

# CONTRASTE NORMATIVO Y EXPERIMENTAL DE LOS EFECTOS TÉRMICOS EN PUENTES DE HORMIGÓN, METÁLICOS Y 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 Projectista

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

## RESUMEN

El estudio normativo realizado sobre acciones térmicas ha podido confirmar cómo la IAP-98 no es del todo congruente en la definición de las acciones debidas a las variaciones de temperatura en puentes de hormigón o de acero, respecto de las de puentes mixtos. El análisis normativo ha servido para contrastar experimentalmente que la formulación de acciones térmicas de la IAP-98 no es conservadora, y en muchos casos puede estar del lado de la inseguridad, con resultados en lo referente a las variaciones de temperatura uniforme por debajo de los propuestos por el Eurocódigo, y de los resultados observados en la instrumentación de puentes.

**PALABRAS CLAVE:** Instrumentación de puentes, temperaturas, variación uniforme, gradiente, IAP-72, IAP-98, Eurocódigo.

## 1. Introducción.

El presente artículo repasan los antecedentes de la actual normativa de acciones térmicas, y compara los resultados de la aplicación de la normativa española vigente con el Eurocódigo, para puentes de hormigón, de acero o mixtos. Como se demuestra en el artículo, los resultados de la aplicación de la normativa española vigente de acciones térmicas en puentes, lleva a resultados de la variación uniforme de temperatura muy inferiores a los del Eurocódigo, con valores que quedan del lado de la inseguridad, cuestión que se ha contrastado con los resultados de la instrumentación de temperaturas de una serie de puentes de hormigón, acero y mixtos.

## 2. Variación uniforme de la temperatura según la IAP-72.

La IAP-72 [1] definía las acciones térmicas en elementos metálicos, de hormigón o mixtos, mediante expresiones sencillas pero compactas y muy congruentes, que no dependían ni de la localización del puente, ni del canto de la sección.

### 2.1. Elementos metálicos

La variación uniforme de temperatura en un elemento metálico se definía en la IAP-72[1] mediante una variación de  $\pm 35^{\circ}\text{C}$  a partir de la temperatura media anual local, independientemente de la geometría de la sección, su canto, y su ubicación.

**2.2. Elementos de hormigón**

La IAP-72 [1] establecía la variación uniforme de temperatura en elementos de hormigón, según la expresión siguiente:

$$\Delta T = \pm(20 - 0,75 \cdot \sqrt{e})^\circ C \quad (1)$$

Siendo e el espesor ficticio del elemento considerado en centímetros.

**2.3. Elementos mixtos**

Consecuente con lo anterior, las variaciones térmicas en elementos mixtos se fijaban en la IAP-72[1] según la tabla 1. Estas variaciones se referían a una temperatura de montaje de 15 °C.

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

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

**3. Variación uniforme de la temperatura según IAP-98.**

La IAP-98 [2] desarrolla las acciones térmicas en puentes metálicos y de hormigón, pero en cambio mantiene las mismas expresiones sencillas de la IAP-72 [1] para puentes mixtos, lo cual supone una cierta incongruencia formal con los nuevos cambios.

**3.1. Elementos de hormigón o metálicos**

La variación uniforme de la temperatura se define en la IAP-98[2] para tableros de hormigón o metálicos según la ecuación 2, que depende de la zona de ubicación del puente, del canto de la sección, de la geometría y del material. Los parámetros de la ecuación se definen en la tabla 2.

$$\Delta T = k \cdot z^a \cdot h^b \cdot s^c \quad (2)$$

Donde:

z es una variable que depende de la localización del puente (Fig. 1)

h es el canto en metros de la sección en metros.

s es la separación de vigas para puentes de vigas de hormigón  $1,5 \leq s \leq 3,5$  m.



**Figura 1. Zonas para la obtención de la variación uniforme de temperatura del puente (IAP-98).**

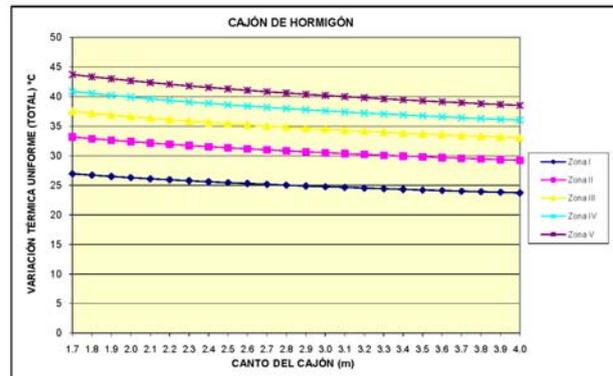
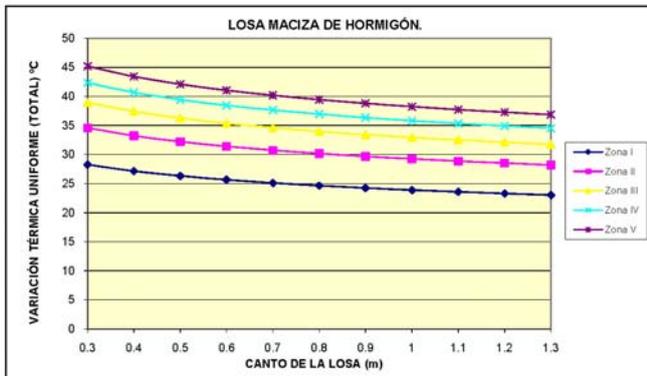
Tabla 2. Parámetros de la ecuación 2 según la IAP-98 [2].

Tipología tablero	k	a	b	c	h <sub>min</sub> (m)	h <sub>max</sub> (m)
Losa maciza de hormigón	23.89	0.292	-0.139	0	0.30	1.30
Losa aligerada de hormigón	24.91	0.292	-0.172	0	0.60	1.50
Cajón de hormigón	29.13	0.301	-0.148	0	1.70	4.00
Vigas de hormigón	26.90	0.300	-0.088	0.057	1.00	2.50
Cajón metálico	39.77	0.234	-0.069	0	1.50	4.50
Vigas metálicas	40.11	0.228	-0.072	0	2.00	6.00

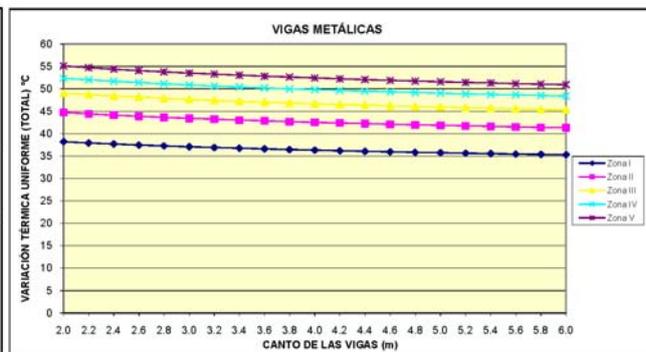
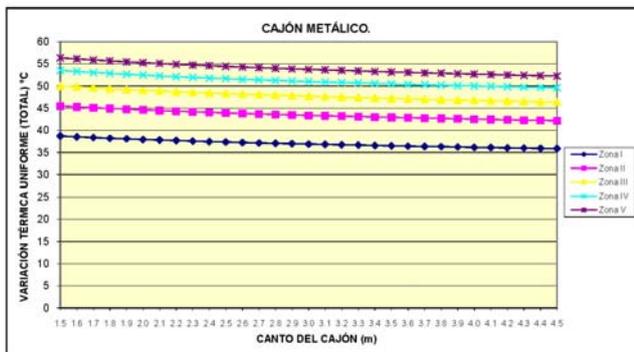
La variación uniforme de la temperatura no depende en la IAP-98 [2] por tanto, del pavimento en puentes de carretera ni del balasto en puentes de ferrocarril (IAPF-07 [3]).

Las figuras 2 a 5 representan la variación uniforme total de temperatura, según la IAP-98 [2], para losas macizas de hormigón (Fig. 2) cajones de hormigón (Fig. 4), cajones metálicos (Fig. 4) o vigas metálicas (Fig. 5). Se representa la temperatura en el eje de ordenadas y el canto en el eje de abscisas. Como se puede apreciar, los resultados de la formulación llevan a variaciones muy poco importantes entre diferentes tipologías del mismo material, lo cual podría cuestionar la necesidad de realizar esta diferenciación.

Es interesante remarcar cómo, independientemente de la zona de estudio, la IAP-98 [2] lleva a resultados de variación uniforme total de temperatura en secciones de acero (Figs. 4 y 5) mucho menores que el valor clásico de 70°C (± 35°C) obtenido según la antigua IAP-72 [1].



Figuras 2 y 3. Variación uniforme de temperatura en losas macizas y en cajones de hormigón.



Figuras 4 y 5. Variación uniforme de temperatura en cajones y vigas metálicas.

### 3.2. Elementos mixtos

Como ya se ha adelantado, aunque la IAP-98 [2] reformula las acciones térmicas en puentes de hormigón y metálicos, mantiene exactamente la misma formulación que la IAP-72 [1] para

elementos mixtos, lo cual implica unas variaciones térmicas en elementos mixtos, referidas a una temperatura de montaje de 15 °C de la tabla 1, independientemente de la zona de localización.

Esta formulación 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. Así, una sección mixta con muy poco hormigón se debería dilatar con la oscilación térmica del acero, o sea con casi +/-35 °C (variación térmica uniforme total de casi 70°C), valor mucho mayor que los que la propia IAP-98 [2] establece para secciones metálicas (Figs. 4 y 5) de entre 56°C (+/-28°C) y 36°C (+/-18°C). En cambio si una sección mixta tiene mucho hormigón y muy poco acero, se debería de dilatar y contraer con la variación térmica del hormigón  $\Delta T = \pm(20 - 0,75 \cdot \sqrt{e})^\circ C$ , valor que tampoco es muy parecido al que la IAP-98[2] define para losas de hormigón (Fig. 2).

#### 4. Componente uniforme de la temperatura en puentes según el Eurocódigo

A los efectos de la obtención de la componente uniforme de temperatura, el Eurocódigo (EN 1991-1-5) [4] define tres tipos de tableros: Tableros de acero (tipo 1), tableros mixtos (tipo 2) y tableros de hormigón (tipo 3).

La componente uniforme de la temperatura, se define en función de la temperatura mínima y máxima que el puente alcance. Los valores de las temperatura mínima  $T_{e,min}$  y máxima  $T_{e,max}$  del puente se obtienen del gráfico de la figura 6 partiendo de las temperaturas mínima  $T_{min}$  y máxima  $T_{max}$  del aire a la sombra en el lugar del emplazamiento del puente.

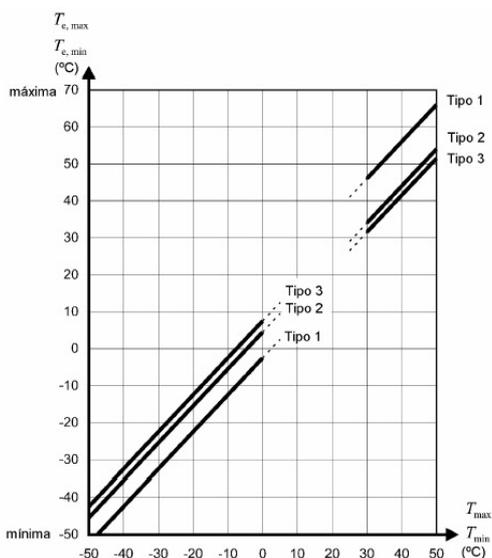


Figura 6. Relación entre la temp. del aire a la sombra ( $T_{min}/T_{max}$ ) y la temp. del puente ( $T_{e,min}/T_{e,max}$ )

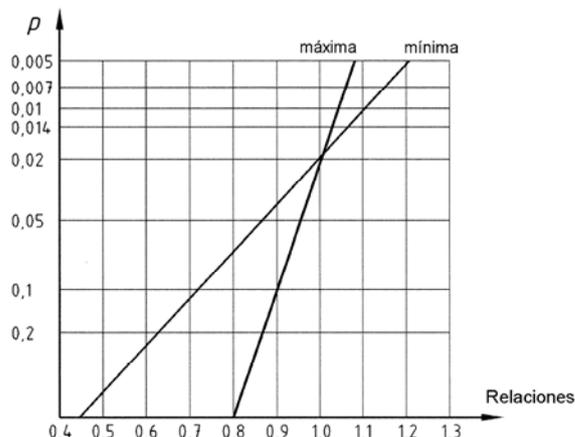


Figura 7. Relaciones  $T_{max,p}/T_{max}$  y  $T_{min,p}/T_{min}$

Los valores característicos  $T_{max}$  y  $T_{min}$  son para una probabilidad anual de ser excedidos de 0,02 (lo que equivale a un periodo de retorno de 50 años,  $T=1/p$ ). Para otras probabilidades anuales de ser excedidos estos valores diferentes de  $p=0,02$ , se deben de ajustar los valores de  $T_{max,p}$  y  $T_{min,p}$  según la figura 7. Para puentes, en general habrá que corregir los valores de  $T_{max}$  y  $T_{min}$ , para un periodo de retorno de  $T=100$  años, con lo que  $T_{max,(p=0.01)} = 1.038 \cdot T_{max}$  y  $T_{min,(p=0.01)} = 1.11 \cdot T_{min}$ .

EN-1991-1-5 [4] define como  $T_0$  la temperatura inicial del puente en el momento en que la estructura está coaccionada, y recomienda emplear para este valor, que es un parámetro

nacional, una temperatura de  $T_0=10^\circ\text{C}$ , valor que puede ser adecuado para los países del centro o norte de Europa, pero para España parece más recomendable tomar un valor de  $T_0=15^\circ\text{C}$ , como ya proponía la IAP-72 [1] y la IAP-98 [2].

Por tanto según Eurocódigo, los valores característicos de la máxima variación de contracción  $\Delta T_{N,con}$ , y de expansión  $\Delta T_{N,exp}$  de la componente uniforme de una temperatura del puente, son:

$$\Delta T_{N,con} = T_0 - T_{e,min} \quad (5)$$

$$\Delta T_{N,exp} = T_{max} - T_0 \quad (6)$$

Con lo cual, la variación total de la componente uniforme de la temperatura del puente es:

$$\Delta T_N = T_{e,max} - T_{e,min} \quad (7)$$

## 5. Comparación de la variación uniforme de temperatura entre Eurocódigo y la IAP-98.

Una vez descritas las formulaciones de las variaciones uniformes de temperatura según la IAP-72[1], IAP-98[2], y EN 1991-1-5 [4], en el presente apartado se resume la comparación de los resultados de la aplicación de la variación uniforme de temperatura en puentes de hormigón, de acero o mixtos siguiendo el Eurocódigo [4] y la IAP-98 [2], en diferentes ciudades Españolas. Esta comparación se realizará con más detalle y extensión en la ref. [5].

### 5.1. Resultados según EN-1991-1-5 [4]

Para poder obtener los valores de la variación total de la componente uniforme de la temperatura  $\Delta T_N$  (ec. 7), es necesario obtener los valores de las temperatura mínima  $T_{e,min}$  y máxima  $T_{e,max}$  del puente, que se obtienen, como ya se ha descrito, del gráfico de la figura 6 entrando con los valores característicos de las temperaturas mínima  $T_{min}$  y máxima  $T_{max}$  del aire a la sombra en el lugar del emplazamiento del puente, corregidos según la figura 7 para  $T=100$  años.

Los valores característicos de  $T_{min}$  y  $T_{max}$  del aire a la sombra en el lugar del emplazamiento del puente, se obtienen del anejo E del Código Técnico de la Edificación (CTE-2006) [6] (ver detalles en ref. [5]). Una vez calculados esos valores, corregidos según la figura 7, si se aplican la figura 6 se obtiene los resultados de las temperatura mínima  $T_{e,min}$  y máxima  $T_{e,max}$  del puente, así como los valores de la variación total de la componente uniforme de la temperatura  $\Delta T_N$  en función del tipo de tablero, según EN-1991-1-5 [4] (tabla 3).

Lo primero que se detecta de la figura 6, y de los resultados de la tabla 3, es que como es lógico, la variación total de la componente uniforme de la temperatura  $\Delta T_N$  en una sección mixta, tiene resultados sensiblemente menores que los de una sección metálica pura, y se aproximan bastante más a los de una sección de hormigón pura, como además así se ha demostrado de observaciones de la instrumentación de temperaturas en puentes mixtos (ver referencia [6]). Estos resultados son, en general, bastante consecuentes, con los que la antigua IAP-72[1] proponía para secciones metálicas puras con una variación térmica total de  $70^\circ\text{C}$ , aunque ligeramente superiores prácticamente en todos los casos. En cambio en secciones de hormigón, los resultados de EN-1991-1-5 [4] con valores de  $\Delta T_N$  entre 44 y  $59^\circ\text{C}$  son superiores a los resultados clásicos de IAP-72[1], con resultados en general entre 34 y  $38^\circ\text{C}$ .

Tabla 3.  $T_{e,min}$ ,  $T_{e,max}$ , y  $\Delta T_N$  ( $^{\circ}C$ ) para puentes de acero, mixtos, y de hormigón según EN-1991-1-5 [4]

Ciudad	Tipo 1: Acero			Tipo 2: Mixto			Tipo 3: Hormigón		
	$T_{e,min}$	$T_{e,max}$	$\Delta T_N$	$T_{e,min}$	$T_{e,max}$	$\Delta T_N$	$T_{e,min}$	$T_{e,max}$	$\Delta T_N$
Jaén	-14.6	68.9	<b>83.5</b>	-7.4	56.9	<b>64.3</b>	-4.6	54.5	<b>59.1</b>
Huelva	-9.1	66.9	<b>75.9</b>	-1.9	54.9	<b>56.7</b>	0.9	52.5	<b>51.5</b>
Sevilla	-9.1	66.9	<b>75.9</b>	-1.9	54.9	<b>56.7</b>	0.9	52.5	<b>51.5</b>
Córdoba	-10.2	66.9	<b>77.0</b>	-3.0	54.9	<b>57.8</b>	-0.2	52.5	<b>52.6</b>
Cáceres	-13.5	64.8	<b>78.3</b>	-6.3	52.8	<b>59.1</b>	-3.5	50.4	<b>53.9</b>
Badajoz	-11.3	64.8	<b>76.1</b>	-4.1	52.8	<b>56.9</b>	-1.3	50.4	<b>51.7</b>
C. Real	-15.7	64.8	<b>80.5</b>	-8.5	52.8	<b>61.3</b>	-5.7	50.4	<b>56.1</b>
Toledo	-15.7	64.8	<b>80.5</b>	-8.5	52.8	<b>61.3</b>	-5.7	50.4	<b>56.1</b>
Granada	-15.7	64.8	<b>80.5</b>	-8.5	52.8	<b>61.3</b>	-5.7	50.4	<b>56.1</b>
Málaga	-9.1	64.8	<b>73.8</b>	-1.9	52.8	<b>54.6</b>	0.9	50.4	<b>49.4</b>
Zaragoza	-16.8	64.8	<b>81.6</b>	-9.6	52.8	<b>62.4</b>	-6.8	50.4	<b>57.2</b>
Albacete	-20.2	62.7	<b>82.9</b>	-13.0	50.7	<b>63.7</b>	-10.2	48.3	<b>58.5</b>
Bilbao	-10.2	62.7	<b>72.9</b>	-3.0	50.7	<b>53.7</b>	-0.2	48.3	<b>48.5</b>
Orense	-12.4	62.7	<b>75.1</b>	-5.2	50.7	<b>55.9</b>	-2.4	48.3	<b>50.7</b>
Madrid	-16.8	60.6	<b>77.5</b>	-9.6	48.6	<b>58.3</b>	-6.8	46.2	<b>53.1</b>
Guadalajara	-16.8	60.6	<b>77.5</b>	-9.6	48.6	<b>58.3</b>	-6.8	46.2	<b>53.1</b>
Valladolid	-20.2	60.6	<b>80.8</b>	-13.0	48.6	<b>61.6</b>	-10.2	46.2	<b>56.4</b>
Salamanca	-20.2	60.6	<b>80.8</b>	-13.0	48.6	<b>61.6</b>	-10.2	46.2	<b>56.4</b>
Cuenca	-23.5	58.6	<b>82.0</b>	-16.3	46.6	<b>62.8</b>	-13.5	44.2	<b>57.6</b>
Segovia	-23.5	58.6	<b>82.0</b>	-16.3	46.6	<b>62.8</b>	-13.5	44.2	<b>57.6</b>
León	-23.5	58.6	<b>82.0</b>	-16.3	46.6	<b>62.8</b>	-13.5	44.2	<b>57.6</b>
Barcelona	-14.6	58.6	<b>73.2</b>	-7.4	46.6	<b>54.0</b>	-4.6	44.2	<b>48.8</b>
A Coruña	-10.2	57.5	<b>67.7</b>	-3.0	45.5	<b>48.5</b>	-0.2	43.1	<b>43.3</b>
Oviedo	-14.6	57.5	<b>72.1</b>	-7.4	45.5	<b>52.9</b>	-4.6	43.1	<b>47.7</b>

## 5.2. Resultados según IAP-98 [2]

En la tabla 4 se detallan los resultados del incremento uniforme de temperatura (diferencia entre máxima y mínima temperatura del puente) para puentes de hormigón y metálicos según IAP-98[2], para el caso de secciones con un canto mínimo, y un canto máximo (ver figuras 2 a 5).

Tabla 4.  $\Delta T$  ( $^{\circ}C$ ) para puentes de hormigón y puentes metálicos según IAP-98 [2].

Ciudad	Losa maciza Hormigón		Cajón Hormigón		Cajón Metálico		Vigas Metálicas	
	Canto mín.	Canto máx.	Canto mín.	Canto máx.	Canto mín.	Canto máx.	Canto mín.	Canto máx.
Jaén	45.2	36.9	43.7	38.5	56.4	52.2	55.1	50.9
Huelva	38.9	31.8	37.5	33.0	50.0	46.4	49.0	45.3
Sevilla	45.2	36.9	43.7	38.5	56.4	52.2	55.1	50.9
Córdoba	45.2	36.9	43.7	38.5	56.4	52.2	55.1	50.9
Cáceres	45.2	36.9	43.7	38.5	56.4	52.2	55.1	50.9
Badajoz	45.2	36.9	43.7	38.5	56.4	52.2	55.1	50.9
C. Real	45.2	36.9	43.7	38.5	56.4	52.2	55.1	50.9
Toledo	45.2	36.9	43.7	38.5	56.4	52.2	55.1	50.9
Granada	45.2	36.9	43.7	38.5	56.4	52.2	55.1	50.9

Málaga	38.9	31.8	37.5	33.0	50.0	46.4	49.0	45.3
Zaragoza	42.3	34.5	40.9	36.0	53.5	49.6	52.3	48.4
Albacete	45.2	36.9	43.7	38.5	56.4	52.2	55.1	50.9
Bilbao	28.2	23.0	26.9	23.7	38.7	35.9	38.2	35.3
Orense	34.6	28.2	33.2	29.2	45.5	42.2	44.7	41.3
Madrid	45.2	36.9	43.7	38.5	56.4	52.2	55.1	50.9
Guadalajara	45.2	36.9	43.7	38.5	56.4	52.2	55.1	50.9
Valladolid	42.3	34.5	40.9	36.0	53.5	49.6	52.3	48.4
Salamanca	42.3	34.5	40.9	36.0	53.5	49.6	52.3	48.4
Cuenca	45.2	36.9	43.7	38.5	56.4	52.2	55.1	50.9
Segovia	42.3	34.5	40.9	36.0	53.5	49.6	52.3	48.4
León	42.3	34.5	40.9	36.0	53.5	49.6	52.3	48.4
Barcelona	38.9	31.8	37.5	33.0	50.0	46.4	49.0	45.3
A Coruña	28.2	23.0	26.9	23.7	38.7	35.9	38.2	35.3
Oviedo	28.2	23.0	26.9	23.7	38.7	35.9	38.2	35.3

### 5.3. Conclusiones de la comparación Eurocódigo/IAP-98

Como ya se adelantó, los resultados de las variaciones uniformes de temperatura obtenidas según la IAP-98 [2] (ver tabla 4) para secciones de hormigón y metálicas son, en general, muy inferiores que los resultados obtenidos según Eurocódigo [4] (ver tabla 3).

Esta diferencia implica un incremento en la variación uniforme de temperatura en secciones de hormigón de entre 7 y 22°C, mientras que en secciones metálicas esta diferencia aumenta todavía más con resultados entre 19 y 37°C mayores si se calcula según el Eurocódigo [4] respecto de la IAP-98[2].

Algo similar sucede con las secciones mixtas. La IAP-98 [2] establece una variación uniforme de la temperatura de  $\pm(20-0,75\cdot\sqrt{e})^{\circ}\text{C}$  en el hormigón y de  $\pm 35^{\circ}\text{C}$  en el acero, lo cual implica para secciones mixtas normales, bien condicionadas, resultados de la variación uniforme de temperatura entre +/-19 y +/-23°C, o sea un total entre 38 a 46°C, que como se puede apreciar en la tabla 3, supone una variación uniforme de temperatura muy inferior que los resultados de aplicar el Eurocódigo [4] (con resultados entre 48 y 64°C) según las zonas.

## 6. Contraste de los resultados de la instrumentación de temperaturas en puentes reales con la formulación del Eurocódigo

P. Crespo ya realizó en la referencia [7] una comparación normativa de las acciones térmicas y el contraste con la instrumentación de temperaturas del puente atirantado sobre el río Iregua en Logroño, con conclusiones similares a las expuestas en este artículo. En este apartado se resumen los resultados de la instrumentación de varios puentes, comparando los resultados de la temperatura de la sección transversal con lo tipificado por el Eurocódigo [4].

### 6.1. Viaducto mixto Arroyo las Piedras.

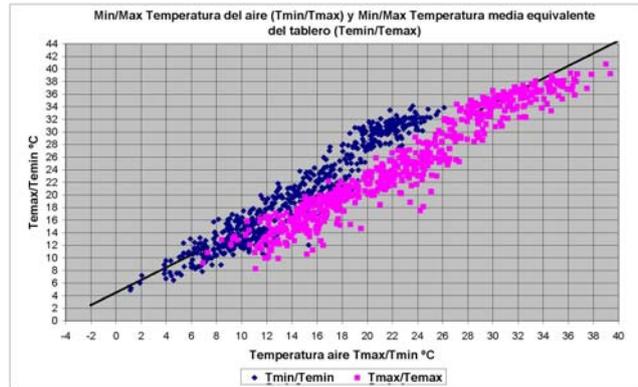
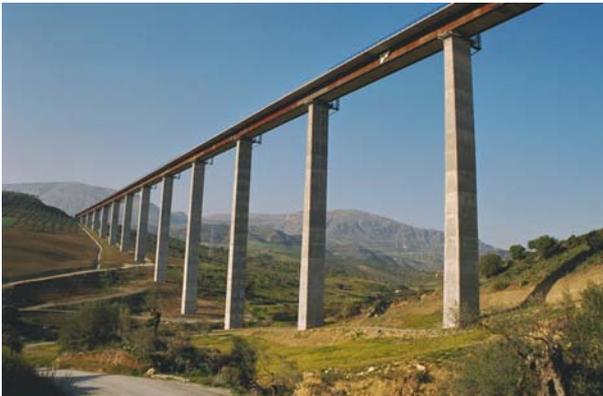
El viaducto mixto Arroyo las Piedras [8] tiene una longitud total de 1208,90 m y vanos tipo de 63,50 m (Fig. 8a). La referencia [9] describen en detalle los resultados de la instrumentación de temperaturas del tablero mixto del viaducto.

Para la zona donde se localiza el viaducto, los valores mínimos y máximos del aire a la sombra previsible, son de -8°C, y +46°C, lo cual implicaría 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 de  $\Delta T_N=+54,0^{\circ}\text{C}$ .

Los valores máximo y mínimo de la temperatura media equivalente de la sección mixta del tablero, obtenidos de la instrumentación a lo largo del período de casi dos años han sido:

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



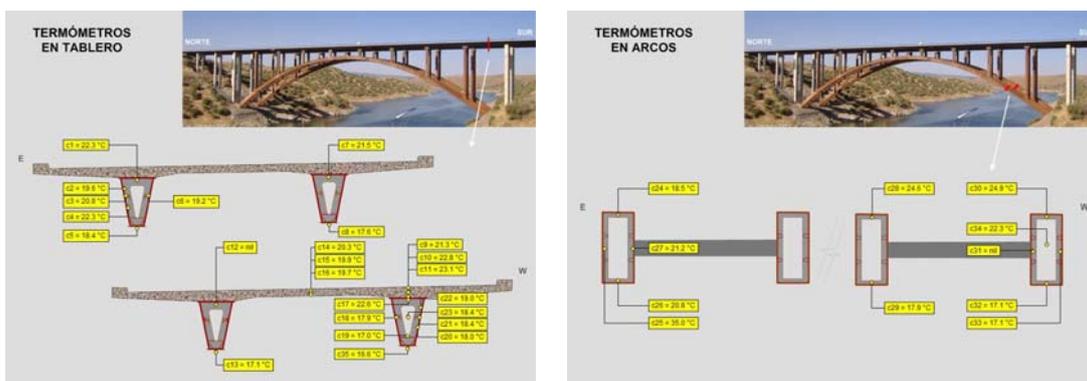
**Figuras 8a y 8b. Viaducto Arroyo las Piedras, y relación diaria de  $T_{max}/T_{min}$  y  $T_{e,max}/T_{e,min}$  en la sección mixta. Comparación con la propuesta de EN-1991-1-5 [4].**

El gráfico de la Figura 8b confirma lo adecuada de la formulación del Eurocódigo [4] para la obtención de 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.

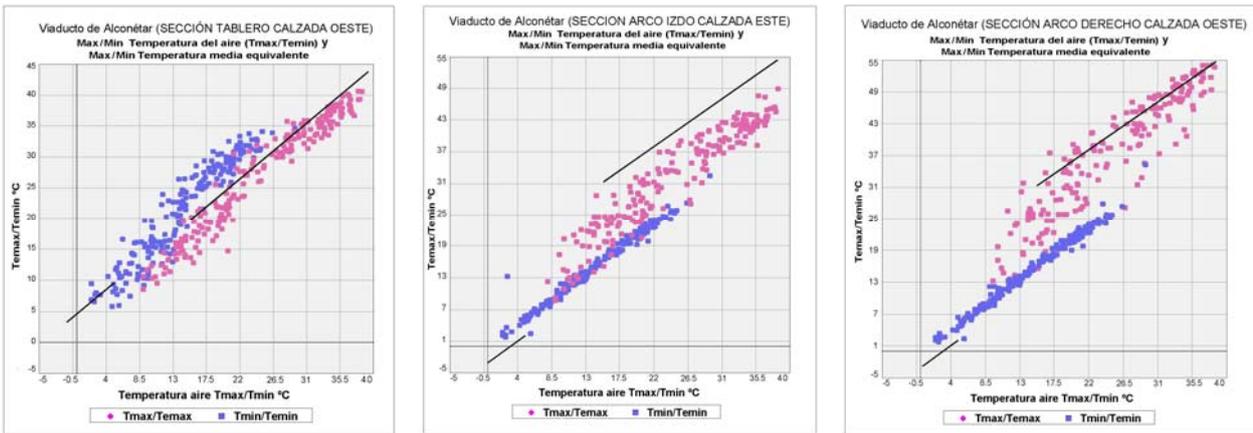
### 6.2. Viaducto de Alconetar sobre el río Tajo.

El viaducto doble de Alconetar, situado sobre el río Tajo en la cola del embalse de Alcántara en la A-66, es un arco metálico de 220 m de luz, con un tablero mixto. Las figuras 9a y 9b muestran los infogramas de la instrumentación de temperaturas del tablero y el arco (imágenes cortesía de Kinesia Ingeniería). Las figuras 10a, 10 b y 10c muestran los resultados de la comparación de los resultados diarios de la relación entre temperaturas ambientes (máxima y mínima) y las temperaturas medias equivalentes (máxima y mínima) de las secciones del tablero mixto y de dos de las secciones dobles de uno de los arcos, comparados con los resultados la formulación del Eurocódigo [4].

Se puede apreciar cómo de nuevo la formulación propuesta en el Eurocódigo [4] se adecua muy bien a los resultados obtenidos de la instrumentación.



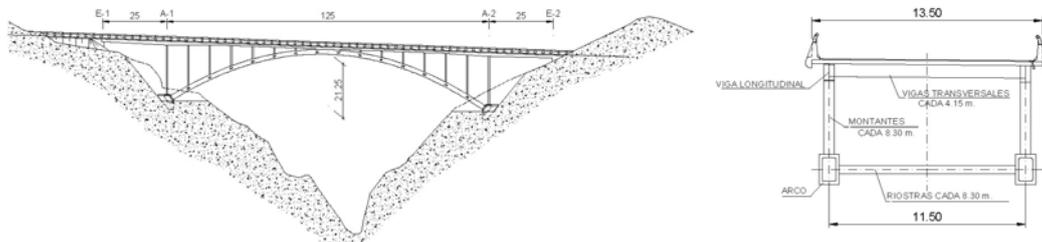
**Figuras 9a y 9b: Infogramas con instrumentación térmica del tablero y el arco del Viaducto.**



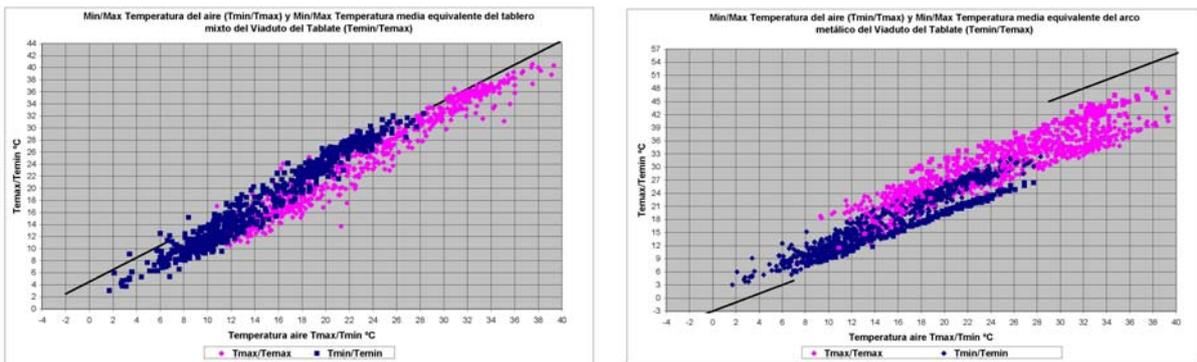
**Figuras 10a, 10b y 10c: Relación diaria de  $T_{max}/T_{min}$  y  $T_{e,max}/T_{e,min}$  para de la sección mixta del tablero del lado oeste, del arco izquierdo de la calzada este y del arco derecho de la calzada oeste.**

**6.3. Viaducto del Tablete II.**

El viaducto del Tablete II (Figs. 1a y 11b) en la A-44 entre Granada y Motril, es un arco metálico de 125 m de luz, con tablero mixto. Las figuras 12a, y 12b muestran los resultados de una comparación análoga a las de los viaductos 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 con la formulación del Eurocódigo [4], confirmando el mejor ajuste que con la formulación de la IAP-98.



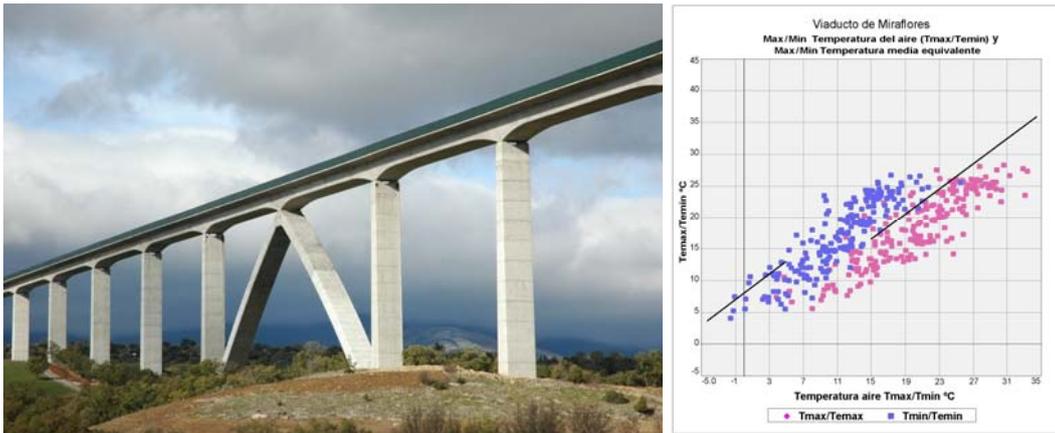
**Figuras 11a y 11b: Alzado y sección del Viaducto del Tablete II.**



**Figuras 12a y 12b: Relación diaria de  $T_{max}/T_{min}$  y  $T_{e,max}/T_{e,min}$  para de la sección mixta del tablero, y de la sección metálica del arco del Viaducto del Tablete II.**

**6.4. Viaducto Arroyo del Valle en Miraflores.**

El viaducto Arroyo del Valle (Fig. 13a), en la L.A.V. Madrid-Valladolid, es un cajón continuo de hormigón pretensado con vanos tipo de 66 m de luz. La figura 13b muestra, como con el resto de casos analizados, un buen ajuste de la respuesta térmica del tablero de hormigón con la formulación del Eurocódigo [4].



Figuras 13a y 13b: 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.

## 7. Conclusiones de los resultados de las instrumentaciones.

Como se ha comprobado del análisis normativo realizado, los resultados de las variaciones uniformes de temperatura obtenidas según la IAP-98 [2] son bastante inferiores que los resultados obtenidos según Eurocódigo [4], y pueden en muchos casos quedar del lado de la inseguridad. En general, la formulación del Eurocódigo [4] para la obtención de la variación uniforme de temperatura en un tablero, se adecúa bastante bien a los resultados obtenidos de la instrumentación de temperaturas analizada en puentes. En la referencia [10] se describe con más detalle el análisis de temperaturas de los Viaductos referidos en este artículo, y se amplía con otros casos.

## 8. Referencias

- [1] "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.
- [2] "Instrucción sobre las acciones a considerar en el proyecto de puentes de carretera". IAP-98. Ministerio de Fomento. Dirección General de Carreteras. 1998.
- [3] "Instrucción sobre las acciones a considerar en el proyecto de puentes de ferrocarril". IAPF-07. ORDEN FOM 3671/2007 de 24 de Septiembre. BOE 17 diciembre de 2007.
- [4] EN 1991-1-5: "Eurocode 1: Actions on structures. Part 1-5: General Actions-Thermal actions"
- [5] "Variación uniforme de la temperatura en puentes. Análisis normativo y comparación con los resultados de la instrumentación de tableros". *Hormigón y Acero*. ACHE.
- [6] "Seguridad Estructural: Bases de Cálculo y acciones en la Edificación". Libro 2. *Código Técnico de la Edificación (CTE)*. Ministerio de Vivienda. 2006.
- [7] CRESPO P. "Contraste experimental de las variaciones térmicas en puentes". *III Congreso de ACHE de Puentes y Estructuras. Volumen I de comunicaciones*. Nov. 2005. pp. 371-385.
- [8] MILLANES, F.; PASCUAL, J.; ORTEGA, M. "Viaducto Arroyo las Piedras. Primer viaducto mixto de las Líneas de Alta Velocidad Españolas". *Hormigón y Acero nº 243/07*. ACHE. Madrid 2007. pp. 5 38.
- [9] 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. Vol. 61. Nº 258*. Octubre-diciembre 2010. ACHE. Madrid 2010. pp. 81-97.
- [10] ORTEGA, M.; MILLANES, F.; MANSILLA, J.L. "Variación uniforme de la temperatura en puentes. Análisis normativo y comparación con los resultados de la instrumentación de tableros". *Hormigón y Acero*. (Pendiente de publicación).