

Acciones térmicas en tableros de puentes de vigas de hormigón

Enrique Mirambell
Antonio Aguado
Pedro Díez

Departamento Ingeniería de la Construcción
E.T.S. Ingenieros de Caminos. Barcelona

1. INTRODUCCION

Cabe señalar que el presente artículo pretende ser continuación de dos artículos ya publicados anteriormente en los números 163 y 165 de la revista "Hormigón y Acero", escritos por los dos primeros autores de este artículo y relativos al comportamiento de los puentes losa y los puentes cajón de hormigón frente a los efectos térmicos ambientales (Mirambell y Aguado (7), (8)). Por consiguiente, no se incidirá aquí en aspectos generales, ya desarrollados y expuestos en dichos artículos previos, como son el estudio de la influencia de algunos parámetros sobre la respuesta térmica de los puentes de vigas o el planteamiento de la metodología general de obtención de las acciones térmicas que se deben considerar, en el proyecto y construcción de los puentes de hormigón.

Sí se analizarán aquellos aspectos relativos a la propia geometría de los tableros de puentes de vigas y los relativos a las posibles modificaciones de las condiciones de contorno que hay que imponer para resolver la ecuación diferencial de transmisión del calor. En cualquier caso, el objetivo final que persigue el presente artículo es aportar una serie de pautas de actuación y de criterios, útiles para el proyectista de puentes, con el objeto de contemplar la acción térmica ambiental en el análisis y diseño de los puentes de vigas de hormigón de una forma simple, pero a la vez realista.

2. LA RESPUESTA TERMICA EN TABLEROS DE PUENTES DE VIGAS

De cara a analizar la respuesta térmica de los tableros de puentes de vigas, se ha adoptado, como sección transversal de referencia, la mostrada en la figura 1.a. Dicha sección transversal correspondería al caso genérico de un puente de carretera, con un ancho de tablero aproximado de 12,0 metros y con una luz de vano de 30,0 metros, aproximadamente. El número de vigas del tablero es cinco, adoptándose para las mismas un canto de 1,50 metros. Sobre dichas vigas se hormigona in situ una losa de reparto de hormigón, de 0,20 metros de espesor. Por otra parte, en la tipología transversal adoptada se ha supuesto que no existe vuelo de la losa o acera sobre el borde del ala superior de la viga extrema.

En la figura 1.b se muestra la geometría de la sección transversal contemplada en el modelo numérico de análisis térmico del tablero de vigas. Como puede observarse, la sección transversal de las vigas ha sido simplificada de cara a llevar el análisis, pero manteniendo, de forma muy aproximada, los valores de las características mecánicas y resistentes —área, momentos de inercia, canto y posición relativa del centro de gravedad—. Asimismo, también se presenta la malla de discretización utilizada en los estudios numéricos, necesarios para poder conocer la evolución en el tiempo de la distribución de temperaturas a través de la sección transversal del tablero.

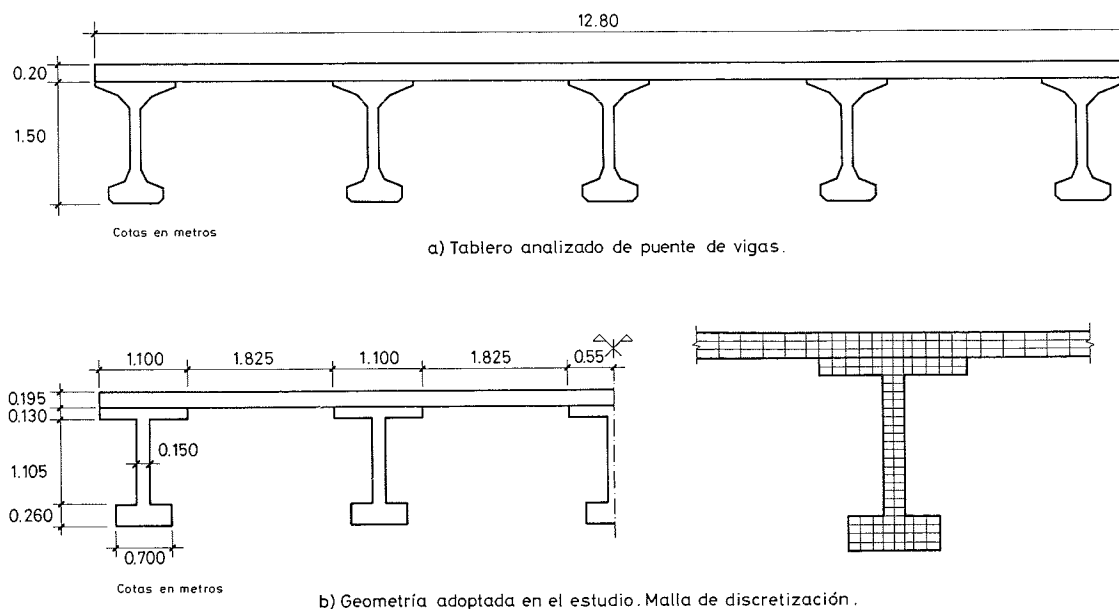


Fig. 1. Sección transversal de referencia, del tablero de vigas. Geometría de la sección analizada y malla de discretización

Por otra parte, en la tabla 1 se presentan los valores de las propiedades térmicas y estructurales del hormigón, y del asfalto si existiera capa asfáltica de rodadura, adoptados en el estudio de referencia.

Tabla 1
Valores, de las propiedades térmicas y estructurales, adoptados en el presente estudio

Propiedad	Hormigón	Asfalto
Conductividad (W/m °C)	1,5	0,83
Calor específico (J/kg °C)	960,0	880,0
Densidad (kg/m ³)	2.400,0	2.200,0
Factor de absorción solar	0,5	0,9
Emisividad	0,88	0,92
Coefficiente dilatación térmica (°C ⁻¹)	10x10 ⁻⁶	—
Módulo de elasticidad (Kp/cm ²)	300.000,0	—

El modelo numérico empleado en este estudio se basa en un esquema bidimensional en diferencias finitas correspondiente al método explícito de resolución de ecuaciones diferenciales en derivadas parciales. La descripción general del modelo y programa desarrollados para las tipologías transversales de puentes losa y puentes cajón, así como aquellos aspectos que conciernen a la convergencia y estabilidad numéricas, pueden encontrarse en la bibliografía referenciada (Mirambell y Aguado (9), (10)). La consideración de la tipología transversal

de tableros de vigas, en el modelo de análisis térmico, conlleva el resolver explícitamente la ecuación en diferencias finitas para todos aquellos nodos situados entre vigas. No aparecen diferencias notables en dicha ecuación explícita, salvo en el valor que hay que adoptar para el coeficiente de transferencia de calor por convección en los paramentos situados entre vigas.

De la bibliografía consultada no se desprende ninguna conclusión respecto al valor de dicho coeficiente. No obstante, en una primera aproximación, parece idóneo adoptar un valor medio entre el coeficiente de transferencia de calor por convección, suponiendo velocidad del viento nula, y el coeficiente de transferencia de calor por convección para paramentos exteriores laterales, adoptando como velocidad del viento la existente en el lugar de emplazamiento.

Expuestas de forma esquemática las bases de cálculo de partida para abordar el análisis térmico, se presentan a continuación los resultados correspondientes al tablero de vigas con la sección transversal de la figura 1.b. Dicho tablero se ubica en tres lugares de emplazamiento de la geografía peninsular —Madrid, Barcelona y Sevilla— y las condiciones climáticas y ambientales supuestas en el análisis son tales que, para los tres emplazamientos, se alcanza el gradiente térmico vertical de diseño del tablero. Un análisis comparativo de los resultados obtenidos, los cuales se muestran en la figura 2, permite visualizar la influencia de determinados parámetros climáticos sobre la respuesta térmica de los tableros de puentes de vigas.

En la figura 2.a se presentan las distribuciones de temperaturas según el eje vertical de simetría

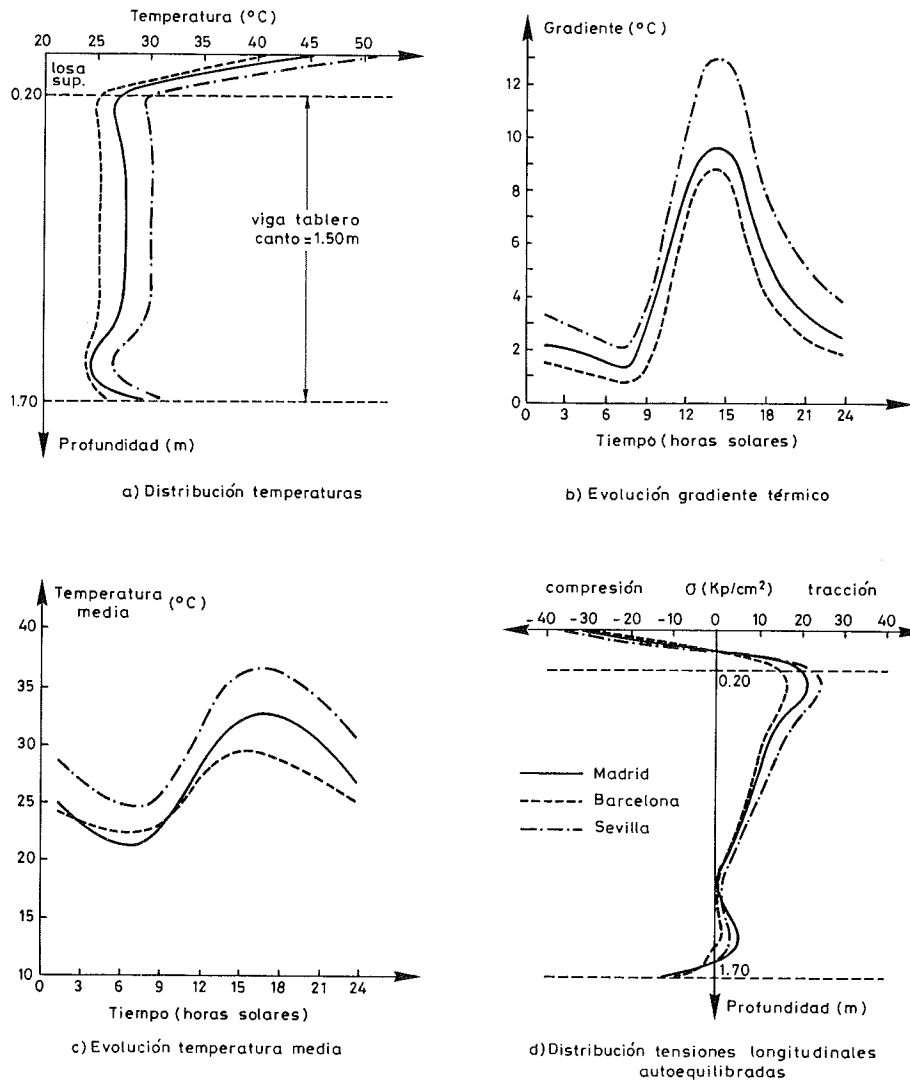


Fig. 2. Resultados derivados de los análisis térmicos llevados a cabo para un tablero de puente de vigas emplazado en Madrid, Barcelona y Sevilla.

del tablero, correspondientes al instante en el que se alcanza el máximo gradiente térmico vertical para los distintos lugares de emplazamiento. De la observación de las gráficas se desprende que cuanto mayor es la radiación solar y menor es la velocidad de viento en el lugar de emplazamiento —Sevilla— mayor es la temperatura en la fibra superior. Asimismo, se observa que la no linealidad de la distribución de temperaturas se concentra, fundamentalmente, en los 20 centímetros superiores de la sección transversal, es decir, en la losa de reparto. Ello es resultado directo de la influencia de la radiación solar incidente sobre el tablero del puente. Por otra parte, en la zona central de la viga, la temperatura se mantiene constante, con un valor ligeramente superior a la temperatura ambiente media diaria.

Las figuras 2.b y 2.c muestran las evoluciones diarias del gradiente térmico vertical y de la tempe-

ratura media de la sección transversal del tablero, respectivamente. Puede apreciarse que, al igual que ocurría para las tipologías transversales de puentes losa y puentes cajón, el gradiente térmico vertical máximo y el rango de variación de dicha acción térmica son más elevados en el emplazamiento de Sevilla. Asimismo, como podía esperarse, la temperatura media del tablero en este emplazamiento es claramente superior a las correspondientes a los emplazamientos de Barcelona y Madrid.

Como se ha visto con anterioridad, las distribuciones de temperaturas a través del tablero son claramente no lineales. Adoptando la hipótesis de Navier-Bernouilli, dicha no linealidad induce tensiones longitudinales y transversales autoequilibradas en la sección transversal, las cuales son independientes de las condiciones de apoyo de la estructura. Las distribuciones de tensiones longitudi-

nales pueden obtenerse a través de la siguiente expresión:

$$\sigma(x,y) = E [\epsilon_o + \psi_{xy} + \psi_y x - \alpha T(x,y)_{n\ell}] \quad (1)$$

en donde

$$\epsilon_o = \frac{\alpha}{A} \iint T(x,y)_{n\ell} dx dy \quad (2)$$

$$\psi_x = \frac{\alpha}{I_x} \iint T(x,y)_{n\ell} y dx dy \quad (3)$$

$$\psi_y = \frac{\alpha}{I_y} \iint T(x,y)_{n\ell} x dx dy \quad (4)$$

En estas ecuaciones, α es el coeficiente de dilatación térmica del hormigón, A es el área de la sección transversal, I_x e I_y son los momentos principales de inercia, y ϵ_o , ψ_x y ψ_y son la elongación y las curvaturas térmicas impuestas, inducidas por la distribución no lineal de temperaturas $T(x,y)_{n\ell}$.

La figura 2.d muestra, para el día analizado y para los tres emplazamientos, las distribuciones de tensiones longitudinales autoequilibradas según el eje de simetría del tablero. Dichas distribuciones corresponden al instante del día para el cual se genera la máxima tensión longitudinal de tracción en el hormigón. Para los tres casos analizados, tal instante se encuentra muy próximo al instante en que se alcanza el máximo gradiente térmico vertical. En dicha figura puede observarse que, debido a que la no linealidad de la distribución de temperaturas es más acusada para el caso del tablero empleado en la ciudad de Sevilla, la magnitud de las tensiones longitudinales autoequilibradas, tanto de compresión como de tracción, es superior a la de los otros dos casos contemplados en el estudio. Cabe señalar que, para otros instantes del día, comprendidos aproximadamente entre las 2:00 horas solares y las 5:00 horas solares, las fibras solicitadas a tracción son las fibras superiores e inferiores del tablero, mientras que las fibras intermedias se ven sometidas a compresión.

En cualquier caso, de este estudio y de otros referenciados en la bibliografía [Mirambel (6), Priestley y Buckle (13), Imbsen et al. (2)], se desprende que los parámetros analizados que influyen en la respuesta térmica y tensional de los puentes de vigas actúan en el mismo sentido en el que lo hacen en puentes losa maciza, pudiendo despreciarse, en la mayoría de los casos, el efecto de la posible radiación solar lateral, incidente sobre la viga extrema del tablero.

3. ACCIONES TÉRMICAS DE DISEÑO EN PUENTES DE VIGAS

La metodología de obtención de las acciones térmicas de diseño en puentes de vigas es idéntica a la ya utilizada para la tipología de puentes losa [Mirambell y Aguado (7)] y puentes cajón [Mirambell y Aguado (8)].

Para la determinación de las acciones térmicas

de diseño se hace necesario conocer datos relativos a diversos parámetros climáticos existentes en hipotéticos lugares de emplazamiento (estaciones meteorológicas principales del país). Tal información puede extraerse de las diferentes publicaciones del Instituto Nacional de Meteorología, contemplándose 58 estaciones, las cuales cubren nuestra geografía peninsular y la diversidad de climas [Instituto Nacional de Meteorología (3), (4), (5)].

El procedimiento o la metodología seguida en el estudio, ha sido la de adoptar una sección transversal de referencia de un tablero genérico de vigas, realizándose diferentes análisis térmicos de puentes de vigas con la misma sección transversal de referencia, pero ubicados en los diferentes emplazamientos (58) de la geografía peninsular. Dicha sección transversal de referencia es la presentada en la figura 1 del presente artículo.

Con posterioridad, los resultados derivados de los análisis térmicos, en lo que se refiere a los valores de las acciones térmicas que hay que considerar en diseño, se ven corregidos en base a la determinación de factores de corrección que contemplan la influencia de diversos parámetros sobre la respuesta térmica de los puentes de vigas, y que no han sido considerados, de forma implícita, en los estudios previos.

De cara a la determinación de los factores correctores, se hace necesario realizar numerosos análisis térmicos que pueden conllevar, a su vez, cambios en la geometría de la tipología transversal del tablero. Así, en particular, una reducción del canto de las vigas puede traducirse en un cambio del número de vigas que se deben disponer en el tablero y, por consiguiente, de la distancia entre ejes de vigas contiguas. La casuística existente sería muy extensa y la interpretación de resultados sería ciertamente farragosa, debido a que los parámetros de diseño de la geometría de la sección transversal de un tablero de vigas están claramente interrelacionados. Debido a ello, para la determinación de los factores correctores, se ha optado por realizar los análisis térmicos sobre una viga exenta —viga central del tablero— facilitándose así el análisis paramétrico y la interpretación de resultados.

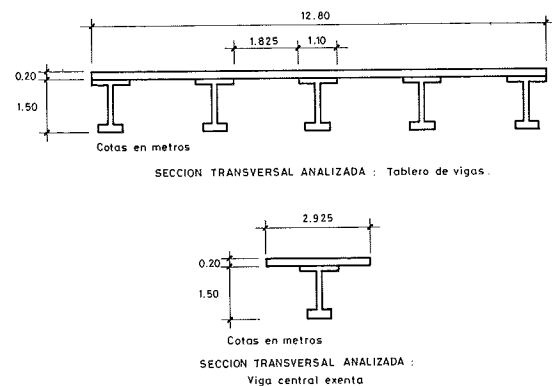


Fig. 3. Tablero de vigas analizado, obteniendo su respuesta térmica a través de la consideración de la viga central, como exenta.

Para corroborar dicha forma de actuar, se ha obtenida la respuesta térmica de un tablero genérico de vigas como el de la figura 1 y la respuesta térmica de la viga central de dicho tablero, adoptando un ancho de losa superior, igual a la distancia interjez correspondiente al tablero (figura 3).

Para ambos análisis térmicos, la malla de discretización, las condiciones de emplazamiento y las condiciones climatológicas y ambientales son idénticas (emplazamiento en Tarifa, bajo unas condiciones climáticas de verano y con una velocidad de viento distinta y superior a la existente en los emplazamientos considerados con anterioridad). En la figura 4 se presentan los resultados derivados de ambos análisis térmicos, relativos a la evolución del gradiente térmico y del incremento uniforme de la temperatura media con respecto a la temperatura inicial de partida.

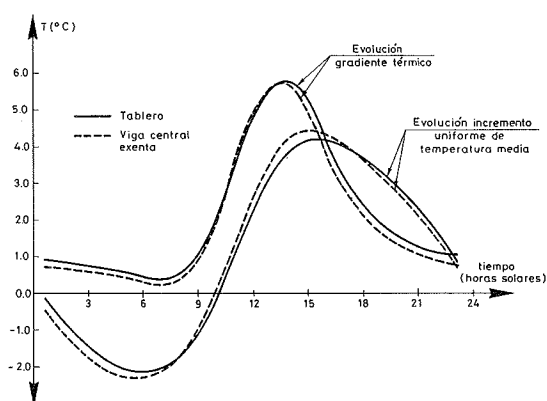


Fig. 4. Resultados derivados del análisis térmico, como tablero de vigas y como viga central exenta.

Como puede apreciarse en dicha figura, las diferencias son muy poco significativas. El máximo gradiente térmico vertical que solicita el tablero de vigas es $5,7^{\circ}\text{C}$ y tiene lugar a las 13,60 horas solares, mientras que en el caso de la viga central exenta, representativa del tablero en su conjunto, el gradiente máximo es también $5,7^{\circ}\text{C}$ y aparece para el mismo instante del día analizado. En cuanto al incremento uniforme de la temperatura media de las dos secciones transversales analizadas, el máximo de dicha función, para el caso del tablero, es $4,3^{\circ}\text{C}$ a las 15,40 horas solares, mientras que para la viga exenta es $4,5^{\circ}\text{C}$, a las 15,10 horas solares.

Por otra parte, en lo que se refiere a las distribuciones de tensiones longitudinales autoequilibradas, inducidas por la no linealidad de la distribución de temperaturas, la tensión máxima de tracción a lo largo de todo el período de tiempo analizado, tiene lugar en el mismo nodo de la malla de discretización, para los dos análisis térmicos llevados a cabo. Dicho nodo se encuentra sobre el eje de simetría de ambas secciones transversales y a una profundidad, con respecto a la fibra superior del tablero, de 0,26 metros (dicho nodo es el cen-

tro geométrico del ala superior de la viga). Para el caso del tablero, dicha tracción máxima es de $13,30 \text{ Kp/cm}^2$ a las 13,60 horas solares, mientras que para la viga exenta es de $13,60 \text{ Kp/cm}^2$, también a las 13,60 horas solares. A la vista de los resultados obtenidos, se desprende que el análisis térmico de un tablero de vigas puede afrontarse adoptando la hipótesis de flujo bidireccional y analizando una única viga con la porción de losa superior de hormigón que le corresponda. Lógicamente, en el caso de que las vigas contiguas se encuentren en íntimo contacto creándose volúmenes cerrados, la sección transversal, desde un punto de vista térmico, se comportará como una sección losa aligerada.

3.1. Rango anual de la temperatura media del tablero

3.1.1. Rango de referencia

El rango anual de la temperatura media del tablero, viene definido por la diferencia entre la temperatura media máxima y la temperatura media mínima del puente, a lo largo del año, en el lugar de emplazamiento considerado, y depende fundamentalmente del rango anual de la temperatura ambiente existente en dicho lugar de emplazamiento. Las temperaturas ambiente adoptadas en los diferentes emplazamientos, correspondientes a cada una de las estaciones meteorológicas contempladas en el estudio, pueden encontrarse en Mirambell (6). Los resultados obtenidos para el rango anual de la temperatura media del puente de vigas analizado, se presentan de forma gráfica en la figura 5. Conviene puntualizar que la sección transversal adoptada en el estudio de determinación del rango de referencia es la sección presentada en la figura 1 del presente artículo y que los valores adoptados de las propiedades físicas y térmicas son los recogidos en la tabla 1.

En el mapa de isótermas de dicha figura se aprecian, al igual que ocurriría en las tipologías de tableros de puentes losa y puentes cajón, cuatro regiones claramente diferenciadas:

- Las vertientes cantábrica y atlántica.
- La zona sur.
- El levante.
- La meseta.

Los rangos más elevados de la temperatura media del puente se presentan en la zona de la meseta, siendo las ciudades de Albacete y Ciudad Real las que muestran el valor máximo absoluto de $44,4^{\circ}\text{C}$. Los valores de las isótermas disminuyen a medida que nos acercamos al litoral peninsular, encontrándose los mínimos en las vertientes atlántica y cantábrica –Finisterre, $21,0^{\circ}\text{C}$, La Coruña, $22,1^{\circ}\text{C}$, Santander, $21,4^{\circ}\text{C}$ –.

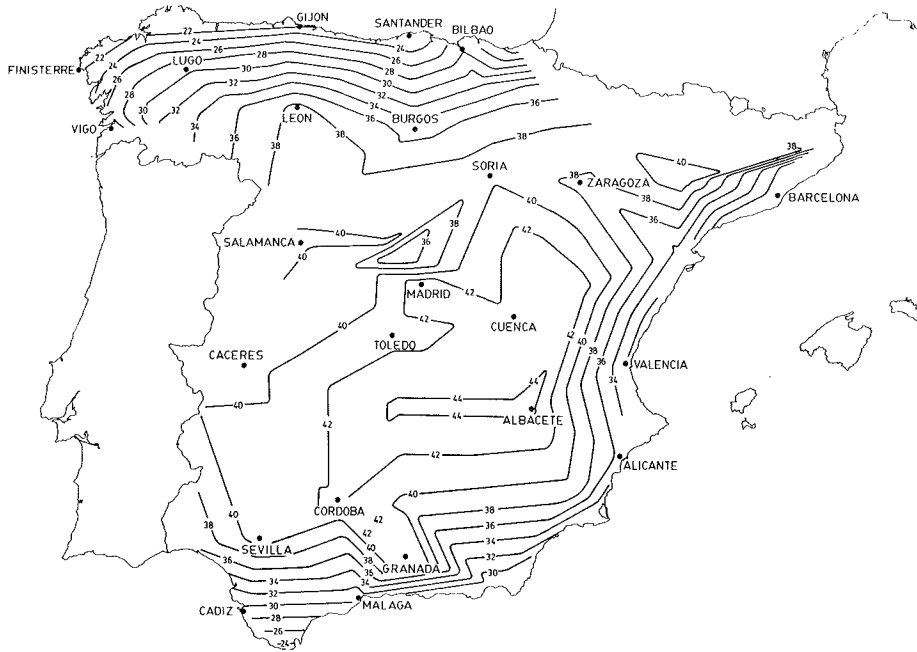


Fig. 5. Mapa peninsular de isótermas para la obtención del rango anual de referencia de la temperatura media en tableros de puentes de vigas.

3.1.2. Factores de corrección

Del conjunto de variables no contempladas en el análisis de forma intrínseca, se analizará la influencia del canto del tablero, o lo que es lo mismo, el canto de la viga, puesto que se adopta un espesor constante de la losa superior, de 0,20 metros; también se analizará la influencia del ancho de la losa de hormigón, o lo que es lo mismo, la distancia entre ejes de vigas. Los restantes parámetros no influyen de forma significativa sobre la magnitud del rango anual de la temperatura media del tablero.

Los estudios paramétricos se han llevado a cabo para vigas con cantos de 1,0 m, 1,5 m, 2,0 m y 2,5 metros. La variación de dicho canto conlleva la variación de anchos de alas y espesores de ala y alma, y ello se ha hecho de acuerdo con catálogos de empresas dedicadas a la prefabricación de vigas de hormigón pretensado para tableros de puentes. Asimismo, para cada uno de los cantos adoptados, los cuales cubren, de forma amplia, las posibles luces de vano que hay que salvar, se ha variado el ancho de porción de losa superior correspondiente a la distancia entre ejes de vigas. Los valores adoptados para el estudio paramétrico han sido 2,0 m, 2,5 m, 3,0 m y 3,50 metros. La combinación de los valores adoptados por el canto y el ancho de losa superior, da lugar a una serie de vigas exentas que se deben analizar, las cuales se ubican en 20 de las 58 estaciones meteorológicas principales del país. El postproceso de los 340 análisis térmicos llevados a cabo, permite definir el valor del factor

de corrección $k_{\Delta T}$, necesario para determinar el rango anual de la temperatura media del tablero de vigas.

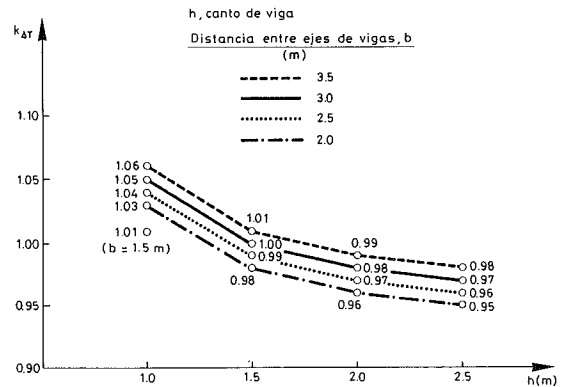


Fig. 6. Valores del coeficiente corrector $k_{\Delta T}$ para la obtención del rango anual de diseño de la temperatura media en puentes de vigas.

De los resultados obtenidos se desprende que cuanto menor sea el canto de la viga, y mayor sea la distancia entre ejes de vigas del tablero, mayor será el rango anual de la temperatura media del puente de vigas.

3.1.3. Método de obtención

El método que se debe seguir de cara a la obtención del rango anual de la temperatura media de un puente de vigas es el siguiente:

– Situación del lugar de emplazamiento del puente.

– Obtención, para dicho lugar, del rango anual de referencia de la temperatura media del puente, en base a lo representado en el mapa peninsular de isóneas de la figura 5.

– Obtención del factor de corrección $k_{\Delta T}$, relativo al canto del tablero y a la distancia entre ejes de vigas, a partir de las gráficas mostradas en la figura 6.

– El rango anual de la temperatura media del tablero que hay que considerar en diseño es:

$$\Delta T = k_{\Delta T} \cdot \Delta T_{\text{referencia}} \quad (5)$$

3.1.4. Valores de diseño del rango anual de la temperatura media de tableros de vigas, atendiendo a la división de la Península Ibérica en grandes regiones climáticas

Como se ha comentado con anterioridad, el factor climático que influye de forma determinante en el valor del rango anual de la temperatura media del tablero es el rango anual de la temperatura ambiente en el lugar de emplazamiento del puente.

En base a los valores del rango anual de la temperatura media del tablero mostrados en el mapa de isóneas de la figura 5 y a los valores del factor corrector en función del canto del tablero y del ancho de la losa superior, y atendiendo a la división de la Península Ibérica en regiones climáticas, tal como se expone en las publicaciones del Instituto Nacional de Meteorología, es posible definir una serie de valores de diseño del rango anual de la

temperatura media para tableros de puentes de vigas ubicados a lo largo y ancho de la geografía española peninsular. En la tabla 2 y en la figura 7 se definen las diferentes regiones climáticas y el valor de diseño del rango anual de referencia para cada una de dichas regiones climáticas (dicho valor del rango de referencia se ha obtenido para la sección transversal de tablero de la figura 1 del presente artículo).

TABLA 2

Regiones climáticas de la Península Ibérica

Región Climática	Zona
Zona litoral norte del Cantábrico y de Galicia	I
Zona prelitoral norte del Cantábrico y de Galicia	II
Zona pirenaica	III
Zona centro septentrional, meseta norte y depresión del Ebro	IV
Zona centro meridional y meseta sur	V
Zona nordeste	VI
Levante y Baleares	VII
Zona sudeste	VIII
Zona litoral sur	IX

Considerando ahora los valores del factor de corrección que contempla la influencia del canto de la viga y del ancho de losa superior, se ha confeccionado una tabla de valores de diseño del rango anual de la temperatura media del tablero de vigas, en función de los dos parámetros geométricos anteriores y en función de la zona climática de la Península Ibérica en donde se encuentre emplazado el puente.

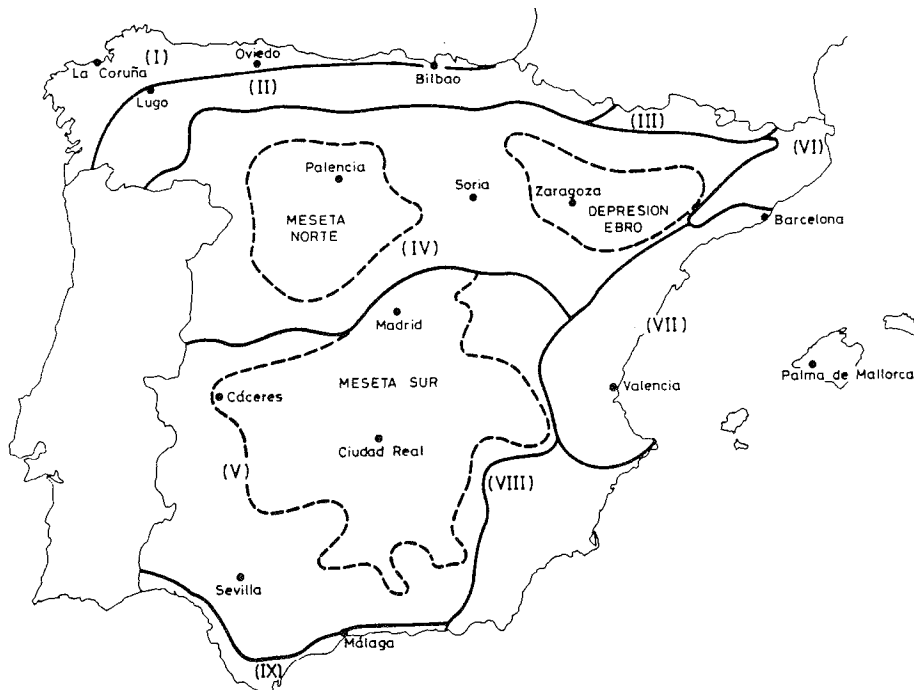


Fig. 7. Mapa de las diferentes regiones climáticas de la Península Ibérica.

TABLA 3

Rangos anuales de diseño de la temperatura media del tablero, para puentes de vigas emplazados en la Península Ibérica

Rango anual de la temperatura media del tablero, para puentes de vigas (°C)						
Zona climática	Canto (m)	Distancia entre ejes de vigas (m)				
		1,5	2,0	2,5	3,0	3,5
I y III	1,0	28,3	28,8	29,1	29,4	29,7
	1,5	—	27,4	27,7	28,0	28,6
	2,0	—	26,9	27,2	27,4	27,7
	2,5	—	26,6	26,9	27,2	27,4
II	1,0	32,3	33,0	33,3	33,6	33,9
	1,5	—	31,4	31,7	32,0	32,6
	2,0	—	30,7	31,0	31,4	31,7
	2,5	—	30,4	30,7	31,0	31,4
VI, VII VIII y IX	1,0	39,4	40,2	40,6	41,0	41,3
	1,5	—	38,2	38,6	39,0	39,8
	2,0	—	37,4	37,8	38,2	38,6
	2,5	—	37,1	37,4	37,8	38,2
IV	1,0	41,4	42,2	42,6	43,1	43,5
	1,5	—	40,2	40,6	41,0	41,8
	2,0	—	39,4	39,8	40,2	40,6
	2,5	—	39,0	39,4	39,8	40,2
V	1,0	45,5	46,4	46,8	47,3	47,7
	1,5	—	44,1	44,6	45,0	45,9
	2,0	—	43,2	43,7	44,1	44,6
	2,5	—	42,8	43,2	43,7	44,1

Dichos valores de diseño corresponden a los valores máximos obtenidos para emplazamientos del puente en alguna de las estaciones meteorológicas de las distintas regiones climáticas y, por lo tanto, son valores que quedan del lado de la seguridad. Debe señalarse que tales rangos atienden a las diferentes características ambientales y climatológicas del lugar de emplazamiento del puente —rangos anual y diario de la temperatura ambiente, intensidad de radiación solar, velocidad de viento—.

3.2. Gradiente térmico vertical positivo

3.2.1. Gradiente de referencia

La determinación del valor de diseño de dicha acción térmica depende, fundamentalmente, de la radiación solar global media mensual máxima existente en el lugar de emplazamiento del puente, a lo largo del año. Los valores de radiación adoptados en este estudio pueden encontrarse en Mirambell (6). Los resultados obtenidos para el gradiente térmico de referencia (sección transversal de referen-

cia, la presentada en la figura 1 del presente artículo) se muestran, de forma gráfica, en el mapa peninsular de isolíneas de la figura 8.

En esta figura puede observarse que, al igual que ocurría en puentes losa y puentes cajón, la zona geográfica en donde los gradientes térmicos de diseño son más elevados es la cuenca del río Guadalquivir —gradientes en torno a los 13°C—. Las zonas de mínimos se sitúan próximas al litoral, y en particular, al litoral gallego —gradientes en torno a los 6°C—.

3.2.2 Factores de corrección

En lo referente a los parámetros geométricos de la sección transversal de un tablero genérico de vigas, se tendrá en cuenta, tanto la influencia del canto de la viga, como la influencia del ancho de losa superior de hormigón, o lo que es lo mismo, la distancia entre ejes de vigas del tablero. Los diferentes valores adoptados por ambos parámetros geométricos son los mismos que los utilizados en la obtención del factor corrector para la determina-

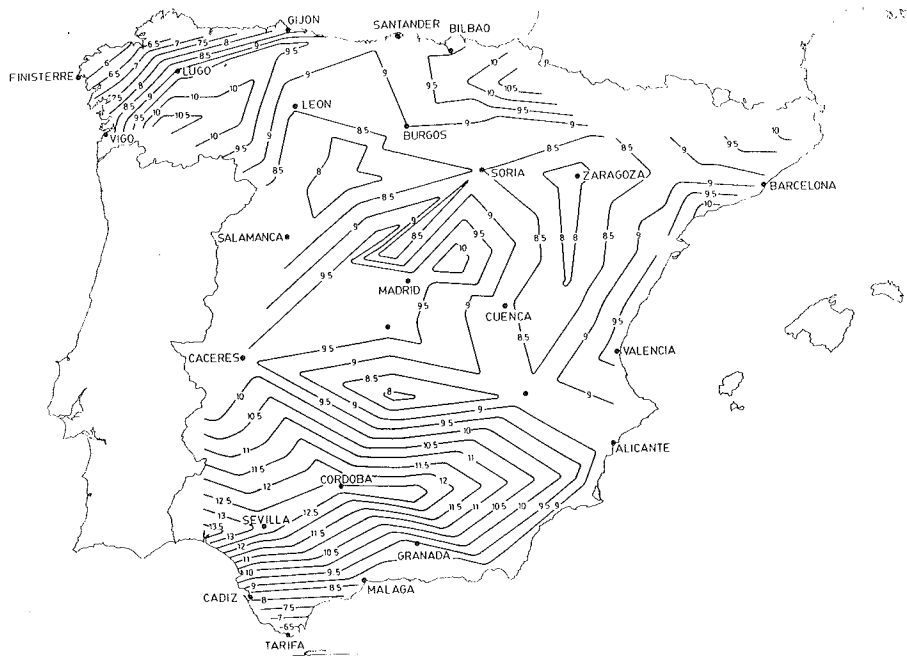


Fig. 8. Mapa peninsular de aislíneas para la obtención del gradiente térmico de referencia en tableros de puentes de vigas.

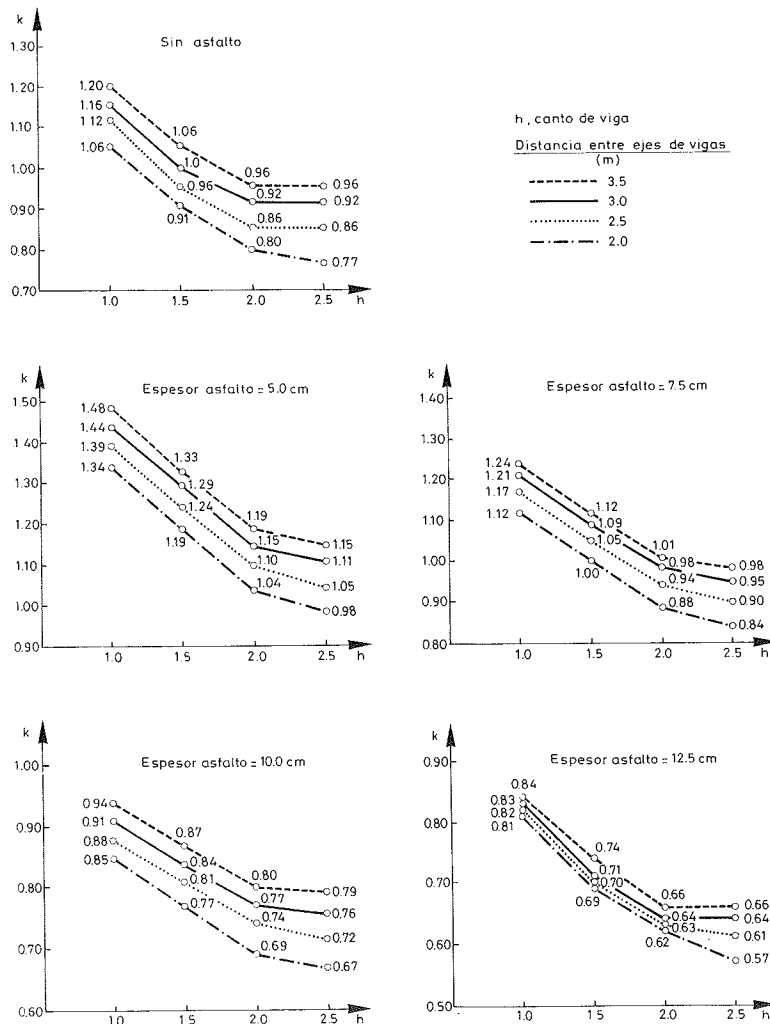


Fig. 9. Valores del coeficiente corrector k_{GRAD} para la obtención del gradiente térmico de diseño en puentes de vigas.

ción del rango anual de la temperatura media del tablero.

Del resto de parámetros que influyen en la respuesta térmica de puentes de hormigón, únicamente el espesor de capa asfáltica de rodadura afecta de forma significativa al valor del gradiente térmico de diseño. En el presente estudio, los valores adoptados para el espesor de capa asfáltica son 5,0 cm, 7,5 cm, 10,0 cm y 12,5 cm. La combinación de los valores de los diferentes parámetros contemplados da lugar a la realización de 80 análisis térmicos para cada lugar de emplazamiento considerado —estación meteorológica—. De cara a la definición del factor de corrección, se han considerado 20 emplazamientos de los 58 contemplados en el estudio de referencia, lo que da lugar a un número total de análisis térmicos de 1.600.

La interpretación final de los resultados derivados de los análisis térmicos se traduce en la definición de un factor corrector k_{GRAD} que considerará, simultáneamente, la influencia del canto de la viga, el ancho de losa superior y el espesor de capa asfáltica de rodadura, si ésta existe. Ello se recoge de forma gráfica en la figura 9.

En base a lo expuesto en dicha figura, el gradiente térmico vertical que se debe considerar en el diseño de puentes de vigas será mayor cuanto menor sea el canto de la viga, mayor sea la distancia entre ejes de vigas del tablero y, si existe capa asfáltica, cuanto menor sea el espesor de dicha capa.

3.2.3. Método de obtención

El método que hay que seguir de cara a la obtención del gradiente térmico vertical positivo de un puente de vigas es el siguiente:

— Situación del lugar de emplazamiento del puente.

— Obtención, para dicho lugar, del gradiente de referencia, en base a lo representado en el mapa de isolíneas de la figura 8.

— Obtención del factor de corrección k_{GRAD} , relativo al canto de la viga, a la distancia entre ejes de vigas del tablero y al espesor de capa asfáltica, a partir de las gráficas mostradas en la figura 9.

— El gradiente térmico vertical positivo que corresponde considerar en diseño es:

$$\text{GRAD} = k_{\text{GRAD}} \cdot \text{GRAD}_{\text{referencia}} \quad (6)$$

Conviene señalar que para el gradiente térmico no se han determinado valores concretos de diseño, en función de la zona climática de emplazamiento del puente, tal como se ha hecho para el rango anual de la temperatura media del tablero (veáanse tabla 2 y figura 7). Ello es debido, por una parte, a la existencia de microclimas dentro de las grandes zonas climáticas del país, los cuales pueden venir definidos a través de una alta o baja ra-

diación solar, de una alta o baja insolación y de una alta o baja velocidad del viento, parámetros éstos que influyen de forma significativa en la respuesta térmica del tablero. Por otra parte, observando el mapa peninsular de isolíneas del gradiente de referencia, se llega a la conclusión de que la subdivisión de la Península Ibérica en grandes zonas climáticas no puede llevarse a cabo de forma tan directa como en el caso del mapa de isolíneas del rango anual de la temperatura media del tablero.

3.3. Otras acciones térmicas

En lo referente al gradiente térmico inverso (negativo), en base a los resultados derivados de los estudios paramétricos llevados a cabo [Mirambell et al. (11)], puede adoptarse un valor de diseño de $-2,0^{\circ}\text{C}$, quedando dicho valor del lado de la seguridad. En el caso de que se disponga capa asfáltica de rodadura, independientemente de su espesor, no es necesaria la consideración de esta acción térmica en diseño.

En cuanto al gradiente térmico horizontal, dada la propia tipología transversal de los tableros de puentes de vigas, puede considerarse que aquél es prácticamente despreciable. La influencia de la radiación solar lateral incidente sobre la viga extrema no afecta a la respuesta térmica del tablero de vigas en su conjunto, en sentido horizontal.

Por último, en lo que se refiere a la sollicitación térmica transversal, contenida en el plano de la sección, cabe hacer hincapié en la necesidad de evaluar, en algunos casos, los efectos estructurales que producen en el tablero de vigas y, en concreto, en tableros con sección transversal en π , las dilataciones o contracciones y las curvaturas térmicas impuestas en la losa superior del tablero. Ello genera la aparición de torsores en los nervios, en la sección transversal en π (presencia de diafragmas rígidos) y de momentos flectores transversales en la losa superior de hormigón, los cuales pueden inducir tensiones, tangenciales en los nervios, y transversales de flexión en la losa, de cierta magnitud [Mirambell (6), Priestley y Buckle (13)].

4. ANALISIS COMPARATIVO PRESENTE ESTUDIO-NORMATIVA

Puede intuirse que los valores de las acciones térmicas que se deben considerar en el dimensionamiento de puentes de hormigón, preconizados por la normativa nacional vigente [CPH-MOPU (1), MOPU (12)], parecen atender a un valor medio peninsular, no considerando la diversidad de climas existentes en la geografía peninsular y la influencia de la propia tipología transversal del tablero analizado sobre la respuesta térmica y tensional frente a los efectos térmicos ambientales.

En concreto, en el presente estudio, los parámetros contemplados de forma intrínseca en la confección de los mapas peninsulares de isolíneas del

rango anual de la temperatura media y del gradiente térmico de referencia son:

- El propio lugar de emplazamiento del puente.
- Los rangos diario y anual de la temperatura ambiente, en el lugar de emplazamiento del puente.
- La velocidad del viento en el lugar de emplazamiento.
- La radiación solar.

Los parámetros no contemplados de forma directa en el análisis y que influyen de forma significativa en la respuesta térmica de los tableros de puentes de vigas son considerados a través de la definición de los pertinentes factores de corrección, factores éstos relativos a:

- La tipología transversal del tablero y, concretamente, el canto de la viga y la distancia entre ejes de vigas del tablero.
- El espesor de capa asfáltica de rodadura.

En la tabla 4 se recogen, de forma muy concisa, las diferencias más significativas entre lo derivado

del presente estudio y lo preconizado por la normativa nacional vigente, en lo que se refiere a la cuantificación de las acciones térmicas de diseño en puentes de vigas de hormigón.

En lo referente al rango anual de la temperatura media del tablero, la corrección relativa al espesor ficticio de la pieza que recomienda la normativa, de cara a la obtención del incremento y decremento uniforme de la temperatura media del puente, refleja, de forma más o menos fiel, la influencia del canto del tablero. Asimismo, comparando los resultados obtenidos para puentes losa maciza [Mirambell y Aguado (7), Mirambell et al. (11)] con los derivados de este estudio para puentes de vigas, se desprende que, desde el punto de vista de la determinación de esta acción térmica, el espesor ficticio de un tablero de vigas, con un canto total 1,70 metros (canto de la viga 1,50 m y espesor de losa 0,20 m) y una distancia entre ejes de vigas de 3,0 metros, es aproximadamente el mismo que el espesor ficticio de un tablero losa maciza, de canto comprendido entre 0,30 m y 0,40 metros. En cualquier caso, la expresión preconizada por la normativa no contempla la diversidad de climas del país,

TABLA 4
Valores de las acciones térmicas de diseño en puentes de vigas, según la normativa nacional vigente y según el presente estudio

Acciones térmicas de diseño en puentes de vigas de hormigón (°C)		
Rango anual de la temperatura media del tablero	Normativa	$\Delta T = \pm (20 - 0,75 \sqrt{e})$ <p>La única variable considerada es el espesor ficticio. No se parte de ninguna información climatológica. La temperatura de 20°C parece atender a un valor medio peninsular.</p>
	Presente estudio	$\Delta T = k_{\Delta T} \cdot \Delta T_{\text{referencia}}$ <p>Se considera el canto de las vigas y la distancia entre ejes de vigas del tablero. Se consideran las condiciones ambientales y climatológicas existentes en el lugar de emplazamiento del puente</p>
Gradiente térmico	Normativa	$\text{GRAD} = 10,0$ <p>No considera ninguna variable. Queda a juicio del proyectista.</p>
	Presente estudio	$\text{GRAD} = k_{\text{GRAD}} \cdot \text{GRAD}_{\text{referencia}}$ <p>Se considera el canto de las vigas y la distancia entre ejes de vigas, el espesor de capa asfáltica y la climatología existente en el lugar de emplazamiento del puente.</p>
Gradiente térmico inverso	Normativa	—
	Presente estudio	$\text{GRAD}_{\text{neg}} = - 2,0$ <p>Si se dispone capa asfáltica de rodadura, no es necesaria su consideración.</p>

lo cual se traduce en unas variaciones anuales de la temperatura media del tablero mucho más acusadas que las que podrían provenir de la influencia del canto del tablero y de la distancia entre ejes de vigas. Por último, conviene señalar que, para algunas de las zonas climáticas en las que se ha dividido la Península Ibérica, el rango anual de la temperatura media del tablero de vigas supera claramente el valor de $\pm 20^{\circ}\text{C}$.

En cuanto a la determinación del valor del gradiente térmico de diseño, ésta debe hacerse de tal forma que se contemplen las condiciones ambientales en el lugar de emplazamiento del puente y, en particular, la radiación solar global media mensual máxima a lo largo del año. Por otra parte, se observa que, para tableros de puentes de vigas emplazados en amplias zonas de la geografía peninsular, el valor del gradiente de diseño derivado de este estudio supera el valor de 10°C preconizado por la normativa vigente, si bien dicho efecto se ve amortiguado a medida que aumenta el canto del tablero, disminuye la distancia entre ejes de vigas y aumenta el espesor de capa asfáltica de rodadura. Una cota inferior adecuada de dicho espesor, desde el punto de vista del comportamiento térmico y tensional asociado —aparición de tensiones autoequilibradas— de los tableros de puentes de vigas, es 7,0 cm.

5. CONCLUSIONES

Del análisis de los resultados derivados del presente estudio se desprenden las siguientes conclusiones:

— La aplicación de la metodología de obtención de acciones térmicas que se deben considerar en el proyecto de puentes de hormigón [Mirambell et al. (11)] al caso de tableros de puentes de vigas, ha permitido obtener diferentes mapas peninsulares de isóneas del rango anual de la temperatura media del tablero y del gradiente térmico vertical y determinadas expresiones de diseño que facilitarán la labor de definición de las acciones térmicas que hay que considerar en el proyecto y dimensionamiento de los puentes de vigas.

— La diversidad de climas de nuestro país se traduce en unas variaciones del rango anual de la temperatura media del tablero, mucho más acusadas que las que puedan provenir de la influencia del canto de las vigas y de la distancia entre ejes de las vigas del tablero.

— En no pocos emplazamientos de las diferentes zonas climáticas del país, el gradiente térmico de diseño del tablero de vigas, supera el valor de 10°C , preconizado por la normativa nacional vigente.

— En la tipología transversal de puentes de vigas, cuanto menor es el canto del tablero y mayor

es la distancia entre ejes de vigas, mayores son el rango anual de la temperatura media y el gradiente térmico vertical positivo de diseño.

— La influencia del espesor de la capa asfáltica es únicamente significativa a la hora de evaluar el gradiente térmico de diseño. Cuanto menor sea dicho espesor, mayor será el gradiente térmico.

Como resumen final, cabe señalar que en el presente artículo se proporcionan los criterios y pautas de actuación, útiles al proyectista de puentes, de cara a evaluar, de forma simple, pero realista, las acciones térmicas que es preciso considerar en el proyecto y dimensionamiento de los puentes de vigas de hormigón, teniendo en cuenta su lugar de emplazamiento, las condiciones ambientales y climáticas en las que se encuentra inmerso y los parámetros que pueden influir de forma significativa en la respuesta térmica y tensional de los puentes de vigas de hormigón.

AGRADECIMIENTOS

Sirva este apartado para agradecer a la Dirección General de Carreteras, del Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo, el soporte económico necesario para realizar el proyecto "Redacción de unas recomendaciones sobre acciones térmicas a considerar en el proyecto de puentes de hormigón". Parte del informe final relativo a dicho proyecto se presenta en este artículo.

BIBLIOGRAFIA

1.—COMISION PERMANENTE DEL HORMIGON. MOPU. "Instrucción EP-80 para el proyecto y la ejecución de obras de hormigón pretensado". Comisión Permanente del Hormigón. Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo. 1980.

2.—IMBSEN, R.A., VANDERSHAF, E., SCHAMBER, R., NUTT, R.V. "Thermal Effects in Concrete Bridge Superstructures". Report 276. National Cooperative Highway Research Program. Transportation Research Board. Washington D.C., September 1985.

3.—INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. "Guía resumida del clima de España". Servicio de Climatología. Ministerio de Transportes, Turismo y Comunicaciones. Madrid, 1982.

4.—INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. "Atlas climático de España". Ministerio de Transportes, Turismo y Comunicaciones. Madrid, 1983.

5.—INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. "Atlas de la radiación solar en España". Ministerio de Transportes, Turismo y Comunicaciones. Madrid, 1984.

6.—MIRAMBELL, E. "Criterios de diseño en puentes de hormigón frente a la acción térmica ambiental". Tesis Doctoral. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona, Marzo 1987.

7.—MIRAMBELL, E., AGUADO, A. "Estudio del comportamiento de puentes losa de hormigón frente a la acción térmica ambiental. Criterios de diseño". Hormigón y Acero, N° 163. Abril, 1987.

8.—MIRAMBELL, E., AGUADO, A. "Acciones térmicas de diseño en puentes cajón de hormigón". Hormigón y Acero, N° 165. Octubre, 1987.

9.—MIRAMBELL, E., AGUADO, A. "Modelo de obtención de distribuciones de temperatura y de tensiones longitudinales autoequilibradas en puentes de hormigón". Métodos Numéricos en Ingeniería. Vol. 3, N° 2. Abril 1987.

10.—MIRAMBELL, E., AGUADO, A. "Temperature and Stress Distributions in Concrete Box Girder Bridges". ASCE Journal of Structural Engineering. American Society of Civil Engineers. (in press).

11.—MIRAMBELL, E., AGUADO, A., DIEZ, P. "Acciones térmicas a considerar en el proyecto de puentes de hormigón". Documento Convenio TC-664. Dirección General de Carreteras. Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo. Diciembre, 1989.

12.—MOPU. "Instrucción relativa a las acciones a considerar en el proyecto de puentes de carretera". Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo. Madrid, 1972.

13.—PRIESTLEY, M.J.N., BUCKLE, I.G. "Ambient Thermal Response of Concrete Bridges".

Road Research Unit Bulletin N° 42. National Roads Board, New Zealand. Wellington, 1979.

RESUMEN

En este artículo se presenta un estudio sobre la respuesta térmica de puentes de vigas frente a los efectos térmicos ambientales. La aplicación de una metodología general de obtención de las acciones térmicas que hay que considerar en el proyecto de puentes de vigas de hormigón emplazados en la geografía española peninsular, permitirá determinar el rango anual de la temperatura media del tablero y el gradiente térmico vertical al que se ven solicitados. Los resultados derivados de este estudio se analizan comparativamente con lo obtenido mediante la aplicación de la normativa nacional vigente.

SUMMARY

In the present paper, the thermal response of concrete T-beam bridges in front of environmental thermal effects is analysed. The application of a general methodology in order to determine the thermal actions to be considered in design of concrete bridges allows to know the effective temperature range of the deck and thermal gradients in concrete T-beam bridges located on the Iberian Peninsula. The results derived from this study are compared with those obtained by means of several expressions existing in national codes.

* * *

Reunión de la Comisión N.º 2 de la FIP "Prestressing Materials and Systems"

Los días 4 y 5 de abril 1990 tuvo lugar en el L.C.P.C. de París la reunión de la citada Comisión, con una asistencia de 22 miembros representando un total de 12 países.

Los temas más relevantes tratados en la misma, fueron:

1. Durability-case histories

La Comisión ha publicado el segundo informe y se hace difícil continuar con el mismo, dada la poca o nula información que se recibe. De cualquier forma, parece que las causas de mayor incidencia son el almacenamiento, tratamientos de limpieza inadecuados antes del galvanizado y la instalación.

Ante la intención de prohibir el uso de cordones y barras galvanizados en los EE.UU., la Comisión decide crear un Grupo de trabajo que clarifique el por qué de los fallos de los aceros galvanizados. Este Grupo presentará sus conclusiones en un plazo máximo de 2 meses.

2. Multi-axial behaviour

Se está imponiendo como obligatorio en varias normas europeas el ensayo a tracción desviada que ya rige en Francia, Suiza y Holanda, en tanto que Alemania lo incorporará en breve.

Es importante tener en cuenta que para que el valor obtenido "D" sea representativo, se debe tomar la media, de por lo menos 5 ensayos.