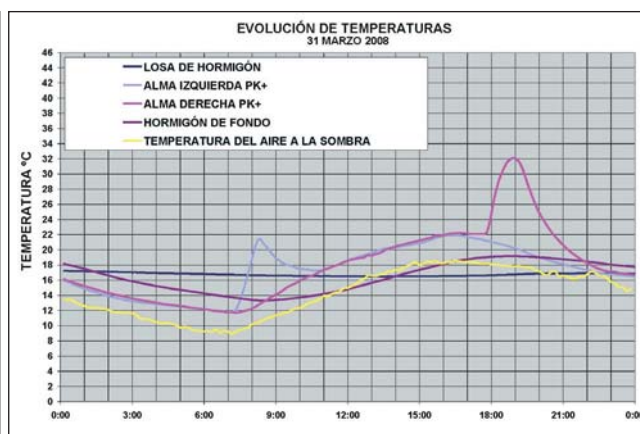


Figura 7. Temperatura ambiente y temperatura en los 4 sensores en un día típico de primavera (31-marzo-08)

rectamente sobre la viga del lado oeste. Desde las 16:00 h hasta las 18:00-19:00 h la temperatura de la viga del lado oeste baja mucho hasta aproximarse a la del lado este, igualando su temperatura durante la noche. Este descenso se produce con el ocaso al caer el sol y perder la influencia de la radiación solar directa (Figura 4).

Esta diferencia de temperatura entre una viga y otra, que produce un gradiente transversal, tiene su máximo en los meses de invierno (diciembre-enero).

De los gráficos de la figuras 3 y 4 se deduce que siempre que las vigas metálicas están en sombra, protegidas por los voladizos de la losa superior, mantienen temperaturas prácticamente idénticas, y sólo el efecto de la radiación solar directa, que se produce al amanecer en la viga del lado este, y al atardecer en la viga del lado oeste, induce diferencias de temperaturas relativas significativas.

En el caso de que el puente tuviera una orientación en la dirección este-oeste, en general, la viga situada en el lado norte siempre estaría a la sombra, y los picos producidos por el soleamiento directo matutino, y vespertino se producirían siempre en la viga del lado sur.

2.2. Comportamiento térmico del tablero en primavera: marzo y abril -08⁽¹⁾

Al avanzar el año y empezar la primavera, las temperaturas del tablero presentan un comportamiento bastante similar a las descritas en invierno en la losa superior y el hormigón de fondo, pero empiezan a mostrar un cierto cambio de tendencia en las vigas metálicas (Figuras 6 y 7).

- La losa superior, muy aislada por el balasto, se man-

tiene con oscilaciones térmicas diarias muy bajas del orden de 1°C (Figura 7). Durante el periodo de registros, se han medido temperaturas entre 13°C y 24°C en primavera.

- La temperatura del hormigón de fondo se comporta en primavera de manera muy similar a los meses de invierno con un mínimo sobre las 9:00 h⁽¹⁾ decalado unas 2 horas respecto del mínimo ambiente, (sobre las 7:00 h⁽¹⁾), con un valor de unos 3 a 4°C mayor que la mínima del aire a la sombra. La máxima del hormigón de fondo se alcanza sobre las 18:00 h⁽¹⁾ con un decalaje de unas 2 a 3 horas respecto de la máxima temperatura ambiente diaria, con un valor prácticamente igual que el máximo de la temperatura ambiente (Figura 7).
- A medida que avanza el año las temperaturas medidas durante el día en las 2 vigas metálicas del tablero empiezan a mostrar un comportamiento diferente que en invierno, en cambio durante la noche mantienen prácticamente el mismo comportamiento, con temperaturas sensiblemente iguales en las 2 vigas con valores unos 2°C superiores a la temperatura ambiente nocturna (Figuras 6 y 7).

Al amanecer sobre las 7:00 h⁽¹⁾ el sol incide con más fuerza y durante más tiempo sobre la viga del lado este (viga izquierda según PK+) que en invierno, haciendo que el pequeño pico que se producía en los meses de diciembre-enero que apenas era de 1 a 2°C llegue a ser de unos 10°C con su máximo a las 8:00 h⁽¹⁾.

Con el avance del día, al subir el sol, el voladizo de la losa superior vuelve a poner la viga del lado este a la sombra, y se reproduce el comportamiento de los meses de invierno, reduciéndose la temperatura de la viga este al no estar ya directamente expuesta a la radiación solar, hasta alcanzar la misma temperatura que la viga del lado oeste, que hasta entonces había

(1) Las horas indicadas en los gráficos y las referidas en los apartados 2.2 y 2.3 son siempre las del horario de invierno así por ejemplo en Mayo amanece sobre las 6:30h (horario de invierno) cuando en realidad deberían ser las 7:30h (horario de verano).

estado a la sombra. El máximo de temperatura en ambas vigas se produce en el entorno de las 16:00 h⁽¹⁾, con un valor de unos 3 a 4°C superior al máximo de la temperatura ambiente del aire a la sombra.

El importante aumento de temperatura que durante los meses de diciembre-enero se producía en la viga del lado oeste, al iniciarse el atardecer, desde las 14:30-15:00 h⁽¹⁾ hasta las 16:00 h⁽¹⁾, se desplaza a la franja comprendida entre las 18:00 y las 19:00 h⁽¹⁾, nuevo horario en el que coincide el atardecer en primavera, que son las horas de radiación por soleamiento directo de la viga oeste al caer la tarde. Este pico supone un incremento de unos 8 a 10°C en la viga metálica del lado oeste expuesta a los rayos directos del sol, y de valor algo menor que el que se producía en los meses de invierno (entre 16 y 19°C), ya que se produce concomitante con una tendencia de bajada global de temperaturas, mientras que en invierno se coincidía en una fase de tendencia al alza y durante las horas de mayor calor del día.

El análisis de temperaturas realizado, nos permite incluso saber si un día ha sido nublado, sin sol, ya que los picos matutinos y vespertinos descritos en las vigas metálicas no se producen tan marcadamente, al impedir las nubes que el sol caliente por radiación directa las vigas metálicas. Esto sucede por ejemplo en los días 19 y 20 de abril de 2008 (Figura 6), días que como se puede apreciar en el gráfico, apenas presentan picos con incrementos relativos de temperatura en las vigas metálicas, ya que el sol no llega a incidir directamente al estar oculto tras las nubes.

2.3. Comportamiento térmico del tablero en verano: junio y julio-08⁽¹⁾

La tendencia del comportamiento general del tablero al ir avanzando desde la primavera hacia el verano reproduce el efecto y la tendencia del avance analizado desde invierno hacia primavera (Figura 8)

- La losa superior del tablero sigue como el resto del

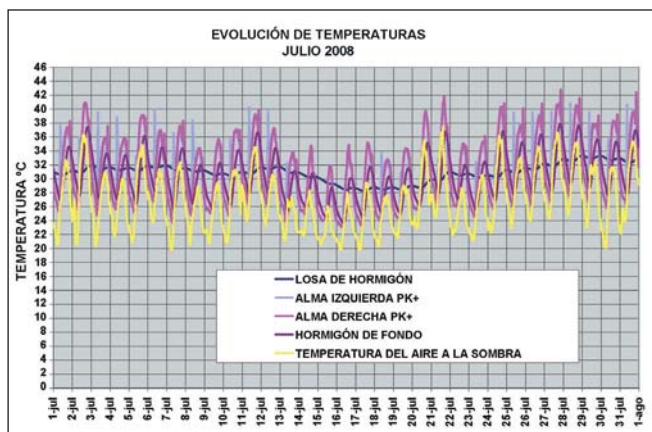


Figura 8. Temperatura ambiente y temperatura en los 4 sensores en un mes de verano (julio-08)

año, con oscilaciones muy bajas de apenas 1 a 2°C diarios (Figura 9), con valores de temperatura medidos entre 24°C y 33°C en verano.

- El hormigón de fondo presenta un comportamiento muy similar durante la noche con valores de temperaturas mínimas al amanecer sobre las 9:00 h⁽¹⁾ decaído unas 3 horas respecto de la mínima ambiente, con un valor unos 4°C mayor que la mínima temperatura del aire a la sombra (Figura 9).

La temperatura máxima se alcanza sobre las 19:30 h⁽¹⁾ unas 3,5 horas decaída respecto de la máxima ambiente (sobre las 16:00 h⁽¹⁾, y con un valor 1 ó 2°C superior a la máxima temperatura ambiente.

- El comportamiento térmico de las vigas metálicas hace que el pico detectado en la viga este (lado izquierdo) producido por la radiación directa del soleamiento del amanecer llegue a su valor máximo en la época del solsticio de verano con unos 14°C de máxima diferencia entre la viga del lado este y la del lado oeste. Este máximo se alcanza sobre las 8:30 h⁽¹⁾ y al subir el sol y ponerla en sombra, se vuelven a ajustar las temperaturas de las 2 vigas llegado a un máximo común sobre las 17:00 h⁽¹⁾, con un valor de unos 3 a 4°C por encima de la máxima temperatura ambiente.

El pico de incremento térmico de la viga del lado oeste (lado derecho) respecto de la del lado este (lado izquierdo) que se producía al empezar a caer el sol en invierno y se reducía y desplazaba en el tiempo al avanzar la primavera, llega a su mínima expresión en los meses de junio-julio, ya que el sol durante el día está muy alto, y la viga oeste se encuentra prácticamente siempre a la sombra debido al vuelo de la losa superior de hormigón, y sólo llega a estar expuesta al soleamiento directo del sol a partir de las 20:00 h⁽¹⁾ durante un periodo de menos de 1 hora. Como ya es una hora tardía y la temperatura global del acero está claramente en descenso, este pico llega a su mínimo diferencial en 3 a 4°C sobre las 21:00 h⁽¹⁾ (Figuras 7 y 8).

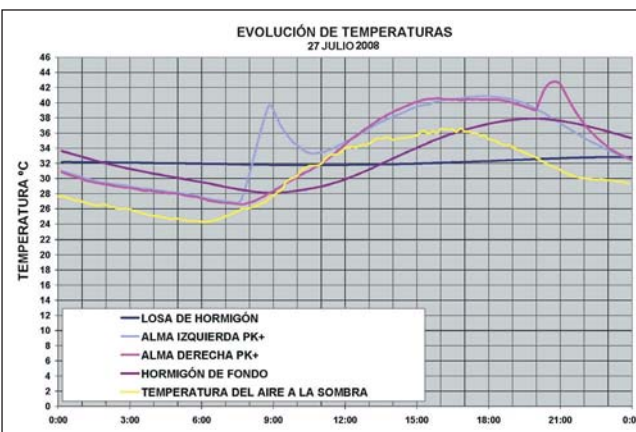


Figura 9. Temperatura ambiente y temperatura en los 4 sensores en un día representativo del verano (27-julio-08)

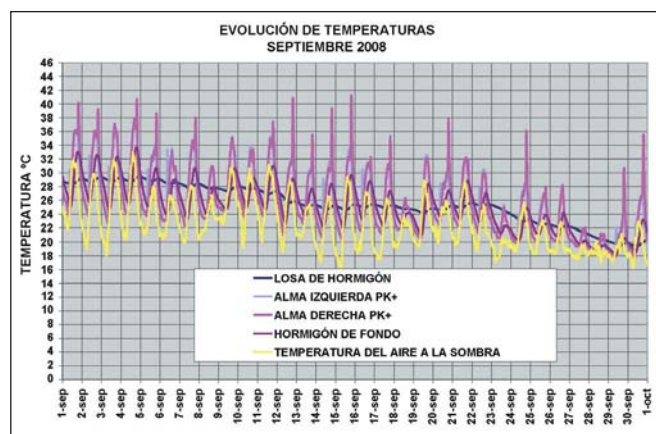


Figura 10. Temperatura ambiente y temperatura en los 4 sensores en un mes de otoño (septiembre-08)

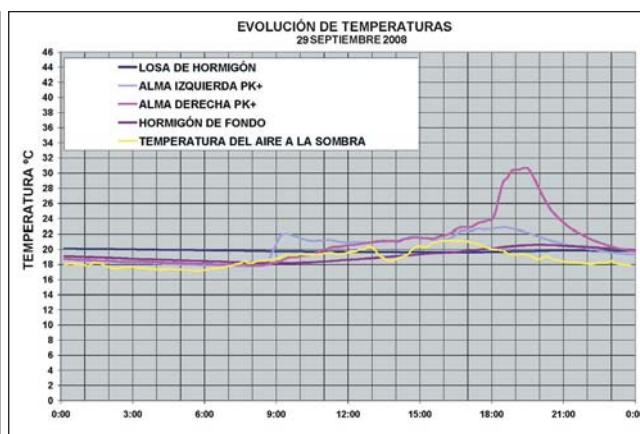


Figura 11. Temperatura ambiente y temperatura en los 4 sensores en un típico día característico del otoño (29-septiembre-08)

2.4. Comportamiento térmico del tablero durante el otoño y cierre del ciclo anual hacia el invierno

Al ir avanzando los días hacia agosto y septiembre se invierte el comportamiento descrito en la estructura metálica desde el invierno hasta junio, esto es:

- Existen pocas diferencias significativas en el comportamiento térmico de la losa superior y del hormigón de fondo respecto de otras estaciones del año.
- En cambio, el pico matutino con aumento de temperatura de la viga del lado este (lado izquierdo) se va reduciendo en magnitud (Figuras 10 y 11) hasta prácticamente anularse en invierno ya que la incidencia del sol en dicha viga a horas muy tempranas apenas llega a elevar su temperatura 1 o 2°C (Figuras 3 y 4), mientras que el pico vespertino de la viga del lado oeste (lado derecho) irá aumentando en valor, y se irá desplazando hacia el inicio de la tarde 14:00-15:00 h (Figuras 10 y 11) hasta alcanzar las máximas descritas en invierno (Figuras 3 y 4).

2.5. Aumento de la instrumentación de temperaturas y confirmación de tendencias.

Todos los análisis de la instrumentación de temperaturas del Viaducto durante el año 2008 se realizaron con los 4 sensores de temperatura descritos en el apartado 1.1 (Figura 2). Como se adelantó al inicio del artículo, tras este primer periodo de análisis de temperaturas se añadieron una serie de termómetros adicionales en la losa superior, el hormigón de fondo y las almas de las vigas metálicas (Figura 12) para confirmar una serie de hipótesis que se describen a continuación.

- En la losa superior se añadieron dos termómetros en el interior de los voladizos, coincidiendo con las zonas laterales de paseos, zonas donde no existe la capa superior del balasto de la plataforma ferroviaria, para analizar el posible efecto aislante de esa capa superior del balasto.

Como se puede apreciar en las figuras 13a y 13b, las temperaturas de los dos voladizos prácticamente son

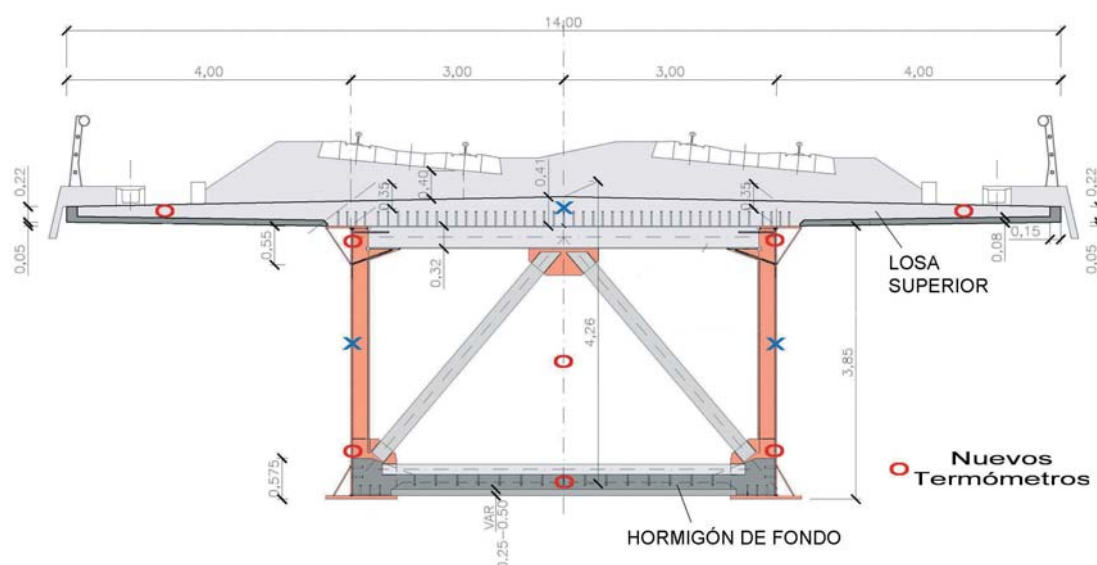
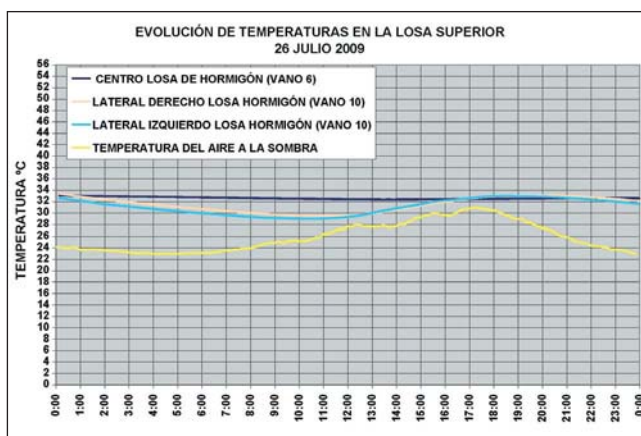
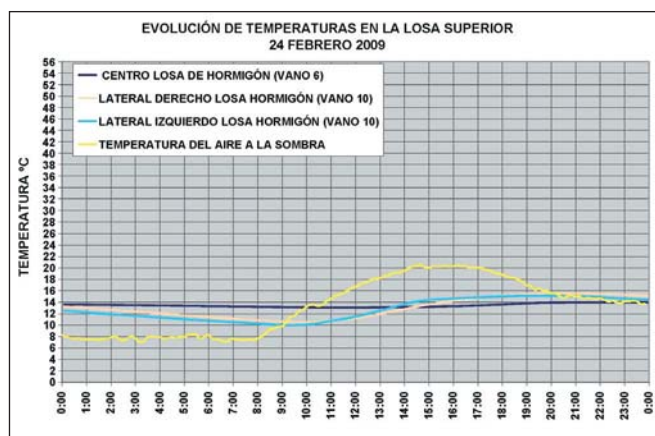


Figura 12. Incremento de sensores de temperatura en la losa superior, el hormigón de fondo, las vigas metálicas, y el interior del cajón (temperatura ambiente interior)



Figuras 13a y 13 b. Evolución de temperaturas de la losa. Voladizos y centro bajo el balasto

idénticas, y al no estar tan protegidas las zonas de los paseos, ya que en esa zona de losa la capa superior del balasto no existe, presentan ligeras oscilaciones de unos 2 a 3°C por encima o por debajo de la temperatura de la zona central de la losa, que presenta un comportamiento mucho más suave, como ya se expuso en los apartados 2.1 al 2.4 (Figuras 4, 7, 9 y 11). Este hecho prácticamente no afecta a la temperatura media de la losa superior, ya que la zona central bajo el balasto es mucho mayor que las pequeñas zonas de voladizos laterales.

En un puente de carretera, el comportamiento de la temperatura de la losa superior es muy similar a la evolución térmica de los voladizos de la losa superior del viaducto Arroyo las Piedras, ya que la capa de impermeabilización y el pavimento de unos pocos centímetros, no llega a producir el efecto de aislamiento tan importante que logra la triple membrana de impermeabilización y el balasto de las plataformas ferroviarias de alta velocidad, y así lo han podido confirmar los autores del artículo del análisis de otras instrumentaciones de temperaturas de puentes mixtos de carretera.

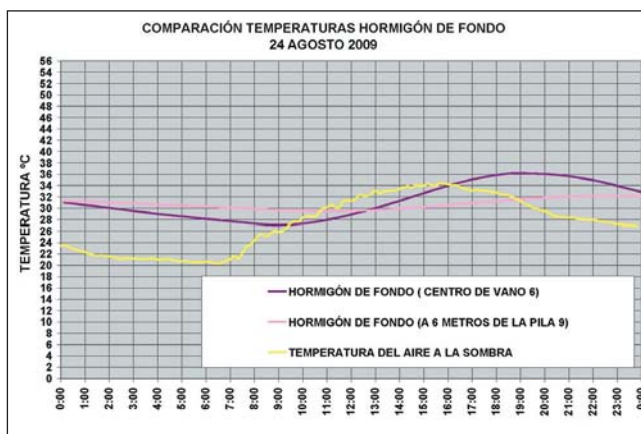
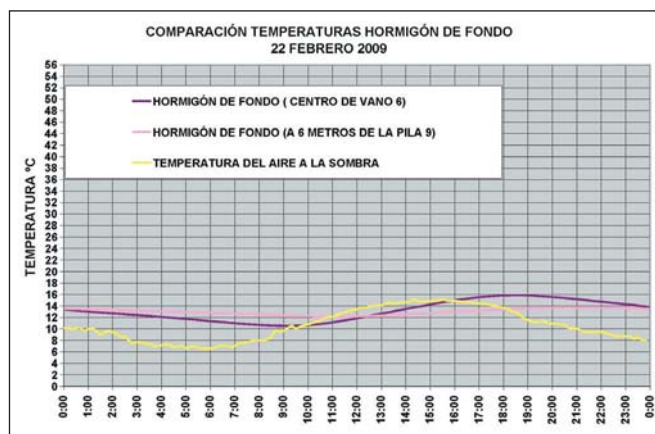
- Para analizar la posible diferencia de temperatura del hormigón de fondo en función del espesor, se decidió añadir un nuevo sensor de temperaturas en una zona cercana al eje de una pila, donde el espesor

del hormigón de fondo es máximo, llegando a los 50 cm (Figura 12). Las figuras 14a y 14b muestran la comparación de la temperatura de la zona de hormigón de fondo con casi 50 cm de espesor, cerca de la pila 9, en comparación con la temperatura de la prelosa inferior de la zona de centro de vano, con apenas 14 cm de espesor.

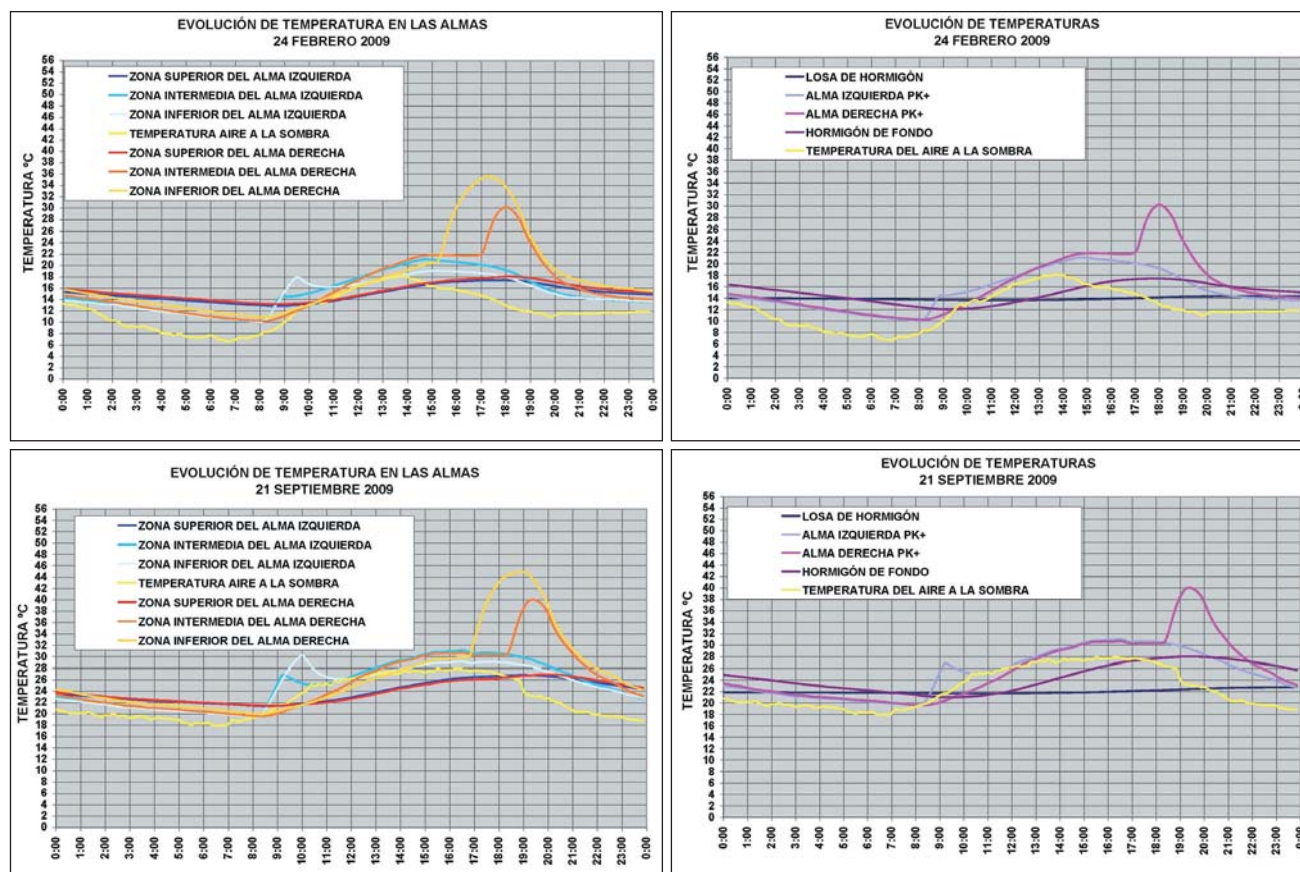
Como era de esperar, la evolución de la temperatura de la zona del hormigón de fondo con más espesor es más suave, con mínimos diarios más altos, y máximos diarios ligeramente más bajos, que la registrada en la prelosa inferior de poco espesor, con diferencias de apenas 1 a 2 °C en los meses de invierno (Figura 14a), y con diferencias máximas de hasta 3 a 4°C en verano. De cualquier manera las tendencias se mantienen idénticas a las analizadas con anterioridad en las prelosas inferiores.

- Para confirmar el comportamiento térmico de las vigas metálicas (apdos. 2.1 a 2.4), se añadieron dos termómetros de contacto en cada viga, uno en la parte más alta, inmediatamente debajo de la plataforma superior, y otro en la zona inferior más baja accesible desde el interior de la sección transversal, sobre los zunchos laterales (Figura 12).

En las figuras 15a y 15c se detalla la evolución de temperaturas de los 3 termómetros de cada una de



Figuras 14a y 14b. HF Correlación prácticamente perfecta entre la temperatura media equivalente



Figuras 15a, 15b, 15c y 15d. Evolución de temperaturas en las vigas metálicas. Análisis de dos días tipo, el 24 de febrero de 2009 y el 21 de septiembre de 2009

las dos vigas metálicas, durante dos días representativos, el 24 de febrero, y el 21 de septiembre de 2009, respectivamente. Mientras que en las figuras 15b y 15d se representan las temperaturas medias de las dos vigas metálicas, y su comparación con la de la losa superior, y el hormigón inferior, en un análisis similar al ya realizado en los apartados 2.1 al 2.4.

Como era de esperar, la temperatura de la zona superior de las vigas metálicas (Figuras 15a y 15c), presentan una evolución muy suave, sin los clásicos picos debidos al soleamiento directo del sol, ya que el voladizo de la losa superior no permite que el sol llegue a incidir directamente sobre esa zona prácticamente en ningún instante del día, ni al amanecer ni al atardecer, con lo cual las temperaturas de la zona superior de las vigas metálicas siguen las tendencias suaves del comportamiento de las secciones parciales de hormigón.

En cambio, el comportamiento térmico de la zona inferior de las vigas metálicas (Figuras 15a y 15c), es muy similar al ya analizado en el termómetro del centro de las almas (Figuras 4, 7, 9 y 11).

El pico producido por el soleamiento matutino del amanecer en la viga del lado este (lado izquierdo según PK+), se produce en la zona inferior de la viga de manera paralela al medido en la zona central, con la única diferencia que éste se prolonga ligeramente

en el tiempo, algo menos de una hora, ya que el voladizo de la losa pone antes en sombra la zona del centro del alma al ir subiendo el sol, mientras que la zona inferior de la viga permanece algo más de tiempo expuesta al sol durante el amanecer (Figuras 15a y 15c).

El ya conocido pico de temperatura vespertino que se produce en la viga del lado oeste (lado derecho según PK+) al atardecer, descrito en los apartados 2.1 al 2.4 (Figuras 4, 7, 9 y 11), cuando el voladizo de la losa superior permite que el sol incida directamente sobre la viga metálica, presenta una ligera diferencia entre la zona inferior y la zona central. La zona inferior de la viga oeste presente el aumento de temperatura algo más de una hora antes que la zona central (Figuras 15a y 15c), ya que el sol empieza a incidir primero en la zona baja (Figura 5) y posteriormente, al ir avanzando el atardecer con el sol menos alto, los rayos salvan el vuelo de la losa superior llegando a incidir algo más tarde en la zona central. Como el sol está más tiempo incidiendo en la parte baja de la viga, el pico debido al soleamiento vespertino es mayor en esa zona que el que se produce en la zona central (Figuras 15a y 15c).

De cualquier manera, las temperaturas medias de las dos vigas metálicas (Figuras 15b y 15d), obtenidas ponderando las temperaturas medidas de la zona superior, media e inferior por sus áreas tributarias rela-

tivas, concluye con unos gráficos de evolución de temperaturas muy similares a los analizados en los apartados 2.1 al 2.4 (Figuras 4 y 11).

3. OBTENCIÓN DE LA TEMPERATURA MEDIA DEL TABLERO

El tablero de un viaducto mixto tiende a comportarse como un tablero de un único material en el que se deben de compatibilizar las deformaciones térmicas de los diferentes elementos.

La "temperatura media equivalente" de la sección mixta se obtiene a partir de las temperaturas de las vigas metálicas, de la losa superior de hormigón y del hormigón de fondo, planteando el equilibrio a nivel seccional, a partir de la siguiente expresión, función de las áreas de cada sección parcial de diferente material, los coeficientes de dilatación lineal (α) de cada material, y de las temperaturas de cada sección parcial:

$$\alpha^* \cdot T_{\text{media, equivalente}} = \alpha_c \cdot \left[\frac{A_{c,R \text{ LOSA}}}{A_R} \cdot T_{c, \text{LOSA}} + \frac{A_{c,R \text{ HF}}}{A_R} \cdot T_{c, \text{HF}} \right] + \alpha_s \cdot \frac{A_s}{A_R} \cdot T_s \quad (1)$$

Donde:

$A_{c,R \text{ LOSA}}$ es el área reducida a acero de la sección parcial de la losa superior de hormigón.

$A_{c,R \text{ HF}}$ es el área reducida a acero de la sección parcial del hormigón de fondo.

A_s es el área de la sección parcial de acero.

A_R es el área reducida a acero la sección mixta completa. $A_R = A_{c,R \text{ LOSA}} + A_{c,R \text{ HF}} + A_s$.

$T_{c, \text{LOSA}}$ es la temperatura de la losa superior.

$T_{c, \text{HF}}$ es la temperatura del hormigón de fondo.

T_s es la temperatura de la sección parcial del acero.

α_c es el coeficiente de dilatación lineal del hormigón. $\alpha_c = 1,00 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$

α_s es el coeficiente de dilatación lineal del acero. $\alpha_s = 1,20 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$.

$T_{\text{media, equivalente}}$ es según la ecuación (1) la temperatura media equivalente de la sección mixta, relativa a un coeficiente de dilatación lineal ficticio de la sección mixta α^* .

α^* es el coeficiente de dilatación lineal ficticio de la sección mixta.

Como se puede apreciar en la ecuación (1), el valor de la temperatura media equivalente de la sección mixta, depende fundamentalmente del valor que convencionalmente se decida emplear para el coeficiente de dilatación lineal ficticio α^* de la sección mixta. Por lo tanto, en función del valor de convención elegido para α^* , se obtendrán resultados diferentes para el valor de la temperatura media equivalente de la sección, por lo cual no se puede hablar de la temperatura media de una sección mixta sin referir el coeficiente de dilatación lineal con el cual se ha obtenido.

En cambio, la ecuación (2) que define la deformación media longitudinal equivalente ($\Delta \epsilon_{\text{media, equivalente}}$) de la sección es siempre un invariante, que ya no está sujeta a ningún tipo de convención:

$$\Delta \epsilon_{\text{media, equivalente}} = \alpha_c \cdot \left[\frac{A_{c,R \text{ LOSA}}}{A_R} \cdot \Delta T_{c, \text{LOSA}} + \frac{A_{c,R \text{ HF}}}{A_R} \cdot \Delta T_{c, \text{HF}} \right] + \alpha_s \cdot \frac{A_s}{A_R} \cdot \Delta T_s \quad (2)$$

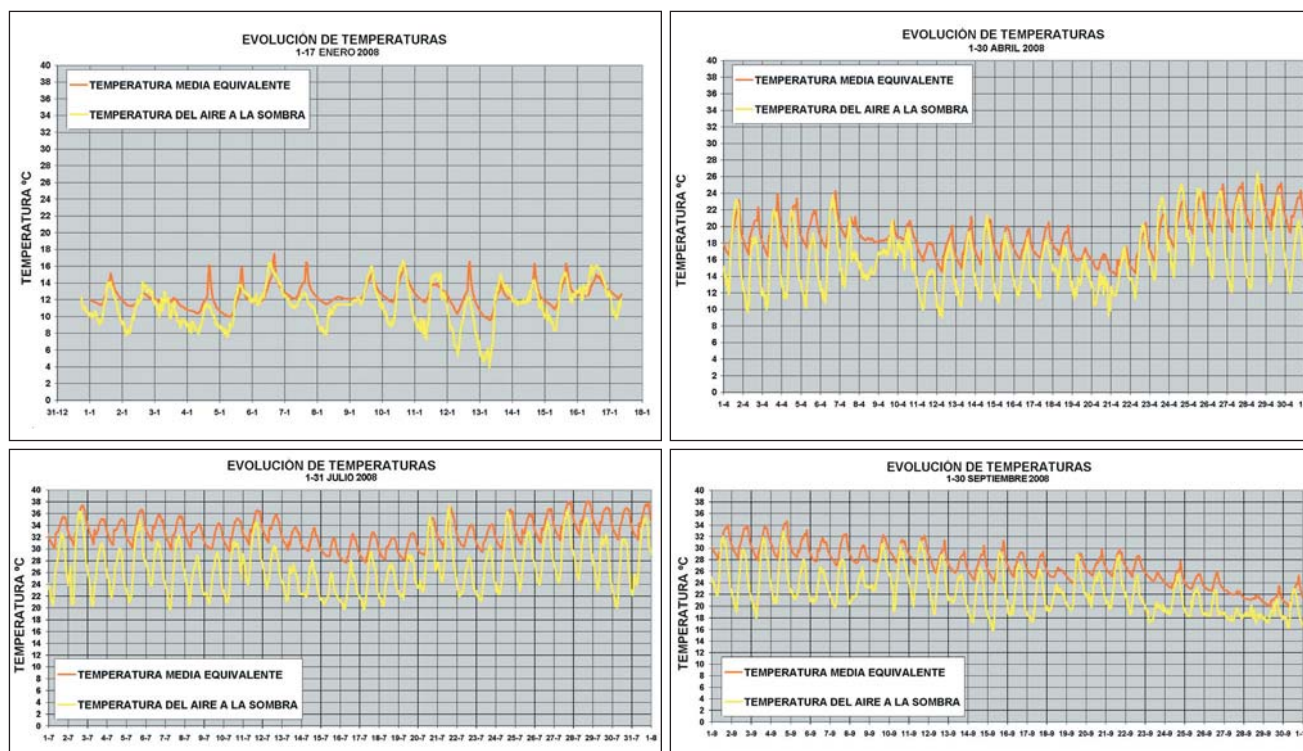
En este apartado se va a emplear el valor de $\alpha^* = 1,00 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ para obtener la temperatura media equivalente de la sección mixta, para poder así comparar los resultados con los obtenidos de la aplicación de las acciones térmicas del Eurocódigo (EN-1991-1-5) [4], aunque más adelante realizaremos una reflexión sobre el valor de este coeficiente.

Si aplicamos la ecuación (1) para la sección instrumentada se llega a que el valor de la temperatura media equivalente (referida a un coeficiente de dilatación ficticio de la sección mixta de $\alpha^* = 1,00 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$), es:

$$T_{\text{med. equivalente}} \approx 0,567 \cdot T_{c, \text{losa}} + 0,136 \cdot T_{c, \text{HF}} + 0,357 \cdot T_s \quad (3)$$

En general, en las secciones de puentes de carretera con simple acción mixta (losa superior de hormigón más acero inferior) bien condicionadas, el valor de la temperatura media equivalente de la sección está muy condicionado por la temperatura del hormigón, debido la elevada influencia relativa del área de la sección parcial de hormigón frente a la del acero, lo que se traduce en los casos habituales en que $T_{\text{med. equivalente}} \approx (65-75\%) \cdot T_{c, \text{losa}} + (42-30\%) \cdot T_s$, mientras que en secciones mixtas con doble acción mixta (losa superior y hormigón de fondo), en zonas de negativos, este valor puede llegar a estar todavía más influido por la temperatura media de las secciones parciales de hormigón, llegando a valores de $T_{\text{med. equivalente}} \approx (75-85\%) \cdot T_{c, \text{media (losa y HF)}} + (30-18\%) \cdot T_s$.

En puentes de ferrocarril, como el que nos ocupa, ocurre algo bastante similar, aunque con un ligero aumento relativo de la influencia de la temperatura del acero, del orden de un 5 a un 8%, debido a la mayor área relativa de acero respecto del hormigón total de la sección; por tanto un resultado como el de la ecuación (3), se encuentra dentro de lo esperado en un puente mixto de ferrocarril.



Figuras 16a, 16b, 16c y 16d. Relación entre la temperatura media equivalente de la sección mixta y la temperatura ambiente del aire a la sombra en las cuatro estaciones del año. (Meses de enero, abril, julio y septiembre de 2008).

Todo esto nos lleva a que un viaducto mixto tiende a comportarse con oscilaciones térmicas equivalentes del orden del 70% de las de un viaducto de hormigón y del 35% de un viaducto metálico (ecuación 3), lo que confirma esta característica muy favorable de los viaductos mixtos respecto de las deformaciones impuestas.

En las figuras 16a, 16b, 16c y 16d, se detallan los resultados obtenidos de la temperatura media equivalente de la sección, obtenida como ya se ha descrito con anterioridad, con un coeficiente de dilatación lineal ficticio $\alpha^* = 1,00 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$.

3.1. Relación de la temperatura de la sección mixta y la temperatura del aire a la sombra con la formulación propuesta por el Eurocódigo [4]

Una vez obtenida la evolución diaria de la temperatura media equivalente de la sección mixta (de la aplicación de la ecuación 1, plasmada en la ecuación 3), se ha contrastado el resultado obtenido, comparando los valores máximos y mínimos diarios de la temperatura del aire a la sombra ($T_{\max}$, $T_{\min}$) con los valores máximos y mínimos de la temperatura diaria de la sección mixta ($T_{e,\max}$, $T_{e,\min}$) siguiendo la nomenclatura del Eurocódigo [4], de una manera análoga al análisis realizado por P. Crespo en la referencia [5] para el caso de un tablero de hormigón.

Para un tablero mixto, el Eurocódigo [4], define los valores de las componentes uniformes mínima ($T_{e,\min}$) y máxima ($T_{e,\max}$) del puente en función de la temperatu-

ra mínima ($T_{\min}$) y máxima ($T_{\max}$) del aire a la sombra previsible en el lugar del emplazamiento del puente. Para un puente mixto, esto equivale a las ecuaciones (4) y (5):

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

$$T_{e,\max} = T_{\max} + 4,50 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (5)$$

Para la zona donde se localiza el Viaducto Arroyo las Piedras, los valores mínimos y máximos del aire a la sombra previsible, son de -8°C , y $+46^\circ\text{C}$, lo cual implicaría, según las ecuaciones (4) y (5), obtenidas del Eurocódigo [4], unos valores mínimos y máximos de temperatura característica en el tablero mixto de $T_{e,\min} = -3,5^\circ\text{C}$, y de $T_{e,\max} = 50,5^\circ\text{C}$, y una variación uniforme de temperatura en el tablero mixto, según Eurocódigo [4], de $\Delta T = 54,0^\circ\text{C}$.

Los valores máximo y mínimo de la temperatura media equivalente de la sección mixta del tablero, obtenidos de la instrumentación de temperaturas a lo largo del período de casi dos años de seguimiento han sido (Figuras 16a, 16b, 16c, 16d, y 17):

- máximo $40,5^\circ\text{C}$, concomitante con una máxima temperatura ambiente de aire a la sombra de 39°C
- mínimo 5°C concomitante con una mínima temperatura ambiente de aire a la sombra de 1°C

Estos valores obtenidos de la instrumentación de temperaturas del viaducto durante dos años de seguimiento ($\Delta T = 40,5 - 5^\circ\text{C} = 34,5^\circ\text{C}$), muestran un amplio margen

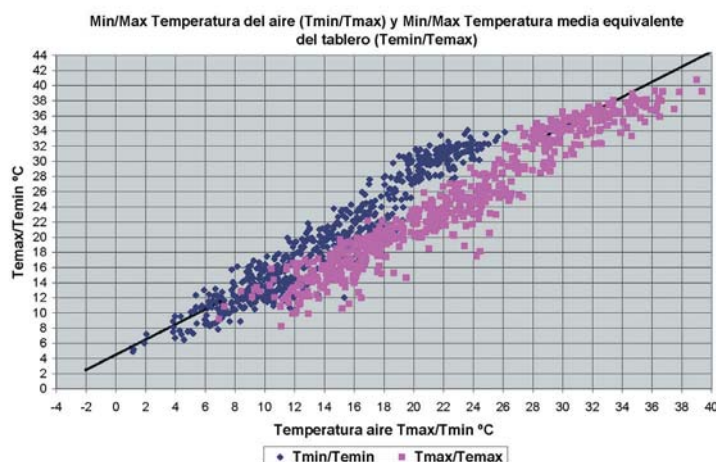


Figura 17. Relación entre $T_{\max}/T_{\min}$ del aire a la sombra (eje de abscisas) y $T_{e,\max}/T_{e,\min}$ temperaturas equivalentes máximas y mínimas diarias de la sección mixta (eje de ordenadas). Comparación con la propuesta de EN-1991-1-5 [4].

frente a la previsión prevista por el Eurocódigo [4] ($\Delta T=54,0^{\circ}\text{C}$).

El gráfico de la Figura 17 confirma lo adecuado de la formulación del Eurocódigo [4] para obtener los valores máximos y mínimos de la temperatura uniforme de un tablero mixto en función de la temperatura máxima y mínima ambiente del aire a la sombra.

Se confirma asimismo, tal y como establece el Eurocódigo [4], 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, 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.

3.2. Reflexiones acerca del coeficiente de dilatación lineal de una sección mixta

Como ya se ha expuesto en el punto anterior, las ecuaciones (4) y (5) que ligán las temperaturas uniformes máximas y mínimas en una sección mixta con las temperaturas máximas y mínimas, respectivamente, del aire a la sombra, se han obtenido para un valor de un coeficiente de dilatación lineal ficticio α^* de una sección mixta igual a $1,00 \cdot 10^{-5} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$, lo cual no quiere decir que el coeficiente de dilatación de una sección mixta sea $1,00 \cdot 10^{-5} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$, simplemente es una convención, que ha servido para baremar y definir las ecuaciones (4) y (5).

En realidad, para cualquier valor de α^* que se quisiera elegir, se podrían obtener otras dos las ecuaciones similares a las ecuaciones (4) y (5) que ligasen las temperaturas uniformes máximas y mínimas en una sección mixta con las temperaturas máximas y mínimas del aire a la sombra.

En los gráficos siguientes se compara la temperatura media equivalente de la sección mixta, calculada con un coeficiente de dilatación ficticio $\alpha^*=1,00 \cdot 10^{-5} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$, con la temperatura del interior del aire de la sección cerrada (Figuras 18a y 18b).

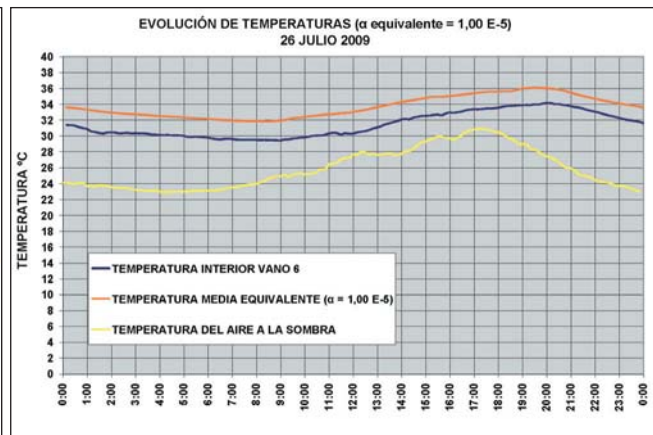
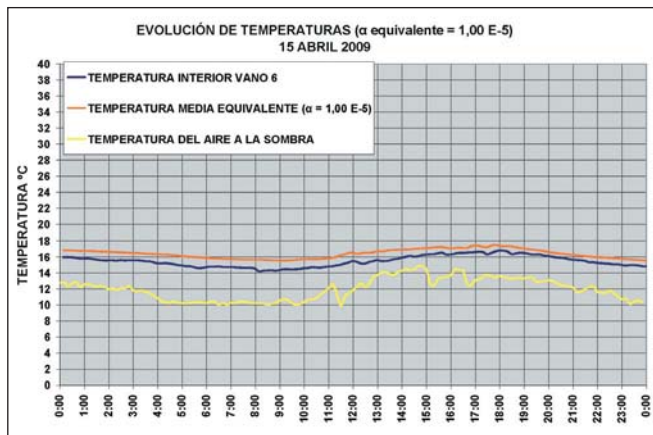
Como se puede apreciar la correlación entre la temperatura media equivalente y la temperatura interior del cajón mixto cerrado es casi perfecta, con un ligero decaje que hace que la temperatura media calculada con un coeficiente de dilatación lineal ficticio de $1,00 \cdot 10^{-5} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ se sitúe ligeramente por encima de la temperatura interior del cajón, lo cual se acentúa algo más en los meses de verano (Figura 18b).

Este mismo ejemplo lo han realizado los autores del artículo para otros viaductos con secciones transversales de hormigón y metálicas, tras el análisis de sus respectivas instrumentaciones de temperaturas, y los resultados han sido sorprendentemente similares, tanto para una sección cajón de hormigón como para una sección metálica cerrada.

La temperatura media de la sección en esos casos, obtenida de la instrumentación de temperaturas, es prácticamente exacta, con diferencias mínimas (de menos de 1°C), a la temperatura del aire del interior de la sección cerrada. Este hecho lo confirma la EN-1337 [6] que en su anexo D propone para una sección cajón cerrada obtener el valor de la temperatura media de la sección como la temperatura interior del aire del cajón con errores menores de $\pm 1^{\circ}\text{C}$.

Si esto ocurre en una sección de hormigón y en una sección de acero, tal y como se ha podido contrastar del análisis de diversas instrumentaciones, no parece que haya ningún motivo por el cual en una sección mixta no suceda lo mismo. La única dificultad que aparece en el caso de la sección mixta es que, mientras que una sección de hormigón o de acero el valor del coeficiente de dilatación lineal es claramente conocido ($\alpha_c=1,00 \cdot 10^{-5} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ y $\alpha_s=1,20 \cdot 10^{-5} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ respectivamente), para obtener la temperatura media equivalente de una sección mixta es necesario hacer la hipótesis del valor del coeficiente de dilatación ficticio de la sección mixta α^* (ver ecuación (1)).

Siguiendo con este argumento, en el caso de que nuestra sección mixta estuviera compuesta por mucho más hormigón del habitual, y prácticamente nada de acero,



Figuras 18a y 18b. Relación entre la temperatura media equivalente de la sección mixta (calculada con $\alpha^*=1,00\cdot 10^{-5} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$) y la temperatura del aire en el interior de la sección cerrada

parece evidente pensar que el coeficiente de dilatación lineal ficticio de esa sección (ficticia) tendería al del hormigón $\alpha^*\cong\alpha_c=1,00\cdot 10^{-5} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$. Ahora bien, si pensamos en el sentido opuesto, y planteamos una sección mixta teórica con mucho más acero del habitual y muy poco hormigón, tampoco costaría mucho pensar que en ese caso el coeficiente de dilatación lineal debería tender al del acero $\alpha^*\cong\alpha_s=1,20\cdot 10^{-5} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$.

Este argumento hace pensar que el coeficiente de dilatación lineal "equivalente" de una sección mixta, debería de depender de las relaciones de áreas de cada una de las secciones parciales, por lo que una propuesta similar a las relaciones entre temperaturas de las diferentes secciones parciales como al de la ecuación 1, parece que debería adecuarse muy bien (ecuación (6))

Supongamos por tanto que el coeficiente de dilatación lineal de una sección mixta es:

$$\alpha^* = \alpha_c \cdot \left[\frac{A_{c,R,LOSA}}{A_R} + \frac{A_{c,R,HF}}{A_R} \right] + \alpha_s \cdot \frac{A_s}{A_R} \quad (6)$$

Donde:

α^* es el coeficiente de dilatación lineal de la sección mixta.

α_c es el coeficiente de dilatación lineal del hormigón. $\alpha_c = 1,00\cdot 10^{-5} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$

α_s es el coeficiente de dilatación lineal del acero. $\alpha_s = 1,20\cdot 10^{-5} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$

$A_{c,R,LOSA}$ es el área reducida a acero de la sección parcial de la losa superior de hormigón.

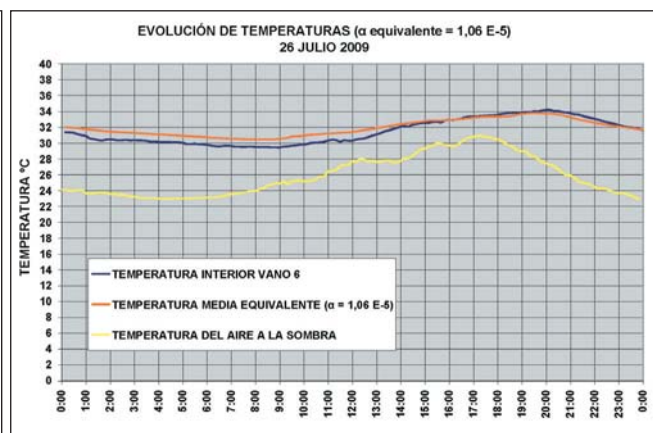
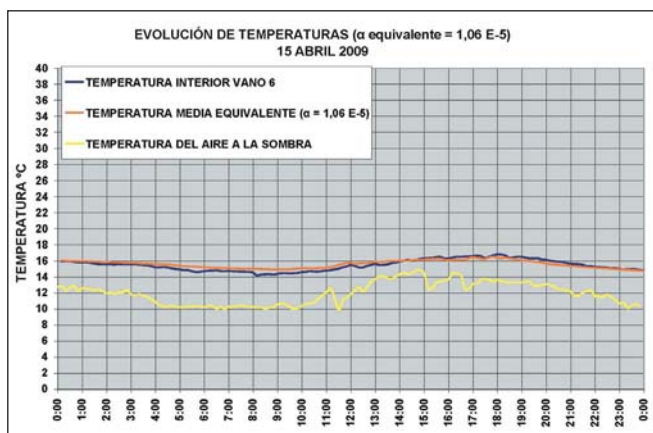
$A_{c,R,HF}$ es el área reducida a acero de la sección parcial del hormigón de fondo.

A_s es el área de la sección parcial de acero.

A_R es el área reducida a acero la sección mixta completa. $A_R = A_{c,R,LOSA} + A_{c,R,HF} + A_s$

En nuestro caso el resultado sería de $\alpha^*=1,06\cdot 10^{-5} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$, que como es lógico, se acerca bastante más al coeficiente de dilatación lineal del hormigón ($\alpha_c=1,00\cdot 10^{-5} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$) que al del acero ($\alpha_s=1,20\cdot 10^{-5} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$), ya que como se ha expuesto en el apartado 3 la influencia relativa del área de la sección parcial de hormigón es muy elevada frente a la del acero.

Con este nuevo coeficiente de dilatación lineal ajustado ($\alpha^*=1,06\cdot 10^{-5} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$), se ha obtenido, el valor de la nueva temperatura media equivalente de la sección, confir-



Figuras 19a y 19b. Correlación prácticamente perfecta entre la temperatura media equivalente de la sección mixta (ajustada con $\alpha^*=1,06\cdot 10^{-5} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ para este caso) y la temperatura del aire en el interior de la sección cerrada

mándose la hipótesis de partida con una correlación prácticamente perfecta entre la temperatura media equivalente de la sección mixta y la temperatura del aire del interior de la sección cajón cerrada. En las Figuras 19a y 19b se puede apreciar lo ajustada de la correlación, bastante mejor que la comparación de las Figuras 18a y 18b obtenidas para un coeficiente de dilatación lineal de $1,00 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$.

4. ANÁLISIS DE LA DIFERENCIA DE TEMPERATURA VERTICAL EN EL TABLERO

Las diferencias térmicas que se presentan en una sección mixta como consecuencia de la evolución diaria y estacional de la radiación solar y a la diferente inercia térmica del acero y del hormigón, generan un diferencial de temperatura vertical entre la media de las vigas de acero y los hormigones de la losa superior y del hormigón de fondo de la sección, lo cual produce una curvatura vertical de las secciones transversales, a modo de gradiente vertical, a adiconar al efecto de las dilataciones y contracciones producidas por la variación uniforme de la temperatura, analizada en el apartado 3.

La diferencia de temperatura vertical del tablero se traduce en la diferencia de temperatura de las secciones parciales de hormigón (losa superior, u hormigón de fondo) y la del acero [7].

Los gráficos de las Figuras 20a, 20b, 20c y 20d muestran en las cuatro estaciones las diferencias de temperaturas entre el acero y la losa superior, o entre el acero y el hormigón de fondo.

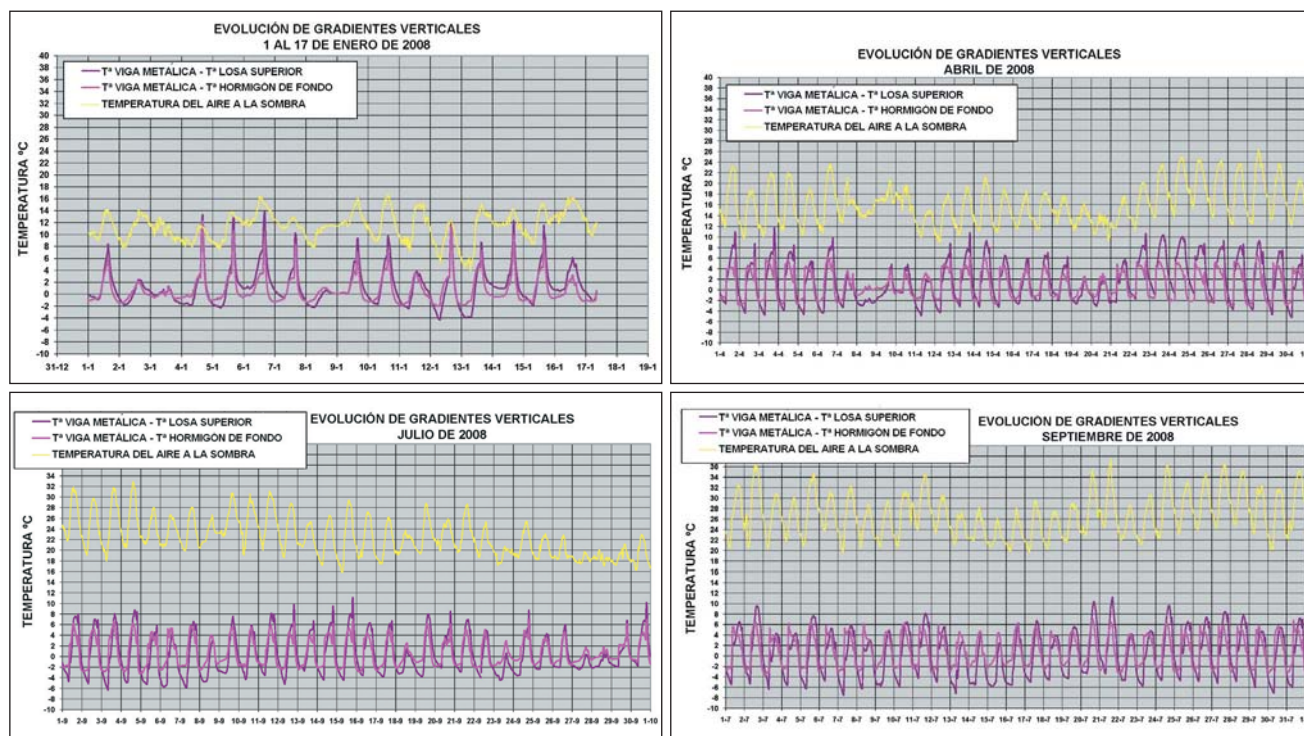
A este respecto, se ha podido observar de las mediciones de temperaturas registradas cómo, en general, durante el día, el acero está siempre más caliente que el hormigón (Figuras 20a, 20b, 20c y 20d), llegando a su máxima diferencia coincidiendo con la máxima temperatura del acero, mientras que en general, durante la noche, el acero siempre está más frío que el hormigón, independientemente además de la época del año, invierno o verano (Figuras 20a, 20b, 20c y 20d).

Este hecho contradice la hipótesis de la actual IAP-98 [8], heredada de la antigua IAP-72 [9], que para puentes mixtos proponía calcular con una diferencia de temperatura vertical entre el acero y el hormigón, con el acero más caliente que hormigón, siempre concomitante con la dilatación máxima (o sea, en verano), y una diferencia de temperatura vertical entre el acero y el hormigón, con el acero más frío que hormigón siempre concomitante con la máxima contracción (o sea en invierno).

Como se ha demostrado en las Figuras 20a, 20b, 20c y 20d, en la realidad, cada día, se produce la doble curvatura, producida por una diferencia de temperatura vertical positiva durante el día (con el acero más caliente que el hormigón) y negativa durante la noche (con el acero más frío que el hormigón), independientemente de la estación del año.

Los máximos valores observados de la diferencia de temperatura del acero menos la del hormigón son de $+16 \text{ } ^\circ\text{C}$ (durante el día en los meses de invierno Figura 20a) y $-8 \text{ } ^\circ\text{C}$ (durante la noche en los meses de verano Figura 20c).

Estos valores observados son en general siempre mayores que los propuestos por EN-1991-1-5 [4] en su plan-



Figuras 20a, 20b, 20c y 20d. Diferencia de la temperatura media en el acero y la temperatura de la losa y del hormigón de fondo respectivamente en las cuatro estaciones del año (Meses de enero, abril, julio, y septiembre de 2008)

teamiento 2 simplificado para secciones mixtas, el cual propone el empleo de $+10^{\circ}\text{C}$ y -10°C .

En la nueva revisión de la Instrucción sobre las acciones a considerar en el proyecto de puentes de carretera (actualización de la IAP [7]), que en la actualidad está preparando la Dirección General de Carreteras del Ministerio de Fomento, con quién IDEAM S.A. está colaborando en UTE con Torroja Ingeniería y Fhecor Ingenieros Consultores, se propondrá el empleo de una diferencia de temperatura vertical entre el acero y el hormigón de $+18^{\circ}\text{C}$ durante los días, valor muy similar a los históricamente empleados de la formulación de la IAP-98 [8] y la IAP-72 [9] para puentes mixtos, pero en cambio mantener el valor de -10°C como diferencia de temperatura entre el acero y el hormigón durante las noches del Eurocódigo [4].

5. ANÁLISIS DE LA DIFERENCIA DE TEMPERATURA HORIZONTAL DEL TABLERO

Como se ha descrito en el apartado 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 [4], 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 (Figuras 3 y 4) 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 (Figuras 6 y 7) y todavía menores en verano entre 4°C / 6°C (Figuras 8 y 9) (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 (Figuras 8 y 9) (hacia las 8 h), de 8°C / 10°C en primavera (Fig. 6 y 7) y sólo de 1°C / 2°C en invierno (Fig. 3 y 4), dada la brevedad y pequeña magnitud de la radiación solar.

El estado tensional incluido por esta diferencia de temperatura transversal por diferencia de soleamiento entre una viga metálica y otra, induce un gradiente transversal en la sección del tablero, el cual tiene dos componentes, la primera una variación de curvatura y tensiones a nivel seccional y la segunda el efecto de las

reacciones horizontales hiperestáticas que aparecen en el tablero con esfuerzos hiperestáticos de flexión transversal que equilibran en parte el primer efecto al tener signo contrario.

Tras el análisis de ambos efectos se llega a un estado tensional en las vigas metálicas que componen la sección mixta del tablero con una variación de apenas unos $\pm 22 \text{ N/mm}^2$, con muy poca afección a nivel tensional a la losa superior y el hormigón de fondo. Con lo cual los efectos producidos por los picos de temperatura diferenciales entre una viga metálica y otra son prácticamente intrascendentes, con variaciones tensionales admisibles.

6. CONCLUSIONES

La información analizada permite avanzar datos concluyentes sobre los efectos térmicos en viaductos mixtos.

Durante el período de casi dos años registrado, la temperatura ambiente a la sombra ha oscilado entre un mínimo de $+1^{\circ}\text{C}$ y un máximo de $+39^{\circ}$, 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, la cual supone una variación entre $-8^{\circ}\text{C} \leq T. \text{ ambiente} \leq 46^{\circ}\text{C}$.

Se puede verificar que la temperatura media de la losa superior de hormigón es muy estable, con variaciones diarias mínimas inferiores a 1°C ó 2°C , muy amortiguadas 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 de la plataforma ferroviaria. 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 la losa 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°C y 14°C en invierno, 13°C y 24°C en primavera, y 24°C y 33°C en verano (Figuras 3, 4 y 6 a 11).

Las temperaturas registradas en las prelosas inferiores, de 14 cm de espesor, y el hormigón de fondo, 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 unas variaciones térmicas diarias suaves y decaladas en el eje de las horas respecto de la temperatura ambiente, a cuyos valores extremos tienden a aproximarse (Figuras 3, 4 y 6 a 11):

- 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 a lo sumo en el entorno de los

3°C/ 4°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°C/ 2°C a los de la temperatura ambiente en verano e iguales o ligeramente 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 vigas metálicas está más influida, dada su pequeña inercia térmica, por las condiciones estacionales y, principalmente, de soleamiento:

- durante la noche las temperaturas de las vigas metálicas son prácticamente idénticas y muy poco alejadas de la temperatura ambiente (Figuras 3, 4 y 6 a11), a la que acompañan fielmente en su evolución, con pequeñas diferencias sólo en los valores mínimos, que en las vigas 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 vigas en las horas de sombra durante el día, acompañan también muy fielmente a la temperatura ambiente (Figuras 3, 4 y 6 a11), con valores máximos entre 2°C y 4°C superiores a los máximos de la temperatura del aire a la sombra;
- la acción de la radiación por soleamiento directo influye, en cambio, muy sensiblemente en la temperatura de las vigas metálicas, detectándose claramente unos bruscos e intensos "picos" de temperatura en el metal sometido a dicha radiación directa:
 - al atardecer en la viga del lado oeste con un "pico" máximo relativo entre ambas vigas de hasta 16°C/ 18°C en invierno (Figuras 3 y 4) (ya que coincide con el máximo de temperatura ambiente, hacia las 15 h), de entre 8°C/ 10°C en primavera (Figuras 6 y 7) (menor que en invierno ya que coincide con una tendencia de bajada global de la temperatura ambiente) y todavía menor, entre 3°C/ 4°C, en verano (Figuras 8 y 9) (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 (Figuras 8 y 9) (hacia las 8 h), de 8°C/10°C en primavera (Figuras 6 y 7) y sólo de 1°C/ 2°C en invierno (Figuras 3 y 4), dada la brevedad y pequeña magnitud de la radiación solar.

Como consecuencia de la diferencia de soleamiento entre las dos vigas metálicas, se 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) (Figuras 3, 4 y 6 a11). La máxima diferencia de

temperatura transversal entre vigas metálicas se produce, sorprendentemente, en invierno a primeras horas de la tarde (Figuras 3 y 4). En cualquier caso, la gran rigidez relativa de la losa superior de hormigón y del hormigón de fondo del tablero respecto a la flexibilidad de las almas metálicas, anula los efectos transversales del gradiente transversal, 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/mm² sin prácticamente ninguna repercusión resistente.

Del análisis de la diferencia de temperaturas verticales entre el acero y los hormigones se concluye lo siguiente:

- 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 independiente de la época del año, ya sea invierno o verano.
- Por tanto todos los días se produce un gradiente negativo (durante el día) con el acero más caliente que el hormigón, mientras que durante la noche, se produce un gradiente positivo, con el acero más frío que el hormigón.
- Este hecho contradice la hipótesis de la actual IAP-98, que para puentes mixtos propone un gradiente negativo (acero más caliente que hormigón) concomitante con la dilatación máxima (en verano), y un gradiente positivo (acero más frío que hormigón) concomitante con la máxima contracción (en invierno).
- 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). Los máximos valores observados han sido de +16 °C y -8 °C (diferencia de T^a del acero menos la del hormigón).

REFERENCIAS

- [1] MILLANES F. "Auscultación y sistemas de gestión Técnica de Estructuras". *I Jornada Técnica sobre Auscultación y sistemas de Gestión Técnica de Infraestructuras del Transporte*. Madrid: AUSIGETI, 2009. p. 27-48.
- [2] 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.
- [3] MILLANES F., PASCUAL J., ORTEGA M. "Arroyo las Piedras Viaduct: The first composite steel-concrete high speed railway bridge in Spain". *Structural Engineering International, IABSE*. 2007, vol. 17, n° 4, p. 292-297.

[4] EN 1991-1-5 "Eurocode 1: Actions on structures. Part 1-5: General Actions-Thermal actions". 2003.

[5] CRESPO P. "Contraste experimental de las variaciones térmicas en puentes". *III Congreso de ACHE de Puentes y Estructuras. Volumen I de comunicaciones*. Madrid: Asociación Científico-Técnica del Hormigón Estructural, 2005. p. 371-385.

[6] EN-1337-1:2009. *Draft 07-2009. Structural bearings. Part1: General rules*.

[7] ORTEGA M., MILLANES F., MANSILLA J.L. "Thermal actions on composite concrete-steel bridges. Comparison between Eurocode and the results obtai-

ned on monitored bridges". *Codes in structural engineering. Developments and needs for international practice*. Dubrovnic. Croacia: IABSE-FIB, 2010.

[8] MINISTERIO DE FOMENTO. IAP-98. *Instrucción sobre las acciones a considerar en el proyecto de puentes de carretera*. Madrid: Ministerio de Fomento. Secretaría de Estado de Infraestructuras y Transportes. Dirección General de Carreteras, 1998.

[9] MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS. IAP-72. *Instrucción relativa a las acciones a considerar en el proyecto de puentes de carretera*. Madrid: Ministerio de Obras Públicas, 1972.