

TESIS DOCTORAL

CRITERIOS DE DISEÑO EN PUENTES DE HORMIGÓN FRENTE A LA ACCIÓN TÉRMICA AMBIENTAL

ENRIQUE MIRAMBELL ARRIZABALAGA

upc

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA
ESCOLA TÈCNICA SUPERIOR
D'ENGINYERS DE CAMINS, CANALS I PORTS

BARCELONA • ENERO DE 1987

TESIS DOCTORAL

CRITERIOS DE DISEÑO EN PUENTES DE HORMIGÓN FRENTE A LA ACCIÓN TÉRMICA AMBIENTAL

ENRIQUE MIRAMBELL ARRIZABALAGA

DIRECTOR DE TESIS
ANTONIO AGUADO DE CEA

upc

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA
ESCOLA TÈCNICA SUPERIOR
D'ENGINYERS DE CAMINS, CANALS I PORTS

BARCELONA • ENERO DE 1987

I N D I C E

	<u>Pág</u>
<u>INTRODUCCION</u>	1
 <u>CAPITULO 1.- ESTADO ACTUAL DEL CONOCIMIENTO. REVISION</u> <u>CRITICA</u>	
1.1.- INTRODUCCION	15
1.2.- VISION FISICA DEL PROBLEMA	17
1.2.1.- Mecanismos de transferencia de calor en puentes de hormigón	17
1.2.2.- Ecuación diferencial que rige el fenómeno de la conducción de calor en puentes de hormigón	27
1.2.3.- Propiedades térmicas del hormigón	31
1.3.- ESTUDIO A NIVEL SECCIONAL. DISTRIBUCIONES DE TEMPE RATURAS Y ESTADOS TENSIONALES ASOCIADOS	43
1.3.1.- Determinación de la distribución de tempe- raturas en puentes de hormigón	43
1.3.1.1.- Condiciones inicial y de contor- no	43
1.3.1.2.- Revisión de los métodos utiliza- dos para la resolución de la e- cuación de flujo del calor	47
1.3.1.2.1.- Métodos exactos	48
1.3.1.2.2.- Métodos aproximados	48
1.3.2.- Estado tensional asociado a la distribu- ción de temperaturas	65
1.3.2.1.- Tensiones longitudinales	66
1.3.2.2.- Tensiones transversales	72

1.3.3.- Estudios analíticos de determinación de distribuciones de temperaturas y de tensiones autoequilibradas en puentes de hormigón	77
1.4.- INSTRUMENTACION DE PUENTES DE HORMIGON PARA MEDIR TEMPERATURAS. ESTUDIOS EXPERIMENTALES	107
1.4.1.- Necesidades varias para la experimentación en puentes de hormigón	107
1.4.2.- Sistemas de medidas de temperatura	111
1.4.3.- Posición de los puntos de medida de temperatura	116
1.4.4.- Revisión de estudios experimentales en puentes de hormigón in situ para medición de temperaturas	122
1.5.- ACCIONES TERMICAS DE DISEÑO EN PUENTES DE HORMIGON	134
1.5.1.- Especificaciones y recomendaciones de la normativa internacional relativas a la acción térmica	134
1.5.2.- Análisis y comentarios	149

CAPITULO 2.- MODELO DE ANALISIS PARA LA OBTENCION DE LA RESPUESTA TERMICA Y TENSIONAL DE LOS PUENTES DE HORMIGON

2.1.- INTRODUCCION	152
2.2.- METODO NUMERICO UTILIZADO PARA LA RESOLUCION DEL PROBLEMA TERMICO EN PUENTES DE HORMIGON	153
2.2.1.- Hipótesis adoptadas. Convergencia y estabilidad del método numérico	153
2.2.2.- Estructuración del programa desarrollado	159

	<u>Pág</u>
2.3.- IMPLEMENTACION NUMERICA DE DIVERSOS PARAMETROS AMBIENTALES, FISICOS Y ESTRUCTURALES. PARTICULARIDADES	166
2.3.1.- La temperatura ambiente	166
2.3.2.- La radiación solar	168
2.3.3.- La existencia de capa asfáltica	177
2.3.4.- La evolución de la temperatura en los huecos de las secciones aligeradas y celulares	179
2.4.- EJEMPLOS	181
2.4.1.- Puente Adur Bridge-Slip road	183
2.4.2.- Puente sobre la riera de Can Estapé, Rubí	186
2.4.3.- Puente cajón analizado por Elbadry y Ghali	191
2.4.4.- Puente Pennsylvania University Bridge	197
2.4.5.- Puente Ingeniero Carlos Fernández-Casado	206

CAPITULO 3.- ESTUDIO DE LOS PARAMETROS QUE INFLUYEN SOBRE LA RESPUESTA TERMICA Y TENSIONAL DE LOS PUENTES DE HORMIGON A NIVEL SECCION

3.1.- INTRODUCCION	216
3.2.- ESTUDIO PARAMETRICO DE LA SECCION LOSA MACIZA	219
3.3.- ESTUDIO PARAMETRICO DE LA SECCION CAJON	304
3.3.1.- Puentes de sección en cajón unicelulares	307
3.3.1.1.- Influencia de los parámetros físicos, ambientales y de emplazamiento	309
3.3.1.2.- Influencia de la geometría de la sección	368
3.3.2.- Puentes de sección en cajón multicelulares	411
3.4.- ANALISIS COMPARATIVO DE LOS RESULTADOS DE LOS ESTUDIOS PARAMETRICOS DE LA SECCION LOSA MACIZA Y LA SECCION CAJON	420

	<u>Pág</u>
3.5.- OTRAS TIPOLOGIAS TRANSVERSALES EN PUENTES DE HORMIGON	423
3.5.1.- Puentes losa aligerada	423
3.5.2.- Puentes de vigas	432

CAPITULO 4.- ACCIONES TERMICAS DE DISEÑO EN PUENTES DE HORMIGON. APLICACION A PUENTES EMPLAZADOS EN LA GEOGRAFIA ESPAÑOLA

4.1.- INTRODUCCION	440
4.2.- ACCIONES TERMICAS DE DISEÑO	444
4.2.1.- Valores adoptados por los diferentes parámetros y variables para la definición de las acciones térmicas de diseño	447
4.2.2.- Valores característicos de las acciones térmicas	449
4.2.3.- Puentes losa maciza	457
4.2.3.1.- Variaciones anuales de la temperatura media	458
4.2.3.2.- Gradientes térmicos	471
4.2.3.3.- Otras acciones térmicas	492
4.2.4.- Puentes losa aligerada	493
4.2.4.1.- Variaciones anuales de la temperatura media	494
4.2.4.2.- Gradientes térmicos	497
4.2.4.3.- Otras acciones térmicas	505
4.2.5.- Puentes cajón unicelulares	506
4.2.5.1.- Variaciones anuales de la temperatura media	507
4.2.5.2.- Gradientes térmicos	517
4.2.5.3.- Otras acciones térmicas	535

	<u>Pág</u>
4.2.6.- Puentes cajón multicelulares	546
4.2.7.- Influencia de la inercia variable sobre las acciones térmicas a considerar en dise ño	548
4.2.8.- Puentes de vigas	559
4.3.- EJEMPLOS	564
4.3.1.- Puentes losa	564
4.3.2.- Puentes cajón	566

CAPITULO 5.- ESTADOS TENSIONALES DE DISEÑO INDUCIDOS POR
LA ACCION TERMICA AMBIENTAL EN PUENTES DE
HORMIGON

5.1.- INTRODUCCION	574
5.2.- DISTRIBUCIONES TENSIONALES EN PUENTES DE HORMIGON	576
5.2.1.- Puentes losa	579
5.2.2.- Puentes cajón	588
5.2.2.1.- Tensiones térmicas longitudina- les primarias	588
5.2.2.2.- Tensiones térmicas transversales secundarias	599
5.2.3.- Puentes de vigas	601
5.2.3.1.- Tensiones térmicas longitudina- les primarias	601
5.2.3.2.- Tensiones térmicas transversales secundarias	603
5.3.- ZONAS CRITICAS DE LOS PUENTES DE HORMIGON FRENTE A LA ACCION TERMICA AMBIENTAL Y OTRAS ACCIONES . . .	607

CAPITULO 6.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES. PERSPECTI-
VAS FUTURAS

6.1.- RESUMEN. CONCLUSIONES GENERALES	615
6.2.- CONCLUSIONES ESPECIFICAS	620
6.2.1.- Conclusiones y recomendaciones relativas al modelo numérico de obtención de la res- puesta térmica y tensional en puentes de hormigón	620
6.2.2.- Conclusiones y recomendaciones relativas a la influencia de los parámetros físicos, estructurales, geométricos, ambientales y de emplazamiento sobre la respuesta térmi- ca y tensional de los puentes de hormigón	624
6.2.3.- Conclusiones y recomendaciones relativas a la definición de las acciones térmicas de diseño en puentes de hormigón y, en parti- cular, en los emplazados en la geografía de nuestro país	629
6.2.4.- Conclusiones y recomendaciones relativas a los estados tensionales inducidos a nivel sección en los puentes de hormigón debidos a los efectos térmicos ambientales	634
6.3.- PERSPECTIVAS FUTURAS	638
<u>BIBLIOGRAFIA</u>	642

A N E J O S

	<u>Pág</u>
ANEJO 1.- LISTADO DE ORDENADOR DEL PROGRAMA NUMERICO DTTMF.FOR	A1.1
ANEJO 2.- LISTADOS DE LAS SALIDAS DE RESULTADOS DEL PROGRAMA RELATIVOS A DIVERSOS EJEMPLOS ANA- LIZADOS	
- Puente cajón Elbadry-Ghali	A2.2
- Puente cajón Pennsylvania University Bridge	A2.41
ANEJO 3.- INSTRUMENTACION DEL PUENTE SOBRE LA RIERA DE CAN ESTAPE, RUBI, BARCELONA, PARA MEDI- CION DE TEMPERATURAS	A3.1

C A P I T U L O 4

ACCIONES TERMICAS DE DISEÑO EN PUENTES DE HORMIGON.

APLICACION A PUENTES EMPLAZADOS

EN LA GEOGRAFIA ESPAÑOLA

4.1.- INTRODUCCION

En el capítulo anterior se ha analizado, de forma exhaustiva, la influencia de cada uno de los parámetros físicos, climatológicos, geométricos y de emplazamiento sobre la respuesta térmica y tensional a nivel sección de los puentes de hormigón para diferentes tipologías transversales.

El presente capítulo tiene como principal objetivo la obtención de las acciones térmicas de diseño a considerar en el análisis y dimensionamiento de los puentes de hormigón emplazados en la geografía de nuestro país para las tipologías transversales comúnmente adoptadas.

Dichas acciones térmicas son las siguientes:

- Variaciones anuales de la temperatura media del puente
- Gradientes térmicos verticales: positivos y negativos
- Gradientes térmicos horizontales
- Acciones térmicas transversales: diferencia de temperaturas entre el interior de las células y el ambiente exterior en secciones celulares.

La primera de dichas acciones proporcionará, en función del emplazamiento y de la tipología transversal del puente, el rango de variación anual de su temperatura media. El conocimiento de dicho rango permitirá disponer de forma adecuada los aparatos de apoyo y elegir el tipo y distancia entre juntas de dilatación del tablero atendiendo a las condiciones ambientales existentes en el lugar de emplazamiento del puente. Por otra parte, el conocimiento de dicha variación anual también permitirá determinar de forma precisa el incremento o decremento de temperatura media del puente a considerar en el análisis estructural.

Otras acciones térmicas a determinar son los gradientes originados fundamentalmente por la incidencia de radiación solar en uno de sus paramentos exteriores, ya sea sobre el superior o sobre uno de los dos paramentos laterales. De esta forma se obtendrán, en general, gradientes térmicos según los dos planos principales de inercia de la sección transversal del tablero. En lo referente a dichos gradientes, hay que hacer hincapié en que lo que se presentará como valores de diseño son gradientes, es decir, distribuciones planas de temperatura equivalentes a las distribuciones no lineales existentes a través de la sección transversal en la realidad.

Ello presenta varias ventajas y son, por un lado, un conocimiento directo de la acción térmica por parte del proyectista y, por otro, una mayor facilidad a la hora de introducir la acción térmica como acción a considerar en el análisis estructural. Por otra parte, si ya existe una casuística ciertamente compleja de cara a la definición de unos gradientes térmicos equivalentes, dicha complejidad se vería acrecentada si lo que nos propusiéramos fuera la definición de una distribución no lineal de temperaturas a contemplar en el diseño de los puentes de hormigón.

A nivel estructural y suponiendo que se verifica la hipótesis de Navier-Bernouilli -secciones planas permanecen planas después de deformarse- la imposición de una distribución no lineal de temperaturas o de su plano equivalente inducen las mismas curvaturas térmicas impuestas y, por consiguiente, generan idénticas leyes de esfuerzos e idénticos estados tensionales de continuidad (se recuerda que las tensiones de continuidad vienen originadas por la propia hiperestaticidad de la estructura del puente).

Así pues, la única diferencia estriba en el hecho de que, debido a la no linealidad de la distribución del campo de temperaturas, existen tensiones longitudinales autoequilibradas primarias, tensiones éstas que pueden ser cuantifica-

das a nivel sección independientemente de la tipología longitudinal del puente.

La última acción térmica de diseño a determinar será la acción térmica transversal. Dicha acción, no contemplada, en general, en el diseño de puentes de hormigón merece una atención especial puesto que, en algunos casos, ha sido la razón desencadenante de avanzados estados de fisuración y, en otros, causa fundamental de la puesta fuera de servicio de algún puente de hormigón (Johannson (51), Leonhardt y Lippoth (57)). Tales casos han ocurrido, fundamentalmente, en puentes con sección transversal en cajón. En efecto, la imposición de una distribución de temperaturas contenida en el plano de la sección transversal en este tipo de puentes induce una ley de momentos flectores transversales que pueden originar tensiones de tracción de cierta relevancia en las fibras de los contornos exterior e interior del núcleo de hormigón que envuelve a las células. Dichas distribuciones térmicas transversales pueden venir definidas, en un principio, por la imposición de un incremento uniforme y/o un gradiente térmico en la losa superior del tablero del puente (MWD Nueva Zelanda (71), NAASRA Australia (72), OMTC Ontario (74), BS-5400 Gran Bretaña (18)). No obstante, la consideración de tales gradientes o incrementos en diseño no incluye los efectos originados por las variaciones de temperatura existentes a través del espesor de las almas y de la losa inferior del tablero cajón.

En base a lo expuesto en el párrafo anterior es de interés el definir como acción térmica transversal de diseño aquella acción que refleje de la forma más global y fiel la existencia de la variación de temperaturas a través del espesor de todo el perímetro del núcleo de hormigón que envuelve a las células. Dicha acción térmica, en mi opinión, vendrá determinada por la diferencia de temperaturas existente entre el interior de la célula y el ambiente exterior. De hecho, algunas de las normativas internacionales recomiendan en sus especificaciones considerar una diferencia de temperaturas en-

tre ambos medios -aire de la célula y ambiente exterior- (DMT Dinamarca (29), Precast Segmental Box Girder Bridge Manual (PTI-PCI (86)). Por otra parte, algunos autores también recomiendan la consideración de esta diferencia de temperaturas en el diseño de puentes de hormigón con sección transversal en cajón (Johansson (51), Leonhardt et al. (56), Imbsen et al. (44)).

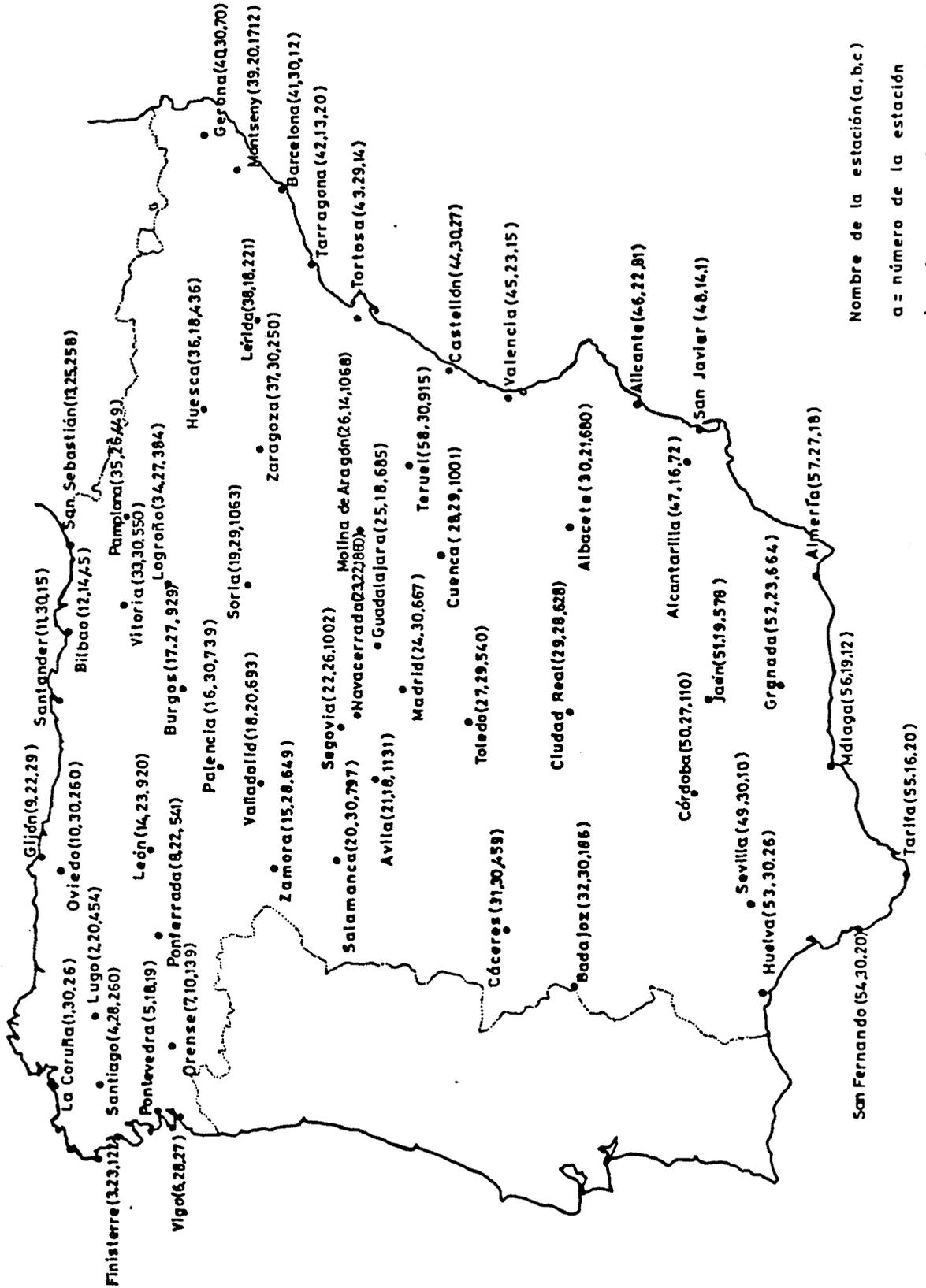
Por último, se desarrollarán algunos ejemplos representativos en los que se mostrará la metodología a seguir de cara a la definición de las acciones térmicas a considerar en el diseño de los puentes de hormigón emplazados en algún lugar de la geografía de nuestro país.

4.2.- ACCIONES TERMICAS DE DISEÑO

Para determinar las acciones térmicas a considerar en el diseño de puentes de hormigón se hace necesario conocer datos relativos a diversos parámetros climatológicos y ambientales en el lugar de emplazamiento del puente, como ya se ha visto en los estudios paramétricos realizados en el capítulo anterior. Dichos datos pueden ser extraídos de las numerosas publicaciones del Instituto Nacional de Meteorología ((46), (47), (48)) las cuales proporcionan una vasta información referente a la climatología española.

En la figura 4.1 se presentan las diferentes estaciones meteorológicas contempladas en las publicaciones del Instituto. El número total de estaciones es de 58 -principales observatorios dependientes del Instituto Nacional de Meteorología- y con ellas se cubre ampliamente toda la geografía peninsular y la gran variedad de climas existente en nuestro país. En dicha figura también se presentan la altitud de la estación meteorológica así como el número de años de que se ha dispuesto de datos. Con el fin de que éstos sean homogéneos y comparables entre sí se ha elegido el período 1931-1960 para todas las estaciones, salvo para las de Oviedo y Teruel que apenas tienen observaciones en ese período y, por lo tanto, ha sido preciso tomar para dichas estaciones el período 1901-1930.

El adoptar tales períodos de tiempo y no otros posteriores es debido a que existe únicamente una publicación del Instituto Nacional de Meteorología que proporciona una guía resumida del clima de España extendida a todo su ámbito geográfico. Dicha publicación, la cual contempla los períodos de tiempo anteriormente mencionados, es la que se ha tomado como base de datos para poder afrontar el presente estudio (Guía resumida del Clima en España (46)).



Nombre de la estación(a,b,c)

a = número de la estación

b = número de años con datos

c = altitud de la estación en metros.

Fig. 4.1.- Estaciones metereológicas contempladas en el presente estudio. Número de la estación, años de los que se dispone de datos y altitud en metros.

Conviene comentar que el autor de la presente tesis ha analizado datos registrados en diferentes estaciones meteorológicas del país relativos a algunos parámetros climatológicos y correspondientes a posteriores períodos de tiempo y se ha observado que las discrepancias con los datos registrados en los períodos de tiempo citados son mínimas (Radiaciones Solares y Calendarios Meteorológicos de los años 1977, 1978, 1979, 1980, 1981, 1982, 1983 y 1985. Publicaciones del Instituto Nacional de Meteorología (45)).

En cualquier caso, las series de datos a contemplar suponen la adopción de un período de retorno de 30 años, suficiente para poder definir con rigor las acciones térmicas de diseño a considerar en el análisis estructural de los puentes de hormigón.

En resumen, para cada una de las estaciones meteorológicas, 58 en total, se parte de las siguientes variables climatológicas, consideradas como fundamentales para la obtención de la respuesta térmica de los puentes de hormigón (Instituto Nacional de Meteorología (46), (47), (48)):

- Temperatura media mensual \bar{T}
- Temperatura media mensual de las máximas \bar{T}_M
- Temperatura media mensual de las mínimas \bar{T}_m
- Número medio mensual de horas de sol
- Velocidad de viento media mensual
- Radiación solar global media mensual

En cuanto a la radiación solar, las series de datos de algunas de las estaciones contempladas son cortas por lo que los resultados obtenidos y presentados en los mapas de radiación de las publicaciones del Instituto Nacional de Meteorología deben considerarse como una primera estimación en espera de que en un futuro próximo sea posible preparar un atlas de radiación solar más completo y fidedigno.

A pesar de esta limitación las series de datos registradas son de enorme utilidad para poder evaluar la intensidad de radiación solar incidente sobre los tableros de puentes de hormigón y su efecto sobre las variaciones de temperatura media, gradientes térmicos y demás acciones térmicas.

4.2.1.- Valores adoptados por los diferentes parámetros y variables para la definición de las acciones térmicas de diseño

En el capítulo anterior se analizaba la influencia de todos las variables y parámetros sobre la respuesta térmica y tensional de los puentes de hormigón.

Inicialmente, se llegó a la conclusión de que las propiedades térmicas del hormigón y, en particular, la conductividad térmica influían mínimamente en dicha respuesta.

Con posterioridad se analizó la influencia del factor de absorción solar del hormigón. Aunque en el estudio paramétrico se adoptó para dicho factor un cierto rango de variación, existe una clara unanimidad por parte de los investigadores que han estudiado la influencia de los efectos térmicos ambientales en el comportamiento térmico y tensional de los puentes de hormigón en adoptar un valor de 0.5 para éste (Elbadry y Ghali (33), Dilger et al. (28), Priestley y Buckle (85), Emerson (34), Zichner (97), CEB (23)).

Dicho factor se verá modificado si sobre el tablero del puente se dispone una capa asfáltica de rodadura. En este caso también parece existir unanimidad en los valores adoptados por la conductividad térmica del asfalto y por su factor de absorción solar y su emisividad.

En la tabla 4.1 se presentan los valores de las propiedades térmicas y físicas de los materiales hormigón y asfalto,

los cuales se supondrán constantes a la hora de determinar las acciones térmicas de diseño y la respuesta tensional en los puentes de hormigón.

Propiedad térmica	Hormigón	Asfalto
Conductividad térmica (W/m°C)	1.5	0.83
Calor específico (J/kg°C)	960.	880.
Densidad (kg/m ³)	2400.	2200.
Factor de absorción solar	0.5	0.9
Emisividad	0.88	0.92

Tabla 4.1.- Valores de las propiedades térmicas de los materiales hormigón y asfalto adoptados para la obtención de las acciones térmicas de diseño en puentes de hormigón.

Efectivamente, de cara a la obtención de ambas respuestas, térmica y tensional, no tiene sentido analizar cada una de estas propiedades puesto que, o su influencia es prácticamente despreciable como ya se ha visto en el apartado 3.2 del capítulo anterior o sus rangos de variación son muy pequeños en la realidad. Debe quedar claro que en la presente tesis el material hormigón es un hormigón ordinario con una dosificación "normal" y en el que los constituyentes no presentan particularidades especiales (áridos ligeros, áridos pesados,...).

Las variables climatológicas y ambientales de las que se parte para poder llegar a obtener las acciones térmicas de diseño y las distribuciones tensionales son las ya citadas anteriormente en este mismo apartado. La radiación solar global y el número medio de horas de sol son sinónimos o fiel reflejo de los parámetros que se mencionan a continuación y cuya influencia ya fue analizada en el capítulo anterior:

$$\left. \begin{array}{l} \text{Radiación solar global} \\ \text{Número de horas de sol} \end{array} \right| = \left. \begin{array}{l} \text{Día del año} \\ \text{Factor de turbidez} \\ \text{Latitud} \\ \text{Altitud} \end{array} \right|$$

De los parámetros de emplazamiento del puente sólo resta contemplar el azimut de éste. Dicho parámetro, junto con la latitud y otras variables, será tenido en cuenta a la hora de evaluar la posible incidencia de radiación solar en los paramentos laterales de la sección transversal del puente y, por consiguiente, a la hora de evaluar los gradientes térmicos transversales.

4.2.2.- Valores característicos de las acciones térmicas

La información suministrada por las publicaciones del Instituto Nacional de Meteorología ((46), (47), (48)) proporciona una gran cantidad de datos climáticos correspondientes a cada una de las estaciones meteorológicas presentadas en la figura 4.1, datos que se ajustan de forma muy adecuada a lo precisado en este estudio.

El objetivo perseguido, como ya ha sido comentado, es el obtener unas acciones térmicas a considerar en el diseño de puentes de hormigón, acciones que, a mi entender, deberían ser definidas por su valor característico y no por su valor medio (figura 4.2).

Ello presenta varias ventajas. Por una parte, la probabilidad de que se presenten valores de la acción térmica superiores al valor considerado en diseño a lo largo de la vida útil de la estructura se ve limitada a un cuantil reducido; dicho cuantil, para todas las acciones térmicas, se situará como se verá con posterioridad en este mismo subapartado, en el entorno del 5%. Por otra parte, esta forma de actuar pre-

senta la ventaja de mostrar una coherencia teórica con lo propugnado por las normativas vigentes en nuestro país en lo que se refiere a la definición de las acciones a considerar en proyecto y a las posteriores combinaciones de acciones.

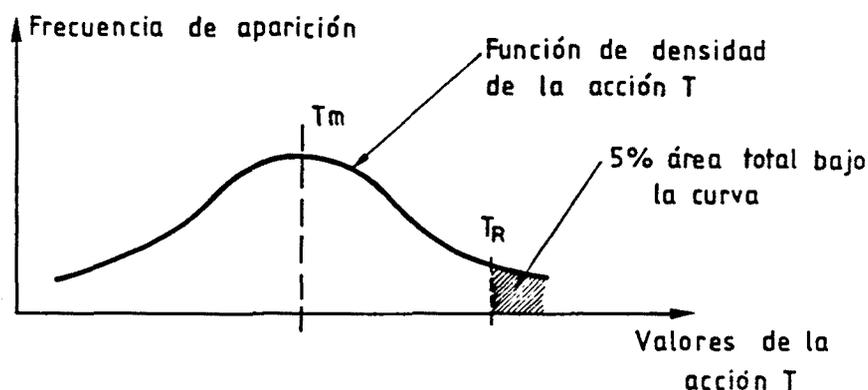


Fig. 4.2.- Valor característico de las acciones térmicas.

La adopción de todos los datos climatológicos registrados para todas las estaciones meteorológicas a lo largo del año en el presente estudio permitiría obtener, para cada una de las acciones térmicas a analizar, una función de densidad con distribución normal. La elección de un número finito de datos, menor al registrado, permitirá definir un valor característico de la acción térmica asociado al cuantil del 5%.

La elección de dichos datos ya dependerá de la propia acción térmica a obtener puesto que, como ya ha quedado demostrado a lo largo de los estudios paramétricos realizados y presentados en el capítulo anterior, la influencia de cada una de las variables climatológicas y ambientales analizadas es más, o menos, significativa en función de la acción térmica que se pretenda obtener.

En efecto, tal como se indica en el Código Modelo CEB-FIP (CEB-FIP (21)), las acciones naturales dependen de la situación geográfica y del emplazamiento de la construcción. Sin embargo, en casi todos los casos, el carácter aleatorio de dichas acciones se encuentra ligado esencialmente a un parámetro aleatorio relacionado con el origen físico de la acción. Las medidas de dicho parámetro son la base de las estadísticas que se pueden utilizar.

Variación anual de la temperatura media del puente

En los estudios paramétricos del día del año llevados a cabo para las diferentes tipologías transversales analizadas de puentes de hormigón se llegaba a la conclusión de que las variaciones anuales de la temperatura media de los puentes de hormigón dependían, fundamentalmente, de la climatología del lugar de emplazamiento y, en particular, de las variaciones anuales de la temperatura ambiente. Así pues, será este parámetro, el rango de variación anual de la temperatura ambiente, el parámetro aleatorio básico para poder llegar a definir la variación anual de la temperatura media del puente.

La metodología seguida ha sido, para cada una de las estaciones meteorológicas, la siguiente:

- Obtención de los dos meses del año para los cuales la temperatura ambiente media mensual \bar{T} es máxima y mínima.
- Obtención para ambos meses del rango de variación medio mensual de la temperatura ambiente $\bar{T}_M - \bar{T}_m$.
- Obtención, para el mes de máxima temperatura ambiente media mensual, de la temperatura ambiente media mensual de las máximas \bar{T}_M .
- Obtención, para el mes de mínima temperatura ambiente media mensual, de la temperatura ambiente media mensual de las mínimas \bar{T}_m .

- Para el mes de máxima temperatura ambiente media mensual se adoptan como datos de temperatura, en la obtención de la respuesta térmica, los siguientes:

Temperatura ambiente media = Temperatura ambiente media mensual de las máximas \bar{T}_M

Rango de temperatura = Rango de variación de la temperatura ambiente media mensual $\bar{T}_M - \bar{T}_m$

- Para el mes de mínima temperatura ambiente media mensual se adoptan como datos de temperatura, en la obtención de la respuesta térmica, los siguientes:

Temperatura ambiente media = Temperatura ambiente media mensual de las mínimas \bar{T}_m

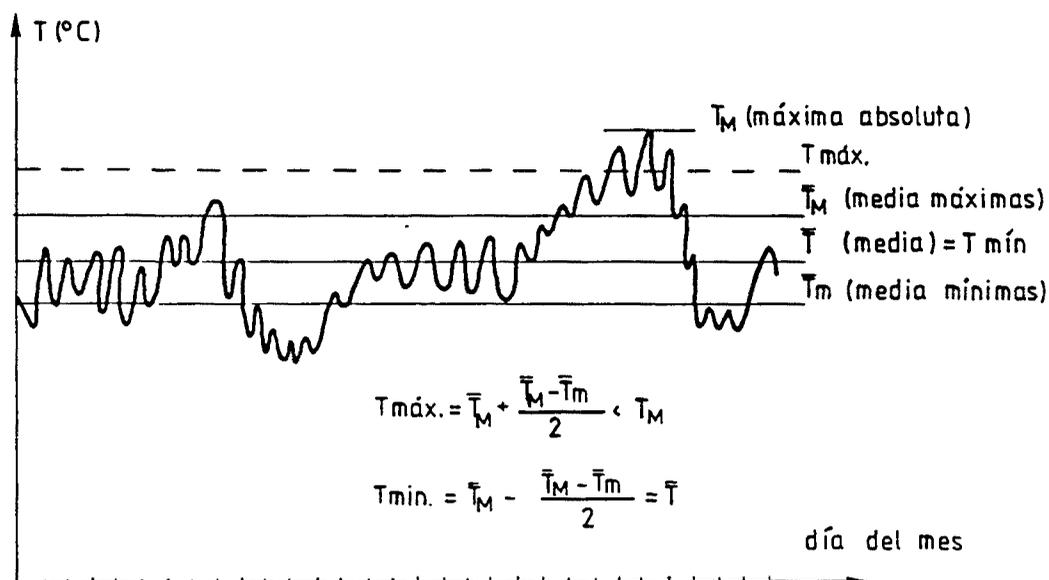
Rango de temperatura = Rango de variación de la temperatura ambiente media mensual $\bar{T}_M - \bar{T}_m$

La figura 4.3 muestra de forma clara cuáles son los datos de temperatura ambiente a introducir en el análisis

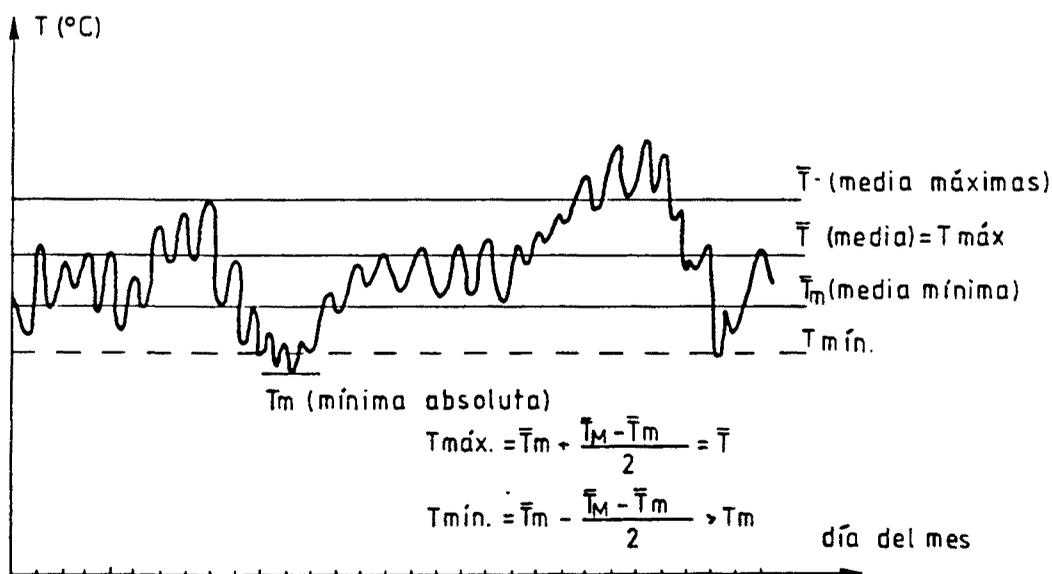
- La radiación solar, número de horas de sol y velocidad de viento a introducir como datos en el análisis térmico son los correspondientes valores medios mensuales registrados en cada una de las estaciones meteorológicas para los dos meses del año de máxima y mínima temperatura ambiente media mensual.

Esta forma de actuar permite definir la acción térmica por su valor característico.

Efectivamente, la probabilidad de que la temperatura media del puente supere el valor característico máximo puede situarse próxima al valor de 0.05 ya que, por una parte, la relación de 1 mes a 12 meses es de 0.083 y, por otra, se ha adoptado como temperatura ambiente media para el análisis el valor de la media mensual de las máximas con lo cual la relación anterior se ve reducida, como mínimo, a un valor de 0.042.



a) Mes de máxima temperatura ambiente media mensual.



b) Mes de mínima temperatura ambiente media mensual.

Fig. 4.3.- Datos de temperatura ambiente exterior a introducir en el análisis térmico para obtener la variación anual de la temperatura media de los puentes de hormigón.

Idéntico comentario puede hacerse con respecto a la posibilidad de que la temperatura media del puente sea menor que el valor característico mínimo.

Por consiguiente, la probabilidad de que la máxima diferencia de temperaturas medias a lo largo de la vida útil de la estructura supere la diferencia existente entre los valores característicos máximo y mínimo estará comprendida entre los valores 0.05 y 0.10 aproximadamente. De ahí, el que pueda concluirse que los rangos de variación de la temperatura media obtenidos en el análisis pueden ser considerados como valores característicos para cada una de las estaciones meteorológicas.

El hecho de que la diferencia de temperaturas medias pueda sobrepasar el rango de variación característico de dicha temperatura a lo largo de la vida útil de la estructura se presenta cuando la temperatura ambiente máxima o mínima se encuentre muy próxima a la máxima o mínima absoluta registrada a lo largo del período de retorno y cuando el resto de parámetros climatológicos -radiación solar, número de horas de sol y velocidad de viento- actúen en el mismo sentido desfavorable; es decir, que en el mes de máxima temperatura ambiente media mensual, la intensidad de radiación solar sea máxima, el número de horas de sol sea mínimo y la velocidad del viento sea mínima y viceversa en el mes de mínima temperatura ambiente media mensual. Ello, como puede intuirse, presenta una probabilidad de aparición ciertamente reducida.

Gradiente térmico vertical

Como ya se expuso con anterioridad en el subapartado 2.3.2 del segundo capítulo de esta tesis, el conocimiento del día del año, del factor de turbidez de la atmósfera y de la latitud y altitud del lugar de emplazamiento del puente permitan evaluar de forma analítica la intensidad de radiación solar incidente sobre el tablero del puente.

Del análisis de los resultados derivados de los estudios paramétricos presentados en el capítulo anterior se extraía la conclusión de que, de los cuatro parámetros mencionados en el párrafo anterior, era la altitud el parámetro que mostraba una menor influencia sobre el valor alcanzado por el gradiente térmico. La latitud sí mostraba una influencia apreciable; no obstante, dicho parámetro de emplazamiento presenta en la Península Ibérica un rango de variación cercano a los 8°, rango muy reducido con respecto al contemplado en los estudios paramétricos -entre 10° N y 60° N-.

En base a estos comentarios, parece lógico pensar que el parámetro o parámetros climatológicos a contemplar para poder definir el gradiente térmico mediante su valor característico sean el día del año y el factor de turbidez, o lo que es lo mismo, la radiación solar global y el número de horas de sol que son, precisamente, los datos aportados por las publicaciones del Instituto Nacional de Meteorología. En concreto, para la obtención del valor característico del gradiente térmico en cada una de las estaciones meteorológicas contempladas, nos situaremos temporalmente en el mes para el cual se registre la máxima radiación solar global media mensual y el máximo número medio mensual de horas de sol.

La metodología seguida para la definición de esta acción térmica en cada una de las estaciones meteorológicas ha sido la siguiente:

- Obtención del mes del año para el cual la radiación solar global media mensual es máxima.
- Obtención para dicho mes de la temperatura ambiente media mensual \bar{T} .
- Obtención del rango de variación medio mensual de la temperatura ambiente $\bar{T}_M - \bar{T}_m$.

- El número de horas de sol y velocidad de viento a introducir como datos son los correspondientes valores medios mensuales registrados en cada una de las estaciones metereológicas para el mes de radiación solar global media mensual máxima.

El actuar de esta forma permite definir, de nuevo, la acción térmica resultante mediante su valor característico. Observando la figura 4.2, la probabilidad de que el gradiente térmico vertical supere el valor característico se sitúa próxima al valor de 0.05 puesto que, inicialmente, la relación de 1 a 12 meses es de 0.083 y por otra parte, se adopta como valor de la intensidad de radiación solar a introducir en el análisis el valor medio mensual lo que hace que la relación anterior se vea reducida a un valor de 0.042.

El que el gradiente térmico supere el valor característico ocurrirá en presencia de unas condiciones extremas, favorables para ello. Dichas condiciones vendrán determinadas por la existencia de un máximo rango diario de la temperatura ambiente, de una mínima velocidad de viento y la presencia de un pico funcional en la evolución de la intensidad de radiación solar incidente sobre el tablero del puente.

Otras acciones térmicas

Para el resto de las posibles acciones térmicas en puentes de hormigón -gradientes térmicos verticales negativos, gradientes horizontales y diferencias de temperatura entre el interior de las células y el ambiente exterior- no se vislumbra de forma tan clara una posible correlación entre dichas acciones térmicas y un determinado parámetro climático.

Por dicha razón, los valores asignados a tales acciones, derivados de los pertinentes estudios y análisis, no atienden, desde un punto de vista conceptual, a la definición

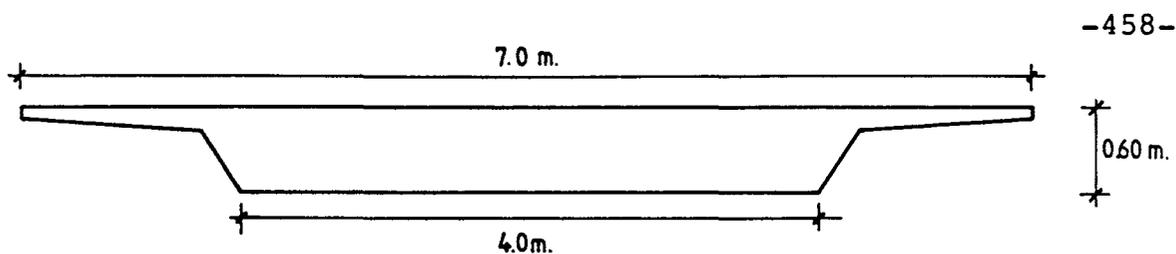
propia de valor característico. No obstante, a falta de otros datos y dada la dificultad de llevar a cabo mediciones experimentales, por un lado, de intensidad de radiación solar incidente sobre los paramentos laterales de los puentes en función de la latitud y el azimut y de radiación de onda larga emitida por el puente en horas nocturnas o de madrugada y, por otro, de variaciones de temperatura en el interior de las células, los valores que se propondrán a lo largo del presente capítulo para dichas acciones sí se cree son representatiuvos de los fenómenos térmicos existentes y deberían ser considerados en el diseño y análisis de las estructuras de los puentes de hormigón.

Hechos estos comentarios se pasa, a continuación, a obtener las posibles reglas o fórmulas de diseño que permitan conocer las acciones térmicas a considerar en el diseño de los puentes de hormigón para las tipologías transversales comúnmente adoptadas.

4.2.3.- Puentes losa maciza

Un estudio exhaustivo de esta tipología transversal llevaría consigo el analizar diferentes secciones transversales con cantos distintos, con diferentes anchos de tablero y con sección concentrada o no concentrada para todas las estaciones meteorológicas presentadas en la figura 4.1. Sin embargo, esta manera de proceder haría prácticamente inviable la interpretación de resultados.

Por ello, la metodología seguida ha sido otra bien diferente. Así, para obtener las acciones térmicas a considerar en el diseño de puentes losa maciza se ha adoptado, en un principio, una sección transversal de referencia la cual se muestra en la figura 4.4.



mallá de discretización $\Delta x = 0.20\text{m}$ $\Delta y = 0.06\text{ m}$

Fig. 4.4.- Sección transversal de referencia en el estudio de puentes losa maciza.

Dicha sección puede ser representativa del campo de luces que cubren los puentes de hormigón con tipología transversal de losa maciza. Sobre esta sección se realizarán los estudios correspondientes a cada una de las estaciones meteorológicas. Posteriormente, los resultados obtenidos serán corregidos en función de unos determinados factores de corrección relativos a los parámetros que presenten una mayor influencia sobre la respuesta térmica y, en concreto, sobre cada una de las acciones térmicas a obtener. Los valores que adoptarán los factores de corrección serán obtenidos a partir de los resultados derivados de los estudios paramétricos y de estudios posteriores en los que se obtendrá la respuesta térmica del puente en algunas de las estaciones meteorológicas variando el valor del parámetro pertinente.

4.2.3.1.- Variaciones anuales de la temperatura media

La tabla 4.2 muestra los valores de las temperaturas ambientes medias adoptadas para los dos meses de máxima y mínima temperatura ambiente media en cada una de las estaciones meteorológicas. En general, la primera de ellas tiene lugar en los meses de Julio o Agosto y la segunda en los meses de Diciembre o Enero. Recordemos que las temperaturas ambientes medias presentadas en la citada tabla son datos de partida en el análisis térmico y reflejan respectivamente la media mensual de las máximas y la media mensual de las mínimas. En esta misma tabla también se presentan los resultados derivados del análisis referentes al rango anual de la temperatura media del puente losa analizado, para cada una de las estaciones meteorológicas.

Estación metereológica	Temp. media ambiente mensual de máximas (°C)	Temp. media ambiente mensual de mínimas (°C)	Rango de variación anual de la temperatura media del puente (°C)
Coruña	22.7	6.7	19.4
Lugo	24.6	2.9	26.6
Finisterre	22.5	7.2	18.4
Santiago	23.9	4.2	23.8
Pontevedra	25.9	5.9	24.2
Vigo	24.3	7.0	21.5
Orense	27.8	3.8	29.6
Ponferrada	28.7	1.8	33.0
Gijón	22.7	6.2	20.3
Oviedo	22.7	3.1	24.1
Santander	22.2	6.5	19.2
Bilbao	25.0	4.6	24.5
San Sebastián	21.9	5.1	20.7
León	27.8	-1.1	34.5
Zamora	29.5	0.2	34.9
Palencia	28.8	-0.1	34.2
Burgos	25.9	-0.6	31.8
Valladolid	29.0	-0.3	34.6
Soria	27.4	-2.2	35.3
Salamanca	29.7	-0.6	36.0
Avila	27.1	-1.5	34.4
Segovia	29.4	-1.1	36.3
Navacerrada	21.9	-4.0	30.8
Madrid (Barajas)	33.0	0.2	39.0
Guadalajara	31.5	0.9	36.4
Molina de Aragón	28.9	-3.4	38.4
Toledo	33.2	1.7	37.3
Cuenca	30.2	-2.1	38.2
Ciudad Real	34.4	0.7	39.6

Tabla 4.2.- Valores del rango de variación anual de la temperatura ambiente introducido en el análisis térmico y del rango de variación anual de la temperatura media en puentes losa maciza de canto 0.60 metros.

Estación metereológica	Temp. media ambiente mensual de máximas (°C)	Temp. media ambiente mensual de mínimas (°C)	Rango de variación anual de la temperatura media del puente (°C)
Albacete	32.6	-0.9	39.5
Cáceres	33.5	4.0	35.3
Badajoz	34.0	4.3	35.8
Vitoria	25.4	1.3	28.7
Logroño	29.0	1.5	32.9
Pamplona	27.2	0.7	32.1
Huesca	30.3	0.1	35.7
Zaragoza	30.6	2.3	33.5
Lérida	32.0	0.6	37.0
Montseny	18.5	-2.7	25.7
Gerona	29.6	1.7	33.7
Barcelona	27.8	6.4	25.9
Tarragona	26.1	5.2	26.0
Tortosa	30.2	4.8	30.0
Castellón	28.7	5.8	27.8
Valencia	29.3	5.5	28.6
Alicante	32.2	5.9	31.3
Alcantarilla	33.3	3.7	35.0
San Javier	29.5	4.9	29.4
Sevilla	36.0	5.6	37.1
Córdoba	36.2	4.5	38.5
Jaén	34.4	4.6	36.1
Granada	34.4	1.2	39.3
Huelva	31.8	5.9	32.8
Cádiz	29.5	7.8	26.0
Tarifa	27.0	10.1	20.3
Málaga	30.4	7.7	27.2
Almería	29.0	7.9	25.4
Teruel	30.4	-2.6	38.8

Tabla 4.2 (cont.).- Valores del rango de variación anual de la temperatura ambiente introducido en el análisis térmico y del rango de variación anual de la temperatura media en puentes losa maciza de canto 0.60 metros.

Asimismo, mediante la aplicación del programa GEO.FOR, perteneciente a la biblioteca de programas del Centro de Cálculo de la E.T.S. de Ingenieros de Caminos de Barcelona, se ha podido obtener un mapa peninsular de las isolíneas de variación de la temperatura media del puente. Dicho mapa, que se presenta en la figura 4.5, es función directa de los valores del rango anual de la temperatura media del puente obtenidos en cada una de las estaciones metereológicas; la representación gráfica de las líneas de nivel se ha obtenido interpolando linealmente los valores de los rangos anuales de temperatura media del puente y cortando por planos horizontales.

En dicho mapa pueden apreciarse, de forma visible, cuatro regiones claramente diferenciadas:

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

Los rangos más elevados de variación anual de la temperatura media del puente ocurren en la zona de la meseta siendo la ciudad de Ciudad Real la que presenta el valor máximo absoluto de 39.60°C . Los valores de las isolíneas de variación anual de la temperatura media van disminuyendo a medida que nos acercamos hacia las zonas litorales de la Península Ibérica, descenso que es más acusado en la región gallega en donde para la estación de Finisterre se alcanza el valor mínimo absoluto -18.4°C y en la región cántabra, en donde se obtiene para la estación metereológica de Santander un valor del rango de variación anual de la temperatura media del puente de 19.2°C .

Por otra parte, también puede observarse en el mapa de isolíneas, determinadas zonas singulares que deben su aparición a la existencia de sistemas montañosos o de depresiones. Entre ellas caben destacarse las cuñas originadas en las zonas de Navacerrada -Sistema Central-, del Montseny -Cordillera Catalana-, de Sierra Nevada -Sistema Penibético- y de la depresión del Ebro.

Aunque las Islas Baleares no han sido contempladas en el estudio puede afirmarse, tal como se señala en las referencias bibliográficas del Instituto Nacional de Meteorología -Atlas Climático de España (47)- que su climatología es prácticamente idéntica a la del Levante peninsular. Por consiguiente, los resultados que de aquí se deriven para la zona levantina son aplicables al archipiélago balear.

Lógicamente, este mapa y los que a continuación se muestren en el presente capítulo son susceptibles de ser mejorados a medida que la red de estaciones meteorológicas extendidas a través de nuestro país sea más densa y las variables climatológicas y ambientales a registrar sean las máximas posibles (véase la inexistencia de estaciones meteorológicas próximas a la Cordillera de los Pirineos o a la frontera con Portugal).

A pesar de ello creo, en mi opinión, que el mapa de isolíneas de variación anual de la temperatura media mostrado en la figura 4.5 puede representar una útil herramienta para el diseño de los puentes de hormigón con tipología transversal de losa maciza frente a los efectos térmicos ambientales.

Por otra parte, es de interés el refundir toda la información proporcionada por el mapa en una serie de valores de diseño de la variación anual de la temperatura media que

atienden a la división de la Península Ibérica según las diferentes regiones climáticas (Atlas Climático de España (47)).

Dichas regiones, así como los correspondientes valores del rango anual de la temperatura media del puente a adoptar en diseño quedan recogidos en la tabla 4.3 y se presentan de forma gráfica en la figura 4.6.

Región climática	Rango anual de la temperatura media del puente (°C)
Zona litoral Norte del Cantábrico y de Galicia (I)	25.0
Zona prelitoral Norte del Cantábrico y de Galicia (II)	30.0
Zona Pirenaica (III)	25.0
Zona Centro Septentrional, Meseta Norte y Depresión Ebro (IV)	37.0
Zona Centro Meridional y Meseta Sur (V)	40.0
Zona Noreste (VI)	34.0
Levante e Islas Baleares (VII)	30.0
Zona Sudeste (VIII)	35.0
Zona litoral Sur (IX)	33.0

Tabla 4.3.- Valores de diseño del rango de variación anual de la temperatura media de puentes losa maciza según las diferentes regiones climáticas de la Península Ibérica.

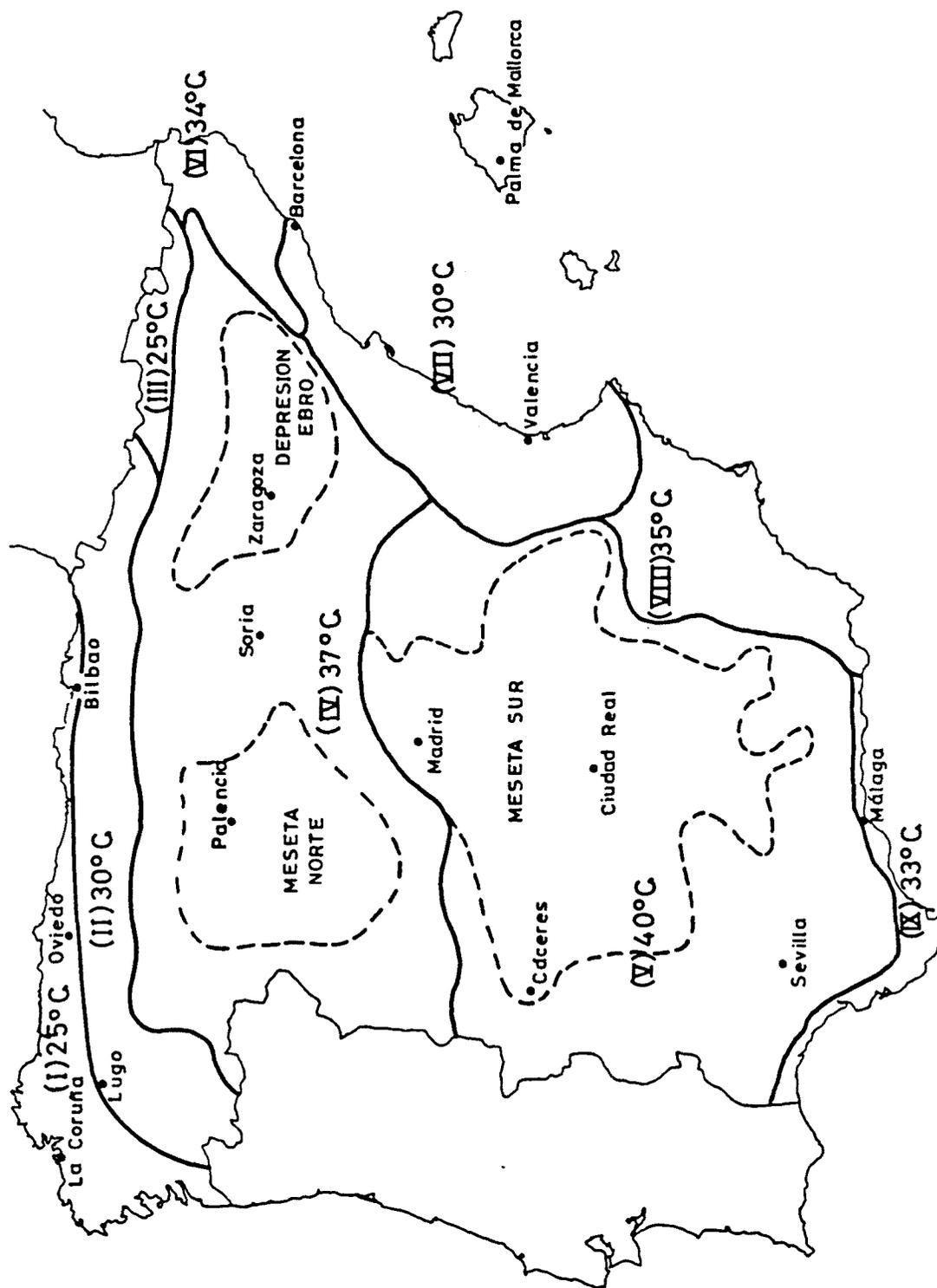


Fig. 4.6.- Mapa de valores de diseño del rango anual de la temperatura media de puentes losa maciza atendiendo a las diferentes regiones climáticas de la Península Ibérica.

Dichos valores de diseño corresponden a los valores máximos obtenidos en alguna de las estaciones metereológicas emplazadas en las distintas regiones climáticas y, por lo tanto, son valores que quedan del lado de la seguridad. Es obvio que, para ciertos emplazamientos del puente en algunas estaciones metereológicas, la adopción de estos valores de diseño presupone un mayor rango anual de temperatura media que el existente en la realidad. Podrían adoptarse para cada región climática los valores medios de todas las estaciones metereológicas; ello, no obstante, implicaría inmediatamente para algunas estaciones la no verificación del cuantil del 5% para la determinación del valor característico de la acción térmica. En cualquier caso, recordemos que una representación más fidedigna del valor característico de la acción térmica puede encontrarse en la tabla 4.2 o en el mapa de isolíneas de la figura 4.5.

Factores de corrección

Hasta este punto todos los valores obtenidos para el rango anual de la temperatura media en puentes losa maciza a tendían al estudio de la respuesta térmica de un puente con una sección transversal tipo, la cual se mostraba en la figura 4.4; se recuerda que sobre dicha sección no se disponía capa asfáltica de rodadura.

De los estudios paramétricos llevados a cabo a lo largo del desarrollo del capítulo anterior se deducían algunas conclusiones relativas a la influencia del espesor de la capa asfáltica sobre la respuesta térmica de los puentes de hormigón. La primera de ellas era que su influencia sobre los valores adoptados por el gradiente térmico y por la variación diaria de la temperatura media del puente era notable. No obstante, la influencia de dicho parámetro sobre la variación anual de la temperatura media es prácticamente despreciable puesto que la consideración de una capa asfáltica se traduce

en un aumento tanto de la temperatura media máxima como mínima alcanzadas por el puente a lo largo del año. Por lo tanto, su diferencia -la variación anual- se mantendrá prácticamente constante independientemente de si se dispone o no capa asfáltica de rodadura y no se introducirá ningún factor corrector relativo a este parámetro.

Del resto de variables o parámetros no contemplados en el análisis de forma intrínseca, sólo se analizará la influencia del canto de la sección por considerar que dicho parámetro geométrico es el definitorio de la tipología transversal de los puentes losa maciza. Por ello se han estudiado otras dos secciones transversales de cantos 0.30 metros y 0.90 metros en siete estaciones meteorológicas que cubren el territorio peninsular. Los resultados obtenidos se presentan en la tabla 4.4.

Variaciones anuales de la temperatura media en puentes losa maciza (°C)					
Estación meteorológica	h=0.30m		h=0.60m	h=0.90m	
	$\Delta T_{0.3}$	$\Delta T_{0.3}/\Delta T_{0.6}$	$\Delta T_{0.6}$	$\Delta T_{0.9}$	$\Delta T_{0.9}/\Delta T_{0.6}$
Finisterre	21.1	1.15	18.4	17.8	0.97
Navacerrada	34.5	1.12	30.8	29.7	0.96
Ciudad Real	44.5	1.12	39.6	38.3	0.97
Vitoria	32.1	1.12	28.7	27.8	0.97
Barcelona	29.2	1.13	25.9	24.9	0.96
San Javier (Murcia)	33.2	1.13	29.4	28.2	0.96
Sevilla	41.8	1.13	37.1	35.6	0.96

Tabla 4.4.- Variaciones anuales de la temperatura media en puentes losa maciza para diferentes cantos de tablero en diversas estaciones meteorológicas.

Las estaciones metereológicas cubren diferentes regiones climáticas de nuestro país a diferentes altitudes y en zonas litorales, prelitorales e interiores. En dicha tabla puede observarse que los factores $\Delta T_{0.3} / \Delta T_{0.6}$ e $\Delta T_{0.9} / \Delta T_{0.6}$ se mantienen prácticamente constantes independientemente de la estación considerada.

Debido a ello, y dada la forma en cómo varía el rango anual de la temperatura media del puente losa maciza con el canto de la sección, es posible definir un factor corrector k_1 cuyo valor, en función del canto del tablero, se obtiene a través de la gráfica presentada en la figura 4.7.

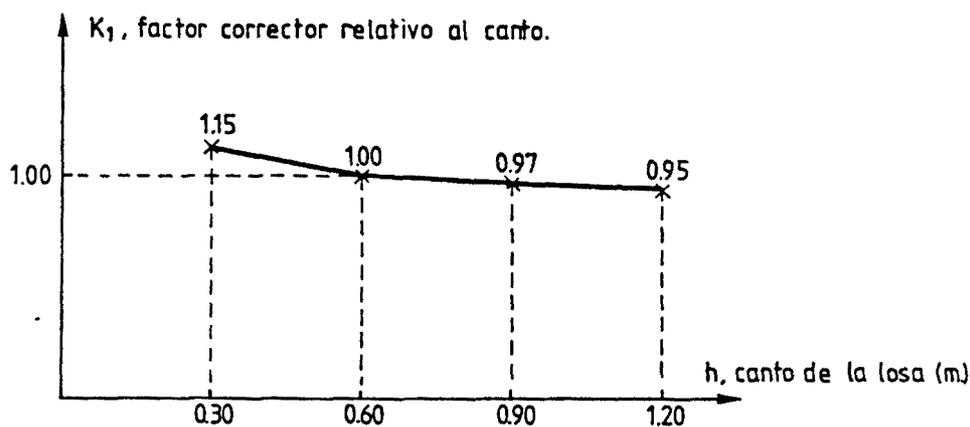


Fig. 4.7.- Factor de corrección k_1 relativo al canto del tablero para determinar la variación anual de la temperatura media en puentes losa maciza.

Para valores intermedios puede realizarse una sencilla interpolación lineal. Ello también será aplicable al conjunto de gráficas, relativas a otros factores de corrección, que se irán presentando a lo largo del desarrollo de este capítulo.

En este momento, puede ser de interés el analizar comparativamente los resultados del rango anual de la temperatu-

ra media del puente derivados del presente estudio con el que prescribe la normativa española vigente ((31), (68)).

En la tabla 4.5 se presentan los valores del rango anual de temperatura media para puentes losa maciza de canto 0.30 metros, 0.60 metros y 0.90 metros.

Canto (m)	$\Delta T = \pm (20 - 0.75 \sqrt{e})$ (°C)	$\Delta T_h / \Delta T_{0.60}$
0.30	31.8	1.12
0.60	28.4	1.00
0.90	25.8	0.91

Tabla 4.5.- Valores del rango anual de la temperatura media en puentes losa maciza obtenidos según la normativa vigente ((68)).

Como puede apreciarse en dicha tabla, los valores del cociente $\Delta T_h / \Delta T_{0.60}$ se encuentran relativamente próximos a los valores propuestos en la figura 4.7. De ello se deduce que la influencia del espesor ficticio -en puentes losa maciza aproximadamente igual al canto de la sección- sobre el valor del rango anual de la temperatura media se ve reflejada de forma fiel en la expresión propuesta por la normativa vigente.

No obstante, si comparamos los valores del rango prescrito por la normativa con los derivados del presente estudio, se observan diferencias ciertamente relevantes. Dichas diferencias son debidas al conjunto de factores que influyen sobre la respuesta térmica del puente y que han sido contemplados, de forma intrínseca, en este estudio. A saber, por orden de importancia:

- Rango anual de la temperatura ambiente media en el lugar de emplazamiento del puente.

- Intensidad de radiación solar incidente sobre el tablero en el lugar de emplazamiento del puente para los meses de máxima y mínima temperatura ambiente media.
- Velocidad del viento en el lugar de emplazamiento del puente.

Así, es de destacar el hecho de que un puente losa maciza de canto 0.60 metros emplazado en lugares próximos a los observatorios meteorológicos de Finisterre y Ciudad Real presentaría un rango anual de su temperatura media de 18.4°C y 39.6°C respectivamente mientras que el rango prescrito por la normativa española vigente sería de 28.4°C.

En resumen puede concluirse que, si bien la expresión actual de la normativa relativa a la variación anual de la temperatura media refleja de forma más o menos fiel la influencia del espesor ficticio de la pieza sobre el valor de dicha variación, tal expresión no contempla la diversidad de climas existentes en nuestro país, diversidad que, para esta acción térmica, viene delimitada fundamentalmente por el rango anual de la temperatura ambiente media en el lugar de emplazamiento del puente. Ello, en mi opinión, debería ser considerado en el diseño de los puentes de hormigón frente a la acción térmica.

Metodología

En base a todo lo expuesto con anterioridad, la metodología a seguir de cara a la obtención de la variación anual de la temperatura media de un puente losa maciza será la siguiente:

- Situación del lugar de emplazamiento del puente.

- Obtención para dicho lugar del rango anual de la temperatura media del puente en base a lo representado en el mapa de isolíneas de variación de la temperatura media mostrado en la figura 4.5 o en base a los valores recogidos en la tabla 4.3, dependientes éstos de las diferentes regiones climáticas de la Península Ibérica.
- Obtención del factor de corrección k_1 en función del canto del tablero del puente, según la gráfica de la figura 4.7.
- La variación de la temperatura media del puente a considerar en diseño será:

$$\Delta T = k_1 \cdot \Delta T_{\text{referencia}} \quad |4.1|$$

4.2.3.2.- Gradientes térmicos

Como ya se expuso en el subapartado 4.2.2 del presente capítulo, la determinación del valor característico de esta acción térmica necesita, fundamentalmente, del conocimiento de dos parámetros climatológicos: la radiación solar y el número de horas de sol.

La tabla 4.6, que se presenta a continuación, muestra los valores de la radiación solar global media mensual y el número de horas de sol media mensual a introducir en el análisis térmico, correspondientes al mes más desfavorable a lo largo del año para cada una de las estaciones meteorológicas contempladas. En general, para dichos meses y para cada una de las estaciones meteorológicas contempladas, ambos máximos se presentan de forma concomitante.

Cuando ello no ocurra así, es preciso contemplar en el análisis los dos meses que podrían presentar condiciones más

desfavorables de cara a la obtención del gradiente térmico. Dichos meses siempre son los meses de Junio o Julio.

Hay que tener bien presente que a igualdad de radiación solar incidente sobre el tablero de un puente de hormigón es el número de horas de sol el que determina la situación más desfavorable; así, el mes con menor número de horas media mensual induce mayores gradientes térmicos y ello se intuye fácilmente ya que el calentamiento de las fibras superiores tiene lugar de forma súbita mientras que en el caso de que el número de horas de sol sea más elevado dicho calentamiento ocurre de forma lenta y progresiva sufriendo la temperatura en las fibras interiores del tablero un ligero ascenso que hace que el gradiente térmico vertical positivo sea algo menor.

Conviene destacar por otra parte que, en general, las máximas temperaturas medias de los puentes no son concomitantes con los gradientes térmicos verticales de diseño ya que éstos se inducen en los meses de Junio y Julio y las primeras en los meses de Agosto, y Julio en algunos casos.

En la citada tabla 4.6 también se presentan los gradientes térmicos verticales obtenidos para el puente losa maciza de canto 0.60 metros.

Los resultados de gradiente presentados en esta tabla se muestran de forma gráfica en el mapa de la figura 4.8. En éste quedan reflejadas las isolíneas del gradiente térmico vertical a considerar en el diseño de los puentes losa maciza de canto 0.60 metros para la España peninsular. La forma en cómo se han obtenido dichas líneas de nivel es exactamente idéntica a la llevada a cabo a la hora de obtener las isolíneas de variación anual de la temperatura media del puente.

Estación metereológica	Radiación so lar global media mensual ($\frac{Wh}{m^2}$)	Número de horas media mensual	Gradiente tér mico vertical lineal (°C)
Coruña	5400.	8.6	7.9
Lugo	6000.	8.4	12.4
Finisterre	5600.	8.4	7.8
Santiago	5600.	10.4	9.4
Pontevedra	5900.	10.6	10.7
Vigo	6000.	10.6	10.9
Orense	6200.	8.4	14.1
Ponferrada	7000.	11.6	13.4
Gijón	5100.	6.6	10.9
Oviedo	4800.	6.2	12.7
Santander	5700.	6.8	12.0
Bilbao	5800.	6.4	12.6
San Sebastián	6200.	7.0	12.8
León	6800.	12.2	11.4
Zamora	7400.	12.6	11.0
Palencia	6800.	12.0	10.4
Burgos	6800.	11.4	11.9
Valladolid	6800.	11.8	10.5
Soria	7200.	11.2	11.5
Salamanca	7200.	12.0	11.0
Avila	7600.	12.4	12.6
Segovia	7500.	11.6	12.9
Navacerrada	7700.	12.2	10.7
Madrid (Barajas)	7800.	12.4	12.8
Guadalajara	7700.	10.8	13.7
Molina de Aragón	6800.	11.0	12.1
Toledo	7700.	12.0	12.9
Cuenca	6800.	12.0	11.5
Ciudad Real	7200.	12.4	10.8

Tabla 4.6.- Valores del gradiente térmico lineal vertical positivo en puentes losa maciza de canto 0.60 metros.

Estación meteorológica	Radiación so- lar global media mensual ($\frac{Wh}{m^2}$)	Número de horas media mensual	Gradiente tér- mico vertical lineal (°C)
Albacete	7600.	11.8	11.7
Cáceres	7800.	12.6	12.7
Badajoz	7800.	12.6	12.7
Vitoria	6100.	7.6	13.3
Logroño	7100.	9.8	12.2
Pamplona	6800.	9.8	14.3
Huesca	7200.	11.4	11.3
Zaragoza	7400.	11.6	10.5
Lérida	7300.	11.2	11.6
Montseny	7000.	9.6	12.3
Gerona	7100.	9.8	13.4
Barcelona	6800.	10.0	11.5
Tarragona	7400.	10.8	13.2
Tortosa	7400.	10.2	12.4
Castellón	7100.	10.8	12.6
Valencia	7000.	10.6	12.6
Alicante	7300.	11.6	11.3
Alcantarilla	7600.	11.4	13.1
San Javier	7200.	11.8	11.1
Sevilla	7700.	11.6	16.4
Córdoba	7600.	11.6	16.2
Jaén	7600.	11.4	16.4
Granada	7400.	11.8	12.6
Huelva	8000.	11.2	17.4
Cádiz	7000.	12.2	10.6
Tarifa	7000.	11.2	8.1
Málaga	7400.	12.0	11.3
Almería	7400.	11.8	11.4
Teruel	6800.	11.2	10.9

Tabla 4.6 (cont.).- Valores del gradiente térmico lineal vertical posi-
tivo en puentes losa maciza de canto 0.60 metros.

En dicho mapa no se aprecian, como en el mapa de variaciones anuales de la temperatura media, regiones claramente diferenciadas por lo que es difícil zonificar la España peninsular y definir valores de gradiente de diseño a considerar según diferentes regiones climáticas.

Las áreas geográficas en donde los gradientes térmicos a considerar en puentes losa maciza son más elevados se sitúan en la cuenca del río Guadalquivir -gradiente en torno a los 16°C -, en la zona centro cercana a las provincias de Madrid, Toledo y Guadalajara -gradiente próximo a los 13°C - y en determinadas zonas singulares como son las áreas próximas a las ciudades de Orense y Pontevedra, para las cuales los gradientes térmicos presentan valores cercanos a los 14°C .

Las zonas de mínimos se sitúan a lo largo de todo el litoral peninsular -a excepción de la provincia de Huelva- presentándose éstos en las estaciones meteorológicas de Finisterre -7.8°C -, La Coruña -7.9°C -, Santiago -9.4°C y Tarifa -8.1°C -. También se observan zonas singulares de mínimos como son las áreas geográficas próximas a los sistemas montañosos -Navacerrada-, a la depresión del Ebro -provincia de Zaragoza- y a la meseta Norte, en torno a la ciudad de Palencia.

De nuevo hay que incidir en que lo que se concluya para la zona del Levante peninsular es perfectamente válido para las Islas Baleares.

A continuación se presentan dos posibles formas de obtener el gradiente térmico a considerar en el diseño de puentes losa maciza. La primera de ellas tiene como base de partida el mapa de isolíneas del gradiente térmico mostrado en la figura 4.8. La segunda adopta un gradiente inicial de referencia medio peninsular suponiendo una velocidad de viento en todas las estaciones meteorológicas igual a una velocidad

media peninsular que se encuentra muy próxima a los 4.0 m/seg (Atlas Climático de España (47)). Para cada una de estas posibles formas de abordar el problema se obtendrán los pertinentes factores de corrección y se expondrán con detalle las metodologías a seguir en cada una de ellas.

Obtención del gradiente térmico de diseño en puentes losa maciza a partir del mapa peninsular de isolíneas de gradiente.

Factores de corrección

En lo que respecta a la influencia de la geometría de la sección se tendrá en cuenta solamente la corrección que atiende al canto del tablero puesto que es éste el único parámetro geométrico que muestra una influencia apreciable sobre el valor alcanzado por el gradiente térmico. La tabla 4.7 recoge los valores de los gradientes térmicos inducidos en puentes losa maciza de canto 0.30 metros y 0.90 metros para diferentes estaciones meteorológicas las cuales cubren de forma sobrada la variada climatología existente en nuestro país.

Los valores presentados en esta tabla se han obtenido imponiendo unas condiciones de velocidad de viento iguales a la existente en cada una de las estaciones meteorológicas contempladas en este estudio.

En resumen, en base a estos resultados, es posible definir un factor corrector k_2 que tenga en cuenta la influencia del canto h y cuyo valor, en función de dicho parámetro geométrico, puede obtenerse de la gráfica que se muestra en la figura 4.9.

Gradientes térmicos G en puentes losa maciza (°C)					
Estación metereológica	h=0.30 m		h=0.60 m	h=0.90 m	
	$G_{0.3}$	$G_{0.3}/G_{0.6}$	$G_{0.6}$	$G_{0.9}$	$G_{0.9}/G_{0.6}$
Finisterre	10.3	1.32	7.8	6.3	0.81
Ponferrada	16.3	1.22	13.4	11.3	0.84
Salamanca	13.5	1.23	11.0	9.2	0.84
Navacerrada	13.0	1.21	10.7	8.9	0.83
Ciudad Real	13.0	1.20	10.8	9.0	0.83
Badajoz	15.3	1.20	12.7	10.7	0.84
Pamplona	18.1	1.27	14.3	11.9	0.83
Zaragoza	13.0	1.24	10.5	8.7	0.83
Gerona	17.0	1.27	13.4	11.1	0.83
Castellón	15.7	1.25	12.6	10.5	0.83
Alcantarilla	16.1	1.23	13.1	11.0	0.84
Sevilla	19.9	1.21	16.4	14.0	0.85
Málaga	13.7	1.21	11.3	9.4	0.83

Tabla 4.7.- Valores de los gradientes térmicos inducidos en puentes losa maciza para diferentes cantos de tablero en diversas estaciones metereológicas.

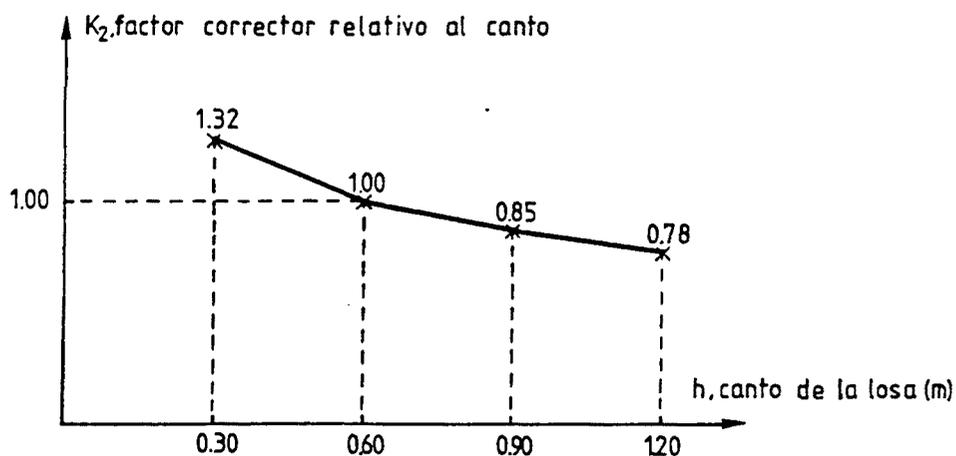


Fig. 4.9.- Factor de corrección k_2 relativo al canto del tablero para determinar el gradiente térmico en puentes losa maciza.

Por último, de todos los parámetros analizados en los estudios paramétricos presentados en el capítulo anterior que mostraban influencia sobre el valor del gradiente térmico, sólo resta contemplar en este estudio la influencia del espesor de capa asfáltica. En efecto se llegaba a la conclusión de que cuanto menor fuera éste mayor era el valor del gradiente térmico. Por otra parte, se apreciaba un cierto espesor de capa asfáltica por encima del cual los gradientes térmicos eran inferiores al obtenido en el caso de que se analizara la respuesta térmica del mismo puente losa maciza sin asfalto.

La tabla 4.8 muestra los valores del gradiente térmico inducido en puentes losa maciza con diferente canto y diferente espesor de capa asfáltica emplazados en diversas estaciones meteorológicas las cuales son representativas de la variada geografía y climatología de nuestro país.

A la vista de los resultados presentados en esta tabla puede concluirse que la influencia del espesor de capa asfáltica depende del canto del tablero del puente losa analizado. Efectivamente, puede observarse que cuanto mayor es el canto del tablero mayor es el espesor umbral o equivalente -se entiende por espesor equivalente de asfalto aquel espesor para el cual el gradiente térmico inducido en el puente losa maciza es igual al gradiente térmico inducido en el caso de que no se dispusiera capa asfáltica de rodadura.

De ahí es que el factor corrector relativo al espesor de asfalto debe presentarse como función paramétrica del canto del tablero del puente losa maciza.

		Gradientes térmicos G en puentes losa maciza (°C)								
Estación metereológica	h=0.30 m			h=0.60 m			h=0.90 m			
	Espesor capa asfáltica (cm)			Espesor capa asfáltica (cm)			Espesor capa asfáltica (cm)			
	5.0	7.5	10.0	5.0	7.5	10.0	5.0	7.5	10.0	
Finisterre	9.8	7.0	4.9	8.5	6.6	5.0	7.6	6.1	4.8	
Navacerrada	13.1	9.7	7.0	12.5	9.9	7.7	11.4	9.3	7.6	
Ciudad Real	12.2	8.4	6.7	12.2	9.2	6.8	11.4	9.0	7.0	
Badajoz	15.6	11.6	8.5	15.1	12.0	9.4	14.0	11.4	9.3	
Pamplona	19.0	14.2	10.5	17.2	13.6	10.7	15.7	12.8	10.4	
Zaragoza	12.5	8.9	6.2	11.9	9.2	7.0	11.0	8.8	7.0	
Castellón	16.9	13.1	10.1	15.4	12.5	10.1	13.9	11.6	9.6	
San Javier	14.2	10.8	8.1	13.3	10.7	8.5	12.0	10.0	8.2	
Sevilla	21.7	16.6	12.6	20.4	16.5	13.3	18.9	15.7	13.0	

Tabla 4.8.- Valores del gradiente térmico en puentes losa maciza con diferente canto y diferente espesor de capa asfáltica emplazados en diversas estaciones metereológicas.

La tabla 4.9 muestra los valores del cociente entre el gradiente térmico con espesor variable de asfalto y el gradiente térmico sin asfalto para los diferentes cantos de tableros analizados y en las diversas estaciones metereológicas contempladas en el estudio.

A tenor de estos resultados el factor de corrección k_3 relativo al espesor de capa asfáltica puede obtenerse a partir de las gráficas presentadas en la figura 4.10, cada una de las cuales corresponde a un determinado canto del tablero del puente losa maciza.

Estación meteorológica	<u>(Gradiente térmico) con espesor de asfalto</u>								
	<u>(Gradiente térmico) sin asfalto</u>								
	h=0.30 m			h=0.60 m			h=0.90 m		
	Espesor asfalto (cm)			Espesor asfalto (cm)			Espesor asfalto (cm)		
	5.0	7.5	10.0	5.0	7.5	10.0	5.0	7.5	10.0
Finisterre	0.95	0.68	0.48	1.09	0.85	0.64	1.21	0.97	0.76
Navacerrada	1.01	0.75	0.54	1.17	0.93	0.72	1.28	1.04	0.85
Ciudad Real	0.94	0.65	0.52	1.13	0.85	0.63	1.27	1.00	0.78
Badajoz	1.02	0.76	0.56	1.19	0.94	0.74	1.31	1.07	0.87
Pamplona	1.05	0.78	0.58	1.20	0.95	0.75	1.32	1.08	0.87
Zaragoza	0.96	0.68	0.48	1.13	0.88	0.67	1.26	1.01	0.80
Castellón	1.08	0.83	0.64	1.22	0.99	0.80	1.32	1.10	0.91
San Javier	1.04	0.79	0.60	1.20	0.96	0.77	1.30	1.09	0.89
Sevilla	1.09	0.83	0.63	1.24	1.01	0.81	1.35	1.12	0.93

Tabla 4.9.- Relaciones existentes entre los gradientes térmicos con y sin asfalto para diferentes cantos de tablero en diversas estaciones meteorológicas.

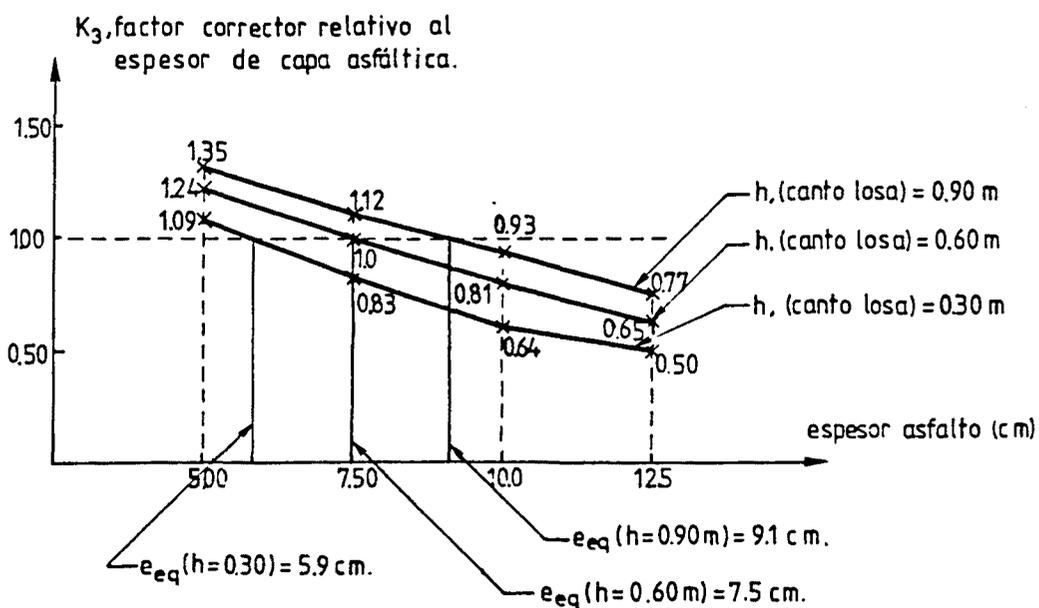


Fig. 4.10.- Factor de corrección k_3 relativo al espesor de capa asfáltica para determinar el gradiente térmico en puentes losa maciza.

Metodología

La metodología a seguir para determinar el valor del gradiente térmico a considerar en el diseño de puentes losa maciza tomando como base de partida el mapa de isolíneas de gradiente será la siguiente:

- Situación del lugar de emplazamiento del puente.
- Obtención para dicho lugar del gradiente térmico en base a lo representado en el mapa de isolíneas de gradiente térmico mostrado en la figura 4.8. Recordemos que en dicho mapa se recoge de forma implícita la velocidad de viento media mensual existente en el lugar de emplazamiento del puente.
- Obtención de los factores de corrección relativos al canto del tablero k_2 y el espesor de la capa asfáltica k_3 , si ésta existe, a partir de las gráficas mostradas en las figuras 4.9 y 4.10 respectivamente.
- El gradiente térmico a considerar en diseño será:

$$\text{GRAD} = k_2 \cdot k_3 \cdot \text{GRAD}_{\text{referencia}} \quad |4.2|$$

Obtención del gradiente térmico de diseño en puentes losa maciza a partir de un gradiente medio peninsular de referencia

Después de observar los resultados presentados en la tabla 4.6 y en el mapa de isolíneas de la figura 4.8 es conveniente destacar que la velocidad de viento muestra influencia sobre el valor adoptado por el gradiente térmico. Así por ejemplo, para las estaciones meteorológicas de Palencia y Cuenca se han registrado idénticas radiaciones solares medias mensuales e idénticos números medios mensuales de horas de sol y, sin embargo, los gradientes obtenidos han sido respectivamente de 10.4°C y 11.5°C. Dicha diferencia no es achacable al rango de variación de la temperatura ambiente en el

mes del análisis puesto que dicho rango es el mismo en ambos casos. Por lo tanto, la diferencia existente entre los gradientes térmicos anteriormente señalada se debe al valor de la velocidad de viento media considerada en el análisis.

Ello nos conduce a la idea de que, si se quisiera definir un gradiente térmico común a todo el territorio peninsular y balear, podría ser de interés el adoptar para todas las estaciones metereológicas idéntica velocidad de viento media mensual. De los resultados obtenidos podría derivarse un gradiente térmico medio, gradiente que debería verse corregido en función de la velocidad del viento en el lugar de emplazamiento del puente. Esta forma de actuar presenta una ventaja importante puesto que permitiría considerar en diseño determinadas zonas geográficas que presentan altas velocidades de viento -valles, montañas- o bajas velocidades de viento -puentes urbanos- que no pueden quedar contempladas en un análisis global de la Península Ibérica.

En la tabla 4.10 se muestran las velocidades de viento correspondientes a cada una de las estaciones metereológicas contempladas. Como puede observarse, el rango de variación de dicho parámetro climatológico es reducido apareciendo la máxima velocidad de viento media mensual en las estaciones de Finisterre y Tarifa -9.0 m/seg- y la mínima en las estaciones metereológicas próximas a la cuenca del río Guadalquivir -2.0 m/seg-.

En base a estos datos puede adoptarse una velocidad de viento media mensual de 4.0 m/seg para todo el territorio peninsular y balear. Los resultados de los gradientes térmicos de puentes emplazados en todas las estaciones metereológicas imponiendo los coeficientes de convección correspondientes a la velocidad de viento media peninsular de 4.0 m/seg pueden observarse también en la tabla 4.10.

Estación metereológica	Velocidad de viento en la estación (m/sg)	Gradiente térmico G (v=4.0m/sg)	$\frac{(G)_{v=v_{estación}}}{(G)_{v=4.0m/sg}}$
Coruña	8.0	11.0	0.72
Lugo	4.0	12.4	1.00
Finisterre	9.0	11.6	0.67
Santiago	5.0	10.4	0.90
Pontevedra	4.0	10.7	1.00
Vigo	4.0	10.9	1.00
Orense	3.0	12.7	1.11
Ponferrada	3.0	12.1	1.11
Gijón	5.0	11.9	0.92
Oviedo	3.0	11.6	1.09
Santander	5.0	13.1	0.92
Bilbao	5.0	13.7	0.92
San Sebastián	5.0	14.0	0.91
León	4.0	11.4	1.00
Zamora	5.0	12.2	0.90
Palencia	5.0	11.5	0.90
Burgos	4.0	11.9	1.00
Valladolid	5.0	11.6	0.91
Soria	5.0	12.7	0.91
Salamanca	5.0	12.2	0.90
Avila	4.0	12.6	1.00
Segovia	4.0	12.9	1.00
Navacerrada	6.0	12.9	0.83
Madrid (Barajas)	4.0	12.8	1.00
Guadalajara	4.0	13.7	1.00
Molina de Aragón	4.0	12.1	1.00
Toledo	4.0	12.9	1.00
Cuenca	4.0	11.5	1.00
Ciudad Real	5.0	11.9	0.91

Tabla 4.10.- Valores de los gradientes térmicos en puentes losa maciza de canto 0.60 metros adoptando una velocidad de viento igual a la media peninsular de 4.0m/seg en cada una de las estaciones metereológicas.

Estación metereológica	Velocidad de viento en la estación (m/sg)	Gradiente término G (v=4.0m/sg)	$\frac{(G)_{v=v_{estación}}}{(G)_{v=4.0m/sg}}$
Albacete	5.0	12.9	0.91
Cáceres	4.0	12.7	1.00
Badajoz	4.0	12.7	1.00
Vitoria	4.0	13.3	1.00
Logroño	5.0	13.4	0.91
Pamplona	3.0	12.9	1.11
Huesca	5.0	12.5	0.90
Zaragoza	6.0	12.7	0.83
Lérida	5.0	12.8	0.91
Montseny	5.0	13.5	0.91
Gerona	4.0	13.4	1.00
Barcelona	5.0	12.6	0.91
Tarragona	4.0	13.2	1.00
Tortosa	5.0	13.6	0.91
Castellón	4.0	12.6	1.00
Valencia	4.0	12.6	1.00
Alicante	5.0	12.5	0.90
Alcantarilla	4.0	13.1	1.00
San Javier	5.0	12.2	0.91
Sevilla	2.0	13.1	1.25
Córdoba	2.0	13.0	1.25
Jaén	2.0	13.1	1.25
Granada	4.0	12.6	1.00
Huelva	2.0	13.9	1.25
Cádiz	5.0	11.6	0.91
Tarifa	9.0	12.2	0.66
Málaga	5.0	12.4	0.91
Almería	5.0	12.5	0.91
Teruel	5.0	12.0	0.91

Tabla 4.10 (cont).- Valores de los gradientes térmicos en puentes losa maciza de canto 0.60 metros adoptando una velocidad de viento igual a la media peninsular de 4.0m/seg en cada una de las estaciones metereológicas.

Analizando estos resultados puede adoptarse un gradiente térmico medio de referencia de 12.5°C para todo el territorio nacional. Dicho gradiente es la media de los valores de los gradientes inducidos en el puente losa maciza emplazado en cada una de las estaciones metereológicas obteniéndose un valor de 0.78°C para la desviación típica.

Factores de corrección

A la vista de los valores de la relación existente entre los gradientes obtenidos considerando la velocidad de viento correspondiente a cada una de las estaciones metereológicas y la velocidad de viento de 4.0 m/seg, media peninsular, los cuales se presentan en la tabla 4.10, puede obtenerse el valor del factor de corrección a aplicar para contemplar la influencia de la velocidad del viento en el gradiente térmico. Los valores que adopta dicho factor corrector k_4 en función del parámetro climatológico pueden obtenerse a partir de la gráfica presentada en la figura 4.11.

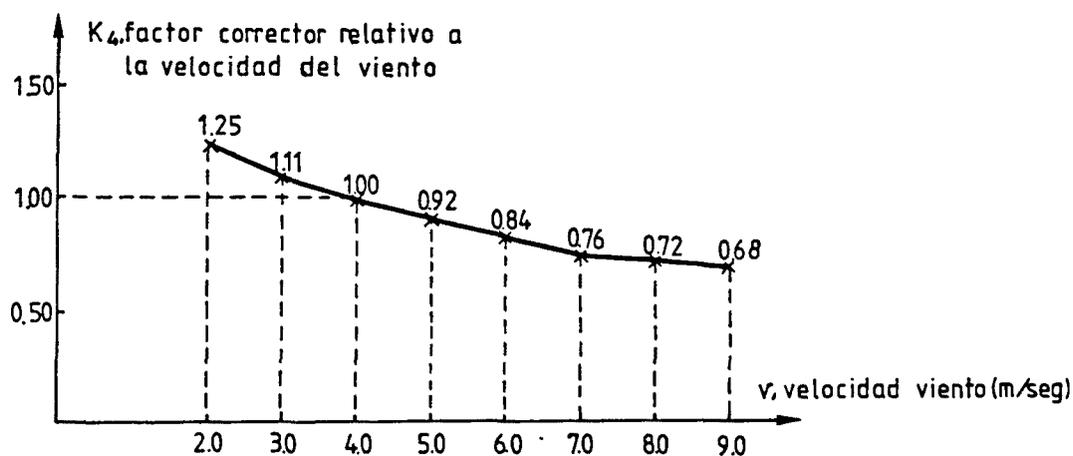


Fig. 4.11.- Factor de corrección k_4 relativo a la velocidad del viento a considerar en la determinación del gradiente térmico en puentes losa maciza mediante el método simplificado.

La adopción de este método simplificado para la determinación del gradiente de diseño en puentes losa maciza introduce ciertos errores que, a continuación, se van a evaluar.

A modo de ejemplo, sea un puente losa maciza de canto 0.60 metros emplazado en un lugar próximo a la estación meteorológica de Sevilla en donde la velocidad del viento es de 2.0 m/seg. El gradiente térmico, obtenido de forma exacta a partir del mapa de isolíneas, es de 16.4°C. Aplicando el método simplificado el gradiente térmico a considerar en diseño vendría determinado por el valor del gradiente medio peninsular de 12.5°C multiplicado por el valor del factor corrector correspondiente a la velocidad de viento que en este caso sería de 1.25. Dicho producto proporcionaría un gradiente de diseño de 15.6°C.

La diferencia existente entre ambos valores de diseño, originada por la adopción de un gradiente térmico medio peninsular de referencia, sería, para este caso, del 5%, diferencia ésta ciertamente reducida en diseño. Para poder cuantificar el error cometido de forma genérica se han analizado todas las estaciones meteorológicas apreciándose que el máximo error del lado de la inseguridad, con respecto al valor obtenido en cada observatorio mediante el método exacto, es del 10% y tiene lugar en la estación meteorológica de San Sebastián, error éste que en diseño, desde un punto de vista ingenieril, es totalmente aceptable. En cuanto a la posibilidad de que el gradiente obtenido mediante el método simplificado sea superior al existente en la estación meteorológica, los errores obtenidos son algo más elevados siendo el máximo error cometido del 22%, el cual tiene lugar para la estación meteorológica de Santiago.

La determinación del gradiente térmico de diseño mediante este método simplificado exige, al igual que en el método exacto anteriormente descrito, la consideración de los

factores de corrección relativos al canto del tablero y al espesor de capa asfáltica, si ésta existe. Dichos parámetros, como ya se ha visto en este capítulo y en el anterior, son los que presentan una mayor influencia sobre el gradiente térmico a considerar en el análisis y diseño de los puentes losa maciza.

La tabla 4.11 muestra los valores de los gradientes térmicos de puentes losa maciza con diferente canto y diferente espesor de capa asfáltica emplazados en diversas estaciones metereológicas imponiendo en cada una de ellas las condiciones de viento correspondientes a la media peninsular de 4.0 m/seg., de acuerdo con el planteamiento seguido en este segundo procedimiento de obtención del gradiente térmico de diseño.

Gradientes térmicos G en puentes losa maciza (°C) con v=4.0 m/seg											
Estación metereológica	h=0.30 m				h=0.60 m			h=0.90 m			
	Espesor asfalto (cm)				Espesor asfalto (cm)			Espesor asfalto (cm)			
	sin	5.0	7.5	10.0	5.0	7.5	10.0	sin	5.0	7.5	10.0
Finisterre	15.2	16.0	12.1	9.1	13.8	11.0	8.8	9.5	12.4	10.1	8.3
Ciudad Real	14.4	14.1	10.0	6.9	13.8	10.7	8.1	10.0	12.9	10.4	8.2
Badajoz	15.3	15.4	11.3	8.1	15.1	12.0	9.4	10.7	13.9	11.4	9.2
Zaragoza	15.6	16.0	11.9	8.8	15.1	12.0	9.4	10.6	13.8	11.3	9.2
Castellón	15.7	16.9	13.1	10.1	15.4	12.5	10.1	10.5	13.9	11.6	9.6
San Javier	16.1	16.2	11.8	8.4	15.4	12.1	9.3	11.0	14.2	11.5	9.2

Tabla 4.11.- Valores del gradiente térmico en puentes losa maciza con diferente canto y diferente espesor de asfalto emplazados en diversas estaciones metereológicas adoptando una velocidad de viento igual a la media peninsular de 4.0 m/seg.

A partir de los resultados presentados en esta tabla es posible definir el valor del factor de corrección relativo al canto del tablero obteniendo las diferentes relaciones existentes entre los valores de los gradientes térmicos correspondientes a cada canto del tablero para cada una de las estaciones metereológicas.

Los valores de dichos cocientes son prácticamente idénticos a los obtenidos adoptando como velocidad de viento en cada estación la existente en la realidad. Por consiguiente, el valor del factor de corrección k_2 relativo al canto del tablero se puede obtener directamente de la gráfica mostrada en la figura 4.9, expuesta con anterioridad.

Analicemos a continuación los valores obtenidos para el puente losa maciza con diferente espesor de capa asfáltica. Como puede apreciarse en la tabla 4.11 la influencia del espesor de asfalto sobre el valor del gradiente térmico es, de nuevo, dependiente del canto del tablero. Así, para cada canto del puente losa se obtiene un espesor equivalente que coincide con el obtenido al analizar la influencia de dicho parámetro sobre el gradiente térmico imponiendo en el análisis la velocidad de viento correspondiente a cada una de las estaciones metereológicas (ver figura 4.10). Por otra parte, los valores del factor de corrección k_3 relativo al espesor de asfalto y dependiente del canto coinciden en este estudio con los obtenidos en el estudio anterior.

Por consiguiente, se concluye que el valor del factor de corrección k_3 , que considera la influencia del espesor de capa asfáltica, puede obtenerse directamente mediante las gráficas presentadas en la figura 4.10.

Metodología

El método simplificado da una guía aproximada al proyectista de cara a la obtención del gradiente térmico a considerar en el diseño de puentes losa maciza. Dicho método permitirá contemplar situaciones de puentes expuestos o enclavados en ambientes urbanos en donde la velocidad de viento a considerar discrepa de forma notable del valor de velocidad de viento que se muestra en la tabla 4.10 y que, de alguna forma, queda englobado de forma implícita en el mapa peninsular de isolíneas de gradiente térmico presentado en la figura 4.8.

Hay que indicar que éste es un método simplificado y como tal puede acarrear errores, errores que han sido evaluados en todas las estaciones no sobrepasándose en ningún caso un error relativo del 22% del lado de la seguridad y del 10% del lado de la inseguridad. A mi entender, estas magnitudes de los errores máximos son totalmente aceptables en diseño obteniéndose, mediante la aplicación de este método, un gradiente térmico a considerar en el análisis y diseño de los puentes losa maciza mucho más acorde con la realidad, contemplando las variables climatológicas que influyen de forma notable en el valor de esta acción térmica -radiación solar, velocidad de viento, canto y espesor de capa asfáltica-.

La metodología a seguir será la siguiente:

- El gradiente térmico de referencia será de 12.5°C , valor medio peninsular del gradiente térmico en puentes losa maciza considerando una velocidad de viento de 4.0 m/seg.
- Obtención de los factores de corrección relativos al canto del tablero k_2 y al espesor de capa asfáltica k_3 , si ésta existe, a partir de las gráficas mostradas en las figuras 4.9 y 4.10 respectivamente.

- Obtención del factor de corrección k_4 relativo a la velocidad de viento media mensual en el mes de máximos número medio mensual de horas de sol y radiación solar global media mensual existente en el lugar de emplazamiento del puente, a partir de la gráfica mostrada en la figura 4.11.
- El gradiente térmico a considerar en diseño será:

$$\text{GRAD}=(k_2 \cdot k_3 \cdot k_4) 12.5^{\circ}\text{C} \quad |4.3|$$

Un rápido análisis comparativo entre la presente propuesta y la prescrita por la normativa vigente en lo que se refiere a la determinación del gradiente térmico permite extraer algunas conclusiones. Por una parte, es bien claro que el gradiente térmico a considerar en diseño debe depender de las condiciones ambientales existentes en el lugar de emplazamiento del puente y, en concreto, de la radiación solar global media mensual máxima a lo largo del año.

Por otra parte, para algunas de las estaciones meteorológicas contempladas en este estudio y en función de las condiciones climatológicas y ambientales existentes, se obtienen valores del gradiente térmico sensiblemente superiores al valor propuesto por la normativa vigente que es, en un principio, de 10°C . Así, a modo de ejemplo, un puente losa maciza de canto 0.60 metros y con un espesor de capa asfáltica de 7.5 cms. emplazado en un lugar próximo a la estación meteorológica de Toledo se vería sometido a un gradiente térmico de 12.9°C , obtenido este valor mediante la aplicación del método exacto. La aplicación del método simplificado daría como resultado un gradiente de 12.5°C .

Ello no es de extrañar puesto que la acción térmica, en este caso el gradiente, viene definida en el presente estudio por su valor característico y no por su valor medio,

tratamiento éste último al que parecen atender las especificaciones de la normativa vigente, referentes a la consideración de la acción térmica en el diseño de los puentes de hormigón.

Adoptando el valor característico de la acción térmica y considerando tal acción como una acción indirecta de carácter variable, es lógico pensar que el efecto estructural de la acción térmica será, de por sí, significativo. De ahí el que pudiera concluirse que la combinación de cargas permanentes y cargas variables de explotación junto con las acciones indirectas de carácter permanente y variable fuera la hipótesis de carga que controlará el diseño de los puentes de hormigón.

Ahora bien, en proyecto es evidente que deben adoptarse unas combinaciones de acciones de actuación conjunta compatible que contemplen la probabilidad de aparición simultánea de las acciones consideradas a lo largo de la vida útil de la estructura a través de coeficientes de frecuencia de aparición de acciones. Ello se traducirá en una reducción de las sollicitaciones de cálculo a las que puede verse sometida la estructura reduciéndose asimismo la probabilidad de que la hipótesis de carga mencionada anteriormente sea la crítica y la que controle, de forma primordial, el proceso de diseño en puentes de hormigón.

4.2.3.3.- Otras acciones térmicas

De los resultados derivados de los estudios paramétricos llevados a cabo para puentes losa maciza se extraían algunas conclusiones relativas a la necesidad de considerar o no otras acciones térmicas en el diseño de los puentes de hormigón con esta tipología transversal.

En lo referente al gradiente térmico vertical negativo puede adoptarse para éste un valor de diseño de -2°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

$$\text{GRAD}_{\text{negativo}} = -2.0^{\circ}\text{C} \quad |4.4|$$

$$\text{GRAD}_{\text{negativo}} = 0^{\circ}\text{C} \text{ (si existe asfalto)}$$

En cuanto al gradiente térmico horizontal se puede afirmar, en base a los estudios realizados y dada la propia topología transversal de los puentes losa maciza, que su valor es prácticamente despreciable por lo que se propone no considerar sus efectos en diseño.

4.2.4.- Puentes losa aligerada

En el subapartado 3.5.1 del capítulo anterior se presentaban diferentes resultados relativos al análisis comparativo de la respuesta térmica de los puentes losa maciza y losa aligerada. En efecto, se demostraba que todos los parámetros físicos, ambientales y de emplazamiento que influyen en la respuesta térmica y tensional de los puentes losa aligerada actúan en el mismo sentido en el que lo hacen en puentes losa maciza a excepción de la velocidad del viento, variable climatológica que al aumentar de valor proporciona, ligeramente, mayores variaciones diarias de la temperatura media del puente; dicha respuesta era, como se recordará, opuesta a la observada en puentes losa maciza.

No obstante, la influencia de dicha variable sobre la variación anual de la temperatura media del puente se ve notablemente reducida puesto que tal variación depende, fundamentalmente, del rango anual de la temperatura ambiente en el lu

gar de emplazamiento del puente. Por consiguiente, de cara a la obtención de esta acción térmica, los únicos factores correctores a considerar serán el relativo al canto del tablero y el relativo a la propia presencia de aligeramientos en la sección transversal.

Conviene puntualizar que los aligeramientos de la sección transversal adoptados en el análisis presentan las siguientes dimensiones geométricas, en función del canto total h del tablero losa aligerada:

- Aligeramientos cuadrados de $0.6h \times 0.6h$
- Espesores de alas superior e inferior de $0.2h$
- Distancia entre ejes de $0.9h$

Dichas relaciones geométricas pretenden atender, de forma general, a unas condiciones tipo de aligeramiento que se cree son representativas de la tipología transversal de los puentes losa aligerada.

4.2.4.1.- Variaciones anuales de la temperatura media

Todo lo expuesto con anterioridad en el subapartado 4.2.3.1 para la determinación de las variaciones anuales de la temperatura media en puentes losa maciza es perfectamente extrapolable a puentes losa aligerada. La única diferencia es triba en que para esta tipología es necesario introducir un factor de corrección que considere la presencia de aligeramientos.

Factores de corrección

Para poder definir el factor corrector relativo a la presencia de aligeramientos en puentes losa se ha procedido al análisis de puentes losa aligerada con cantos 0.60 metros

y 0.90 metros emplazados en diferentes estaciones metereológicas de la España peninsular, las cuales son representativas de la variada geografía y climatología existente en nuestro país. Los resultados obtenidos se presentan en la tabla 4.17.

Variaciones anuales de temperatura media en puentes losa maciza y losa aligerada(°C)						
Estación metereológica	h=0.60m.			h=0.90m		
	ΔT_{alig}	ΔT_{mac}	$\Delta T_{alig}/\Delta T_{mac}$	ΔT_{alig}	ΔT_{mac}	$\Delta T_{alig}/\Delta T_{mac}$
Finisterre	20.0	18.4	1.09	18.7	17.8	1.05
Navacerrada	32.4	30.8	1.05	31.0	29.7	1.04
Ciudad Real	42.2	39.6	1.07	40.2	38.3	1.05
Vitoria	30.7	28.7	1.07	28.9	27.8	1.04
Barcelona	27.4	25.9	1.06	26.0	24.9	1.04
San Javier	31.3	29.4	1.06	29.6	28.2	1.05
Sevilla	39.3	37.1	1.06	37.2	35.6	1.04

Tabla 4.12.- Variaciones anuales de la temperatura media en puentes losa aligerada y losa maciza para diferentes cantos de tablero en diversas estaciones metereológicas.

En dicha tabla puede apreciarse que los valores de los cocientes entre las variaciones anuales de temperatura media de puentes losa aligerada y losa maciza se mantienen prácticamente constantes para un mismo valor del canto del tablero independientemente de la estación metereológica en donde se emplacen los puentes.

En base a estos resultados y a los derivados del estudio paramétrico de los puentes losa aligerada, presentado en el subapartado 3.5.1 del capítulo anterior, es posible definir un factor de corrección k_5 que contemple la influencia de la existencia de aligeramientos. Los valores de dicho factor, en función del canto total del tablero, pueden obtenerse a partir de la gráfica de la figura 4.12.

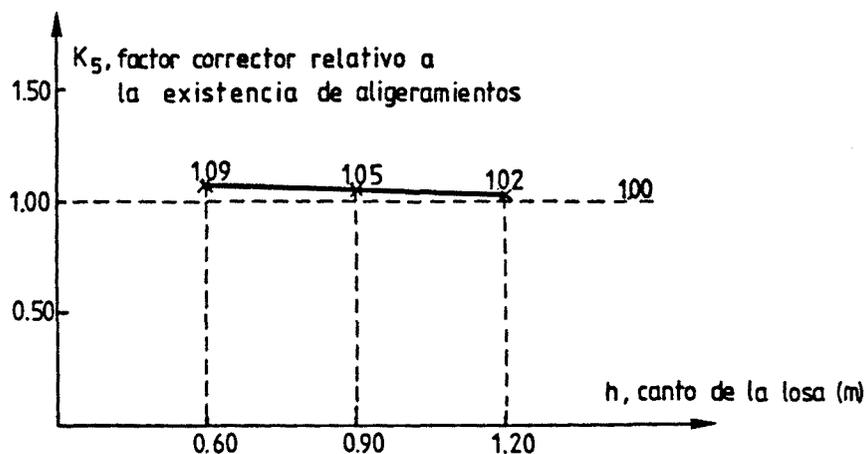


Fig 4.12.- Factor de corrección k_5 , en función del canto del tablero, relativo a la presencia de aligeramientos para determinar las variaciones anuales de la temperatura media en puentes losa aligerada.

Debido a que la influencia de otros parámetros sobre el valor de la variación anual de la temperatura media es despreciable, no es necesario considerar otros factores de corrección.

Metodología

La metodología a seguir de cara a la obtención de la variación anual de la temperatura media en puentes losa aligerada será la siguiente:

- Situación del lugar de emplazamiento.
- Obtención para dicho lugar del rango anual de la temperatura media del puente en base a lo representado en el mapa de isolíneas de variación de la temperatura media mostrado en la figura 4.5 o en base a los valores recogidos en la tabla 4.3, dependiendo éstos de las diferentes regiones climáticas de la Península Ibérica.
- Obtención del factor de corrección k_1 relativo al canto del tablero a partir de la gráfica mostrada en la figura 4.7.

- Obtención del factor de corrección k_5 , en función del canto del tablero, relativo a la presencia de aligeramientos según la gráfica de la figura 4.12.
- La variación de la temperatura media del puente losa aligerada a considerar en diseño será:

$$\Delta T = (k_1 \cdot k_5) \Delta T_{\text{referencia}} \quad | 4.5 |$$

4.2.4.2.- Gradientes térmicos

La obtención de los factores de corrección y el desarrollo de la metodología a seguir para determinar el gradiente térmico a considerar en diseño en puentes losa aligerada serán procesos totalmente paralelos a los ya expuestos en el subapartado 4.2.3.2 referente a los puentes losa maciza.

La diferencia fundamental estriba, como ocurría a la hora de determinar la variación anual de la temperatura media, en la necesidad de introducir un factor de corrección que contemple la existencia de aligeramientos en la sección transversal.

A continuación se presentan las dos posibles formas de abordar el problema de la determinación del gradiente térmico de diseño en puentes losa aligerada. La primera de ellas toma como base de partida el mapa peninsular de isolíneas del gradiente térmico mostrado en la figura 4.8 mientras que la segunda parte de la adopción de un gradiente inicial de referencia medio peninsular suponiendo una misma velocidad de viento en todas las estaciones meteorológicas e igual a una velocidad media peninsular que se encuentra muy próxima a los 4.0 m/seg.

Obtención del gradiente térmico de diseño en puentes losa aligerada a partir del mapa peninsular de isolíneas de gradiente

Factores de corrección

En lo que respecta a la influencia de la geometría de la sección se tendrá en cuenta la corrección que considera la presencia de aligeramientos en la sección transversal. Para ello se ha procedido al análisis y obtención de la respuesta térmica de puentes losa aligerada de diferentes cantos de tablero emplazados en distintas estaciones meteorológicas que reflejan, de forma sobrada, la variada climatología existente en nuestro país. Los resultados obtenidos, los cuales se presentan en la tabla 4.13, han sido obtenidos imponiendo unas condiciones de velocidad de viento iguales a las existentes en cada una de las estaciones meteorológicas contempladas.

En cuanto a los valores que adoptan los cocientes entre los gradientes térmicos inducidos en puentes losa aligerada y losa maciza puede observarse que, para un mismo canto, tienden a un valor prácticamente constante.

En base a ello y a los resultados derivados del estudio paramétrico de los puentes losa aligerada es posible definir un factor de corrección k_G , el cual considerará la presencia de aligeramientos y permitirá obtener el gradiente térmico de diseño de los puentes losa aligerada a partir del valor correspondiente a los puentes losa maciza con el mismo canto total de tablero. El valor de dicho factor puede deducirse de la gráfica presentada en la figura 4.13.

Del resto de parámetros que influyen en la respuesta térmica y, en concreto, en el valor del gradiente térmico, sólo resta considerar el espesor de capa asfáltica, puesto que es éste un parámetro que tiene una influencia apreciable sobre esta acción térmica.

Gradientes térmicos G en puentes losa maciza y losa aligerada (°C)						
Estación metereológica	h=0.60m			h=0.90m		
	G _{alig}	G _{mac}	G _{alig} /G _{mac}	G _{alig}	G _{mac}	G _{alig} /G _{mac}
Finisterre	8.5	7.8	1.09	6.8	6.3	1.08
Ponferrada	14.5	13.4	1.08	12.0	11.3	1.06
Salamanca	11.9	11.0	1.08	9.8	9.2	1.07
Navacerrada	11.5	10.7	1.07	9.5	8.9	1.07
Ciudad Real	11.5	10.8	1.06	9.6	9.0	1.07
Badajoz	13.6	12.7	1.07	11.3	10.7	1.06
Pamplona	15.7	14.3	1.10	12.8	11.9	1.08
Zaragoza	11.3	10.5	1.08	9.3	8.7	1.07
Gerona	14.6	13.4	1.09	11.9	11.1	1.07
Castellón	13.7	12.6	1.09	11.3	10.5	1.08
Alcantarilla	14.2	13.1	1.08	11.7	11.0	1.06
Sevilla	17.6	16.4	1.07	14.6	14.0	1.04
Málaga	12.1	11.3	1.07	10.0	9.4	1.06

Tabla 4.13.- Valores de los gradientes térmicos de diseño inducidos en puentes losa aligerada y losa maciza para diferentes cantos de tablero en diversas estaciones metereológicas.

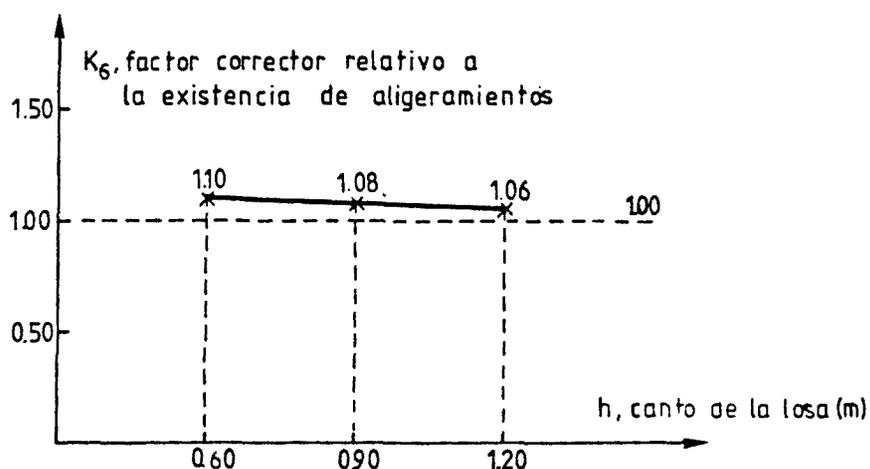


Fig. 4.13.- Factor de corrección k_g , en función del canto del tablero, relativo a la presencia de aligeramientos en puentes losa para determinar el gradiente térmico de diseño en puentes losa aligerada.

La tabla 4.14 muestra los valores del gradiente térmico inducido en puentes losa aligerada con diferentes canto y espesor de capa asfáltica de rodadura emplazados en distintas estaciones metereológicas, representativas de la climatología del país. Hay que incidir, de nuevo, en el hecho de que la velocidad de viento adoptada en el análisis es la existente en el lugar de emplazamiento del puente.

		Gradientes térmicos en puentes losa aligerada (°C)							
Estación metereológica	h=0.60m				h=0.90m				
	espesor asfalto (cm)				espesor asfalto (cm)				
	sin	5.0	7.5	10.0	sin	5.0	7.5	10.0	
Finisterre	8.5	9.1	6.9	5.1	6.8	8.1	6.3	4.9	
Navacerrada	11.5	13.0	10.1	7.7	9.5	11.9	9.5	7.6	
Ciudad Real	11.5	12.5	9.2	6.4	9.6	11.7	9.1	6.8	
Vitoria	14.6	16.5	12.4	9.1	11.7	14.6	11.4	8.7	
Barcelona	12.5	14.5	11.5	9.0	10.2	12.9	10.5	8.4	
Sevilla	17.6	21.4	17.0	13.4	14.6	19.4	15.9	12.9	

Tabla 4.14.- Valores del gradiente térmico en puentes losa aligerada con diferente canto y diferente espesor de capa asfáltica emplazados en diversas estaciones metereológicas.

En base a estos resultados pueden obtenerse los valores de los cocientes entre los gradientes térmicos con un determinado espesor de capa asfáltica y sin asfalto y deducir a partir de éstos el factor de corrección relativo a este parámetro. Ello se muestra en las gráficas de la figura 4.14 en donde se presentan diferentes curvas del factor de corrección, cada una de ellas correspondiente a un determinado canto total del tablero al igual como ocurría en puentes losa maciza.

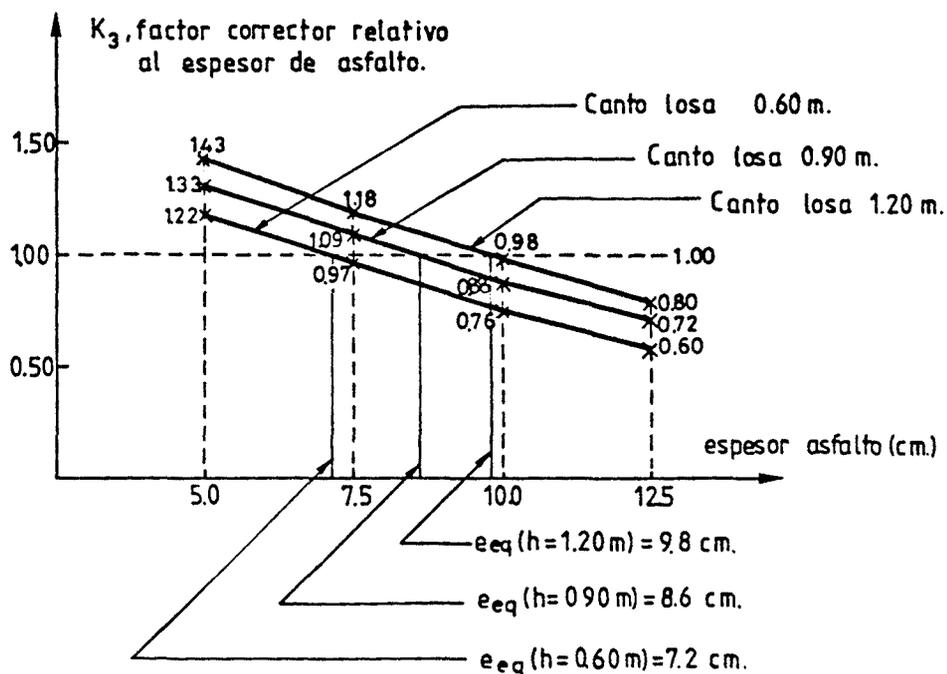


Fig. 4.14.- Factor de corrección k_3 relativo al espesor de capa asfáltica para determinar el gradiente térmico de diseño en puentes losa aligerada.

Comparando estas gráficas con las mostradas en la figura 4.10, correspondientes a puentes losa maciza, puede apreciarse que la influencia del espesor de capa asfáltica sobre el gradiente térmico es prácticamente idéntica para ambas tipologías si bien el factor de corrección en puentes losas aligerada adopta unos valores ligeramente inferiores para un mismo canto de tablero.

Metodología

La metodología a seguir para determinar el valor del gradiente térmico de diseño en puentes losa aligerada a partir del mapa peninsular de isolíneas de gradiente en puentes losa maciza será la siguiente:

- Situación del lugar de emplazamiento del puente.
- Obtención para dicho lugar del gradiente térmico en base a lo representado en el mapa de isolíneas de

gradiente mostrado en la figura 4.8. Como se recordará en dicho mapa se recoge de forma implícita la velocidad de viento media mensual existente en el lugar de emplazamiento en el mes de máxima radiación solar global media mensual.

- Obtención del factor de corrección k_2 relativo al canto del tablero a partir de la gráfica mostrada en la figura 4.9.
- Obtención del factor de corrección k_3 relativo al espesor de capa asfáltica, si ésta existe, y del factor de corrección k_6 relativo a la presencia de aligeramientos mediante las gráficas presentadas en las figuras 4.14 y 4.13 respectivamente.
- El gradiente térmico a considerar en diseño será:

$$\text{GRAD} = (k_2 \cdot k_3 \cdot k_6) \text{GRAD}_{\text{referencia}} \quad |4.6|$$

Obtención del gradiente térmico de diseño en puentes losa aligerada a partir de un gradiente medio peninsular de referencia

La tabla 4.15 muestra los valores de los gradientes térmicos obtenidos en puentes losa aligerada con diferente canto y diferente espesor de capa asfáltica emplazados en distintas estaciones meteorológicas. Para dichas estaciones, según la filosofía descrita en el subapartado 4.2.4.2, relativa a la obtención de gradientes de diseño en puentes losa maciza según el método simplificado, se han adoptado unas condiciones de velocidad de viento iguales a la velocidad de viento media peninsular de 4.0 m/seg.

Un análisis de los resultados presentados en esta tabla y de los cocientes entre gradientes, cocientes que definirán los factores de corrección, permite extraer algunas conclusiones:

- El factor de corrección relativo a la velocidad de viento es independiente del canto del tablero losa aligerada y los valores adoptados por dicho factor corrector son los mismos que los obtenidos en el estudio de los puentes losa maciza.
- Los valores que adopta el factor corrector relativo a la influencia del espesor de asfalto son prácticamente idénticos a los obtenidos adoptando como velocidad de viento la existente en el lugar de emplazamiento del puente.
- El factor de corrección relativo a la presencia de aligeramientos es independiente de la velocidad de viento adoptada en el análisis.

		Gradientes térmicos G en puentes losa aligerada (°C) con v=4.0 m/seg							
Estación metereológica	h=0.60m				h=0.90m				
	espesor asfalto (cm)				espesor asfalto (cm)				
	sin	5.0	7.5	10.0	sin	5.0	7.5	10.0	
Finisterre	12.7	14.9	11.7	9.1	10.2	13.1	10.5	8.5	
Navacerrada	13.9	16.5	13.1	10.3	11.5	15.0	12.2	10.0	
Ciudad Real	12.7	14.3	10.8	7.9	10.6	13.3	10.5	8.1	
Vitoria	14.6	16.5	12.4	9.1	11.7	14.6	11.4	8.7	
Barcelona	13.7	16.3	13.0	10.3	11.2	14.4	11.8	9.6	
Sevilla	14.1	16.1	12.3	9.2	11.7	14.7	11.7	9.1	

Tabla 4.15.- Valores del gradiente térmico en puentes losa aligerada con diferente canto y diferente espesor de capa asfáltica emplazados en diversas estaciones metereológicas adoptando una velocidad de viento igual a la media peninsular de 4.0 m/seg.

Metodología

En base a lo expuesto con anterioridad, la metodología a seguir de cara a determinar el gradiente térmico de diseño en puentes losa aligerada a partir del gradiente medio peninsular en puentes losa maciza -método simplificado- será la siguiente:

- El gradiente térmico inicial de referencia será de 12.5°C, gradiente medio peninsular en puentes losa maciza de canto 0.60 metros obtenido imponiendo en todas las estaciones metereológicas unas condiciones de viento definidas por la velocidad de viento media peninsular de 4.0 m/seg.
- Obtención del factor de corrección k_2 relativo al canto del tablero a partir de la gráfica mostrada en la figura 4.9.
- Obtención del factor de corrección k_3 relativo a la existencia de capa asfáltica a partir de las gráficas presentadas en la figura 4.14.
- Obtención del factor corrector k_4 relativo a la velocidad de viento media mensual existente en el lugar de emplazamiento del puente mediante la gráfica de la figura 4.11.
- Obtención del factor de corrección k_6 relativo a la presencia de aligeramientos en la sección transversal a partir de la gráfica de la figura 4.13.
- El gradiente térmico a considerar en el diseño de los puentes losa aligerada será:

$$\text{GRAD} = (k_2 \cdot k_3 \cdot k_4 \cdot k_6) 12.5^\circ\text{C} \quad |4.7|$$

Hay que señalar, de nuevo, que éste es un método sim-

plificado y como tal puede acarrear errores al igual como se indicaba en puentes losa maciza. No obstante, dichos errores se mantienen dentro de unos márgenes aceptables en proyecto siendo de la misma magnitud que los obtenidos para la tipología de puentes losa maciza -errores del 22% del lado de la seguridad y del 10% del lado de la inseguridad-.

4.2.4.3.- Otras acciones térmicas

En lo referente a otras acciones térmicas a considerar en el diseño de los puentes losa aligerada, puede afirmarse que dicha tipología no introduce variaciones substanciales en la respuesta térmica con respecto a la de los puentes losa maciza.

De nuevo, puede adoptarse para el gradiente térmico negativo un valor de diseño de -2°C no haciendo falta la consideración de esta acción en el caso de que se disponga sobre el hormigón estructural del tablero del puente una capa asfáltica de rodadura

$$\text{GRAD}_{\text{negativo}} = -2^{\circ}\text{C}$$

$$\text{GRAD}_{\text{negativo}} = 0^{\circ}\text{C} \text{ (si existe capa asfáltica)} \quad |4.8|$$

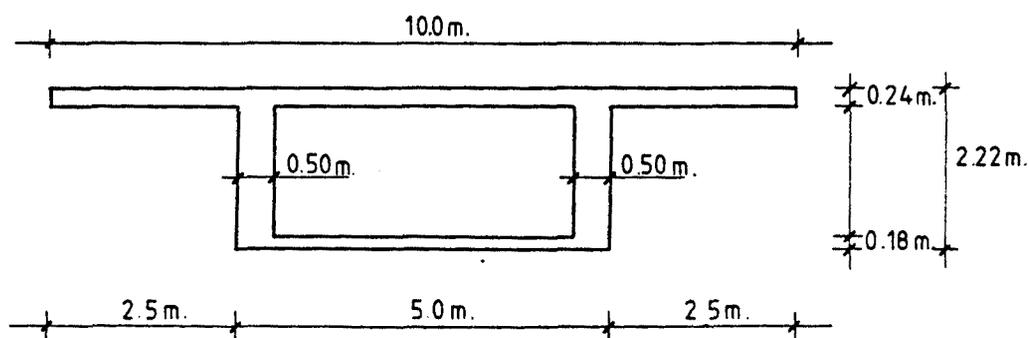
Por otra parte, puede concluirse que el gradiente térmico transversal es prácticamente despreciable y, por consiguiente, se propone no considerar su influencia en diseño.

Por último, cabe comentar que pueden existir solicitaciones transversales térmicas por diferencia de temperaturas entre el ambiente exterior y el interior de los aligeramientos; en general, dichas solicitaciones son despreciables si bien su consideración en diseño se hace tanto más necesaria cuanto mayor sea el volumen de aligeramiento con respecto al volumen del tablero, tal como se verá con posterioridad al obtener las acciones térmicas de diseño en puentes cajón.

4.2.5.- Puentes cajón unicelulares

La determinación de las acciones térmicas a considerar en el diseño de los puentes cajón necesitaría, en un principio, de múltiples estudios que reflejarán distintas tipologías transversales comúnmente adoptadas en puentes cajón unicelulares. Ello llevaría consigo un análisis muy extenso de la casuística existente y haría que la interpretación de los resultados fuera farragosa siendo muy difícil el llevar a cabo la tarea de poder definir de forma más o menos simplificada, pero con rigor científico, unas reglas de diseño útiles para el proyectista de puentes de hormigón.

Así pues, se ha procedido de forma similar a como se hizo al estudiar la tipología de los puentes losa maciza. Se ha adoptado la sección de referencia que se presenta en la figura 4.15, la cual se cree es representativa de los puentes de hormigón con tipología transversal en cajón realizándose sobre ella diferentes estudios relativos a puentes unicelulares emplazados en las diferentes estaciones meteorológicas.



Malla de discretización. $\Delta x = 0.25\text{m}$, $\Delta y = 0.06\text{m}$.

Fig. 4.15.- Sección transversal de referencia en el estudio de puentes cajón unicelulares.

Con posterioridad, los resultados obtenidos serán corregidos en base a unos valores adoptados por determinados factores de corrección que contemplan la influencia de diversos parámetros sobre la respuesta térmica de los puentes cajón unicelulares.

4.2.5.1.- Variaciones anuales de la temperatura media

El procedimiento seguido para obtener las variaciones anuales de la temperatura media de los puentes cajón unicelulares es idéntico al adoptado en el estudio de los puentes losa maciza.

Las temperaturas ambientes medias adoptadas en los diferentes lugares de emplazamiento correspondientes a cada una de las estaciones meteorológicas analizadas son, como es lógico, las mismas que se adoptaron al estudiar las variaciones anuales de la temperatura media en puentes losa maciza. Dichas temperaturas han sido presentadas en la tabla 4.2 del subapartado 4.2.3.1 del presente capítulo.

A continuación, la tabla 4.16 muestra simultáneamente los rangos anuales de la temperatura media del puente losa maciza y puente cajón analizados con las respectivas secciones de referencia (figuras 4.4 y 4.15 respectivamente). Ello permitirá llevar a cabo de forma más fácil un rápido análisis comparativo.

En dicha tabla puede apreciarse que, para cualquiera de las estaciones analizadas, los valores de los rangos anuales de temperatura media del puente losa maciza y puente cajón unicelular se encuentran, para las secciones analizadas, muy próximos observándose que dichos rangos son ligeramente superiores para esta última tipología -se verifica aproximadamente que $\Delta T_{\text{puente cajón}} = 1.03 \div 1.04 \Delta T_{\text{puente losa maciza}}$.

Estación metereológica	Rango de variación anual de la temperatura media del puente (°C)	
	Puente losa maciza (fig. 4.4)	Puente cajón (fig. 4.15)
Coruña	19.4	20.2
Lugo	26.6	27.2
Finisterre	18.4	19.2
Santiago	23.8	24.7
Pontevedra	24.2	24.9
Vigo	21.5	22.1
Orense	29.6	29.8
Ponferrada	33.0	33.2
Gijón	20.3	20.9
Oviedo	24.1	24.4
Santander	19.2	19.8
Bilbao	24.5	25.4
San Sebastián	20.7	21.1
León	34.5	35.4
Zamora	34.9	36.0
Palencia	34.2	35.2
Burgos	31.8	32.5
Valladolid	34.6	35.6
Soria	35.3	36.4
Salamanca	36.0	37.2
Avila	34.4	35.2
Segovia	36.3	37.1
Navacerrada	30.8	31.5
Madrid (Barajas)	39.0	39.9
Guadalajara	36.4	37.2
Molina de Aragón	38.4	39.7
Toledo	37.3	38.2
Cuenca	38.2	39.3
Ciudad Real	39.6	40.9

Tabla 4.16.- Valores del rango de variación anual de la temperatura media en puentes losa maciza (figura 4.4) y en puentes cajón unicelulares (figura 4.15) en las estaciones metereológicas estudiadas.

Estación metereológica	Rango de variación anual de la temperatura media del puente (°C)	
	Puente losa maciza (fig. 4.4)	Puente cajón (fig. 4.15)
Albacete	39.5	40.9
Cáceres	35.3	36.2
Badajoz	35.8	36.8
Vitoria	28.7	29.4
Logroño	32.9	33.9
Pamplona	32.1	32.4
Huesca	35.7	36.7
Zaragoza	33.5	34.5
Lérida	37.0	38.0
Montseny	25.7	26.4
Gerona	33.7	34.7
Barcelona	25.9	26.4
Tarragona	26.0	26.4
Tortosa	30.2	31.2
Castellón	27.8	28.5
Valencia	28.6	29.5
Alicante	31.3	32.5
Alcantarilla	35.0	36.2
San Javier	29.4	30.3
Sevilla	37.1	37.8
Córdoba	38.5	39.1
Jaén	36.1	36.6
Granada	39.3	40.6
Huelva	32.8	33.3
Cádiz	26.0	26.8
Tarifa	20.3	21.2
Málaga	27.2	28.1
Almería	25.4	26.1
Teruel	38.8	40.0

Tabla 4.16 (cont.).- Valores del rango de variación anual de la temperatura media en puentes losa maciza (figura 4.4) y en puentes cajón unicelulares (figura 4.15) en las estaciones metereológicas estudiadas.

En el caso de que se desearan conocer las variaciones anuales de la temperatura media para ambas tipologías transversales a través de la fórmula especificada en la normativa española vigente ((31), (68)) $-\Delta T = \pm(20 - 0.75\sqrt{e})$ se obtendría para el puente cajón unicelular una variación anual de 30.3°C y para el puente losa maciza una variación de 29.5°C lo que da una relación entre ambos valores de 1.03. Ello permite afirmar de nuevo que la corrección introducida en la fórmula de la normativa relativa al espesor ficticio de la pieza se ajusta a lo obtenido mediante métodos más sofisticados. No obstante, también es claro que las variaciones anuales de la temperatura media del puente losa maciza y del puente cajón unicelular obtenidas mediante la aplicación de dicha fórmula distan de las obtenidas mediante la aplicación del método de forma muy considerable. Tales diferencias son debidas, como ya se ha comentado con anterioridad a lo largo del desarrollo de esta tesis, a la no consideración del rango de variación anual de la temperatura ambiente en el lugar de emplazamiento del puente.

Los resultados obtenidos para el rango de variación anual de la temperatura media del puente cajón analizado en cada una de las estaciones meteorológicas contempladas se presentan de forma gráfica en la figura 4.16.

En el mapa de isolíneas de dicha figura se aprecian de nuevo cuatro regiones claramente diferenciadas:

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

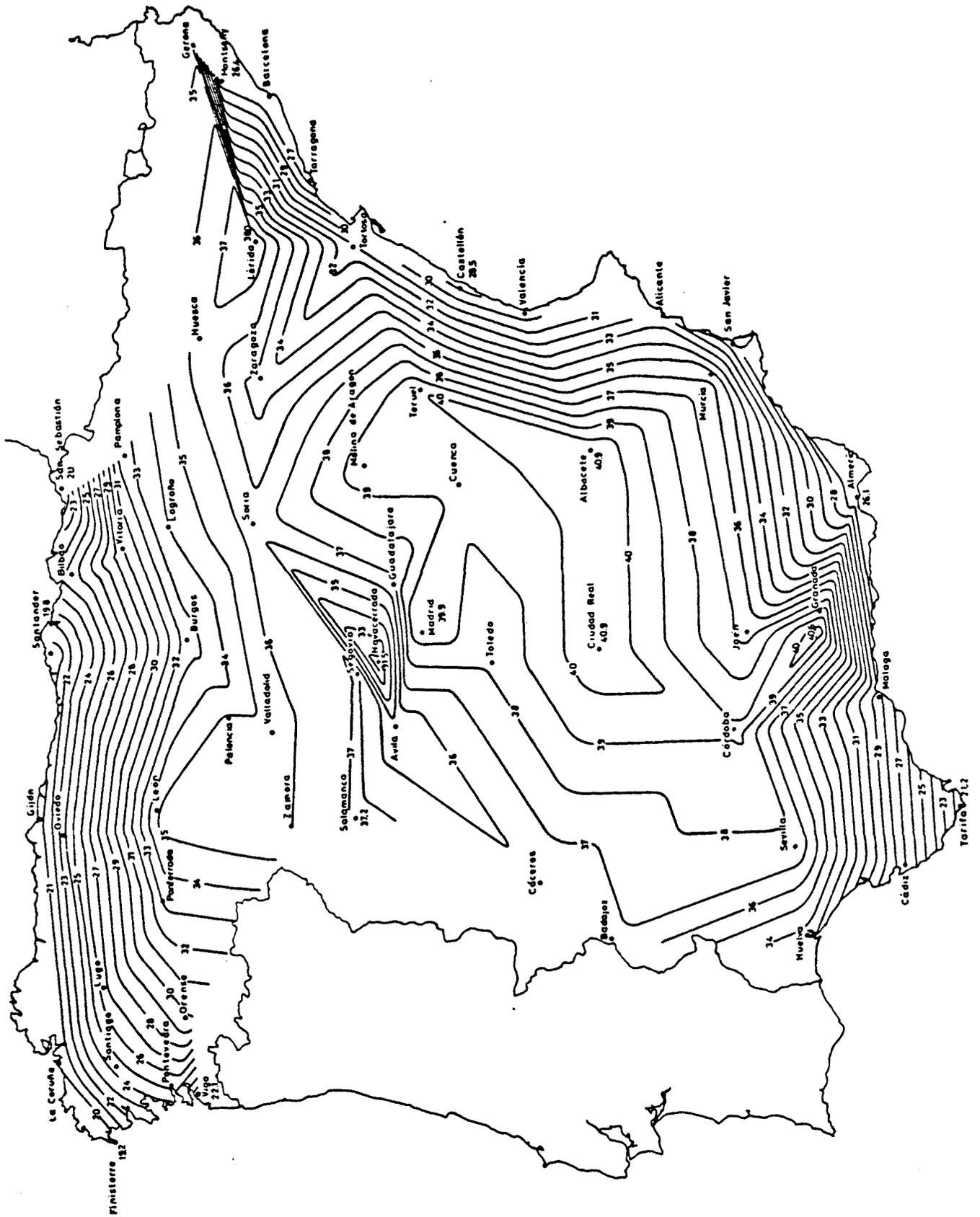


Fig. 4.16.- Mapa de isolíneas de variación anual de la temperatura media en puentes cajón unicelulares (sección transversal de referencia en figura 4.15).

Los comentarios realizados al analizar el mapa de iso líneas de variación anual de la temperatura media en puentes losa maciza son perfectamente extrapolables al análisis del mapa de isolíneas en puentes cajón unicelulares, lo que demuestra una vez más que dicha acción térmica viene correlacionada, fundamentalmente, con las condiciones existentes de temperatura ambiente y evolución anual de ésta en el lugar de emplazamiento. Por dicha razón, no es preciso extenderse en el análisis de los resultados presentados en este último mapa.

Atendiendo a la división de la Península Ibérica en diferentes regiones climáticas (Atlas Climático de España (47)) es posible refundir la información proporcionada por el mapa de isolíneas de variación anual de la temperatura media de puentes cajón unicelulares en una serie de valores de diseño de dicha variación dependiendo de la región climática en la que se emplace el puente.

Dichos valores, mostrados en la tabla 4.17, quedan del lado de la seguridad puesto que representan los máximos alcanzados en alguna de las estaciones metereológicas ubicadas en las diferentes regiones climáticas de nuestro país. La representación gráfica de todas las regiones climáticas puede observarse en la figura 4.6 del subapartado 4.2.3.1.

Región climática	Rango de variación anual de la temperatura media del puente (°C)
Zona litoral Norte del Cantábrico y de Galicia	26.0
Zona prelitoral Norte del Cantábrico y de Galicia (II)	30.0
Zona Pirenaica (III)	26.0
Zona Centro Septentrional, Meseta Norte y Depresión Ebro (IV)	39.0
Zona Centro Meridional y Meseta Sur (V)	41.0
Zona Noreste (VI)	35.0
Levante e Islas Baleares (VII)	32.0
Zona Sudeste (VIII)	37.0
Zona litoral Sur (IX)	34.0

Tabla 4.17.- Valores de diseño del rango de variación anual de la temperatura media de los puentes cajón unicelulares según las diferentes regiones climáticas de la Península Ibérica.

Factores de corrección

A la vista de los resultados obtenidos en los estudios paramétricos de los puentes cajón relativos a la influencia de sus características geométricas sobre su respuesta térmica y, en concreto, sobre las variaciones anuales de la temperatura media puede afirmarse que el único parámetro geométrico que es preciso contemplar es el canto total del tablero del puente. Las relaciones longitud del voladizo-canto del alma y espesor de almas-espesor de alas no influyen de forma notable sobre el valor que adopta el rango anual de la temperatura media del puente. Por otra parte, la existencia de capa asfáltica

ca introduce cambios en los valores alcanzados por las temperaturas medias máxima y mínima del puente aumentando ligeramente en ambos casos, pero sobre la variación anual de la temperatura media no introduce cambios substanciales.

Así pues, del conjunto de variables no contempladas en el análisis de forma intrínseca, sólo se analizará la influencia del canto total del tablero y ello se tendrá en cuenta en la definición del pertinente factor de corrección. Para poder determinar el valor de dicho factor se han estudiado diferentes secciones transversales de puentes cajón unicelulares en donde la única dimensión que varía con respecto a la sección transversal de referencia es el canto total. En particular, se han analizado dos secciones transversales cajón de canto total 1.67 metros y 3.33 metros; los espesores de alas y almas y el canto del alma varían en sus dimensiones de forma proporcional a como varía el canto total del tablero del puente. Los análisis de dichas secciones transversales se han llevado a cabo en diferentes estaciones meteorológicas del país, cubriendo de forma sobrada la geografía y distinta climatología de la Península Ibérica. Los resultados obtenidos pueden verse en la tabla 4.18.

En dicha tabla puede observarse que los factores $\Delta T_{1.67} / \Delta T_{2.22}$ e $\Delta T_{3.33} / \Delta T_{2.22}$ se mantienen, para un mismo canto total de tablero, prácticamente constantes, independientemente de la estación meteorológica considerada.

Debido a ello y conocida la forma en cómo varía el rango anual de la temperatura media de los puentes cajón unicelulares es posible definir un factor corrector k_1 cuyo valor, en función del canto total del tablero, puede obtenerse a través de la gráfica que se presenta en la figura 4.17.

Variaciones anuales de la temperatura media ΔT en puentes cajón unicelulares ($^{\circ}\text{C}$)					
Estación metereológica	h=1.67m		h=2.22m	h=3.33m	
	$\Delta T_{1.67}$	$\Delta T_{1.67}/\Delta T_{2.22}$	$\Delta T_{2.22}$	$\Delta T_{3.33}$	$\Delta T_{3.33}/\Delta T_{2.22}$
Lugo	28.7	1.06	27.2	25.7	0.94
Finisterre	20.1	1.05	19.2	18.1	0.94
Santander	20.9	1.06	19.8	18.6	0.94
León	36.8	1.04	35.4	33.7	0.95
Burgos	33.8	1.04	32.5	30.9	0.95
Salamanca	38.6	1.04	37.2	35.3	0.95
Madrid	41.5	1.04	39.9	38.1	0.95
Ciudad Real	42.5	1.04	40.9	39.0	0.95
Albacete	42.4	1.04	40.9	38.9	0.95
Badajoz	38.4	1.04	36.8	35.0	0.95
Pamplona	33.9	1.05	32.4	30.8	0.95
Zaragoza	35.8	1.04	34.5	32.9	0.95
Montseny	27.6	1.05	26.4	24.9	0.94
Tortosa	32.5	1.04	31.2	29.5	0.95
San Javier	31.6	1.04	30.3	28.7	0.95
Córdoba	40.8	1.04	39.1	37.1	0.95
Granada	42.3	1.04	40.6	38.7	0.95
Huelva	35.2	1.06	33.3	31.3	0.94
Tarifa	22.0	1.04	21.2	19.9	0.94
Teruel	41.5	1.04	40.0	38.1	0.95

Tabla 4.18.- Variaciones anuales de la temperatura media en puentes cajón unicelulares para diferentes cantos de tablero en diversas estaciones metereológicas.

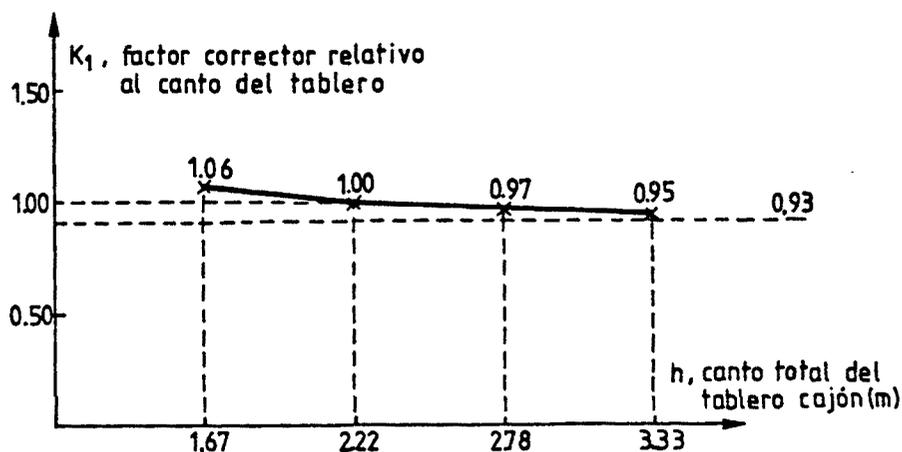


Fig. 4.17.- Factor de corrección k_1 relativo al canto del tablero para determinar las variaciones anuales de la temperatura media en puentes cajón unicelulares.

Metodología

La metodología a seguir de cara a la determinación de la variación anual de la temperatura media en puentes cajón unicelulares es idéntica a la especificada para puentes losa maciza y es la siguiente:

- Situación del lugar de emplazamiento del puente.
- Obtención para dicho lugar del rango anual de la temperatura media del puente en base a lo representado en el mapa de isolíneas de variación de la temperatura media mostrado en la figura 4.16 o en base a los valores presentados en la tabla 4.17, dependiendo éstos últimos de las diferentes regiones climáticas de nuestro país.
- Obtención del factor de corrección k_1 relativo a la influencia del canto total del tablero cajón sobre la variación anual de la temperatura media del puente, a partir de la gráfica mostrada en la figura 4.17.

- La variación anual de la temperatura media a considerar en el diseño de puentes cajón unicelulares es:

$$\Delta T = k_1 \cdot \Delta T_{\text{referencia}} \quad |4.9|$$

4.2.5.2.- Gradientes térmicos

Los valores de la radiación solar global media mensual y el número medio mensual de horas de sol adoptados en el análisis son, evidentemente, los mismos que se utilizaron para el estudio y análisis de los puentes losa maciza. Tales valores pueden encontrarse en la tabla 4.6 del subapartado 4.2.3.2 del presente capítulo.

En la tabla 4.19 se presentan a continuación los valores de los gradientes térmicos verticales alcanzados en puentes cajón unicelulares, emplazados en las distintas estaciones meteorológicas contempladas en este estudio.

Los resultados de dichos gradientes térmicos se muestran de forma gráfica en la figura 4.18 en donde se representa un mapa peninsular de isolíneas del gradiente térmico para puentes cajón unicelulares.

A la vista de lo observado en dicha figura y en la tabla 4.19 puede afirmarse que no existen diferencias cualitativas substanciales entre la respuesta térmica, en lo que se refiere a gradientes térmicos, de los puentes losa maciza y los puentes cajón unicelulares. Las zonas de máximos y mínimos son, en ambos casos, las mismas. Sin embargo, desde un punto de vista cuantitativo, se aprecian diferencias notables que se traducen en una disminución del valor del gradiente térmico a considerar en el diseño de los puentes cajón unicelulares con respecto al que hay que considerar en el caso de puentes losa maciza.

Estación metereológica	Gradientes térmicos en puentes cajón unicelulares (°C)
Coruña	5.6
Lugo	8.8
Finisterre	5.4
Santiago	6.8
Pontevedra	7.8
Vigo	7.9
Orense	10.0
Ponferrada	9.9
Gijón	7.4
Oviedo	8.6
Santander	8.1
Bilbao	8.5
San Sebastián	8.7
León	8.6
Zamora	8.3
Palencia	7.9
Burgos	8.8
Valladolid	7.9
Soria	8.5
Salamanca	8.3
Avila	9.4
Segovia	9.6
Navacerrada	7.9
Madrid (Barajas)	9.6
Guadalajara	10.0
Molina de Aragón	9.1
Toledo	9.6
Cuenca	8.7
Ciudad Real	8.2

Tabla 4.19.- Valores del gradiente térmico vertical en puentes cajón unicelulares (figura 4.15) en las estaciones metereológicas estudiadas.

Estación metereológica	Gradientes térmicos en puentes cajón unicelulares (°C)
Albacete	8.8
Cáceres	9.5
Badajoz	9.5
Vitoria	9.2
Logroño	8.8
Pamplona	10.3
Huesca	8.4
Zaragoza	7.8
Lérida	8.6
Montseny	8.7
Gerona	9.6
Barcelona	8.3
Tarragona	9.5
Tortosa	8.9
Castellón	9.1
Valencia	9.1
Alicante	8.4
Alcantarilla	9.7
San Javier	8.1
Sevilla	12.2
Córdoba	12.1
Jaén	12.1
Granada	9.4
Huelva	12.8
Cádiz	7.8
Tarifa	5.9
Málaga	8.3
Almería	8.3
Teruel	8.1

Tabla 4.19 (cont.).- Valores del gradiente térmico vertical en puentes cajón unicelulares (figura 4.15) en las estaciones metereológicas estudiadas.

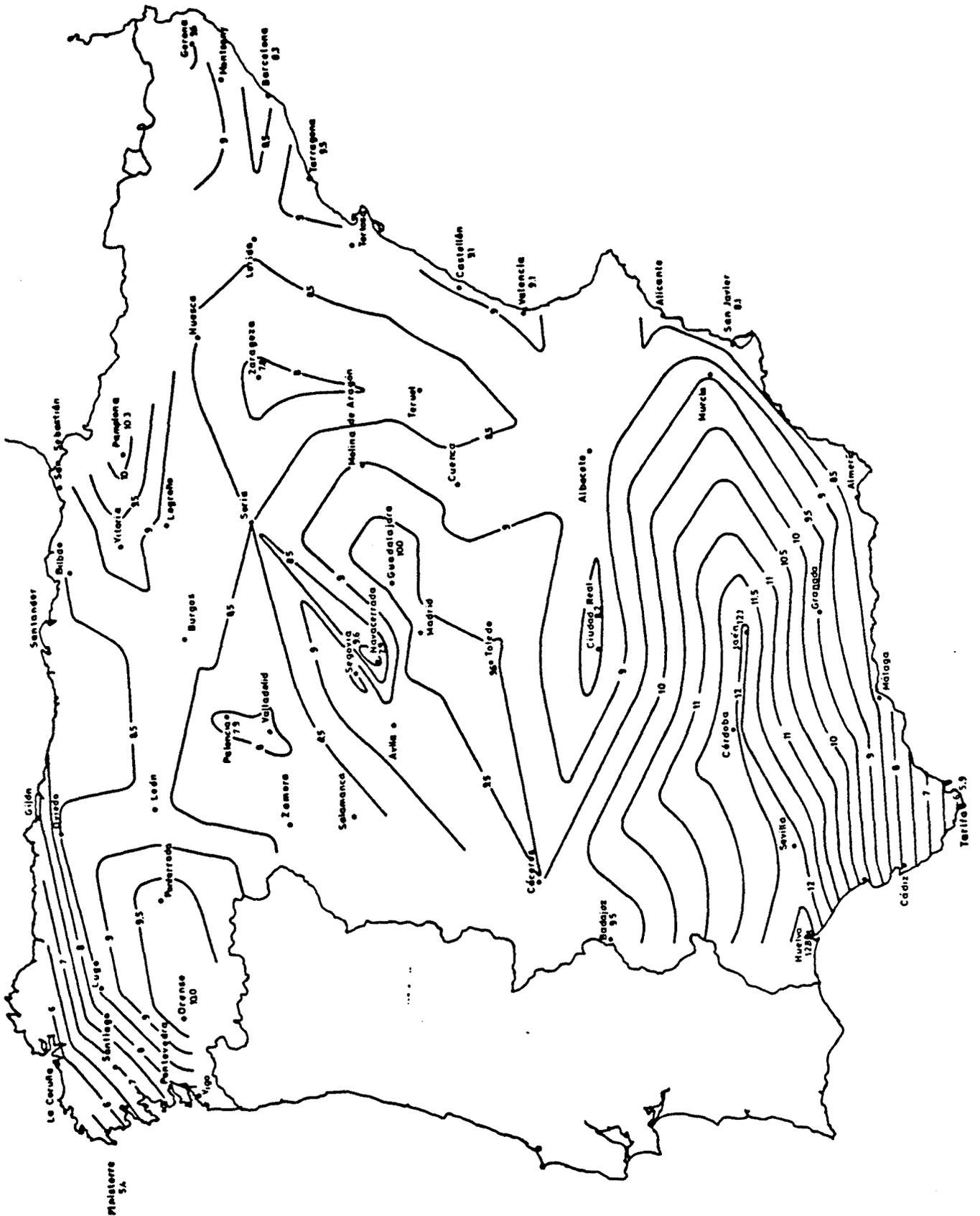


Fig. 4.18.- Mapa de isolíneas del gradiente térmico en puentes cajón unicelulares (sección transversal de referencia en figura 4.15).

Dicha reducción puede situarse, para todas las estaciones meteorológicas contempladas y como término medio, próxima a un 26% y es atribuible fundamentalmente, al canto total del tablero el cual es de 2.22 metros para la sección estudio de referencia de los puentes cajón unicelulares mientras que para el caso de los puentes losa maciza el canto total de la sección de referencia es de 0.60 metros. Ello prueba, una vez más, la influencia del canto del tablero sobre el valor del gradiente térmico a considerar en el diseño de los puentes de hormigón.

Al igual que como se llevó a cabo para puentes losa maciza, se presentan a continuación dos métodos, uno exacto y otro simplificado, de obtención del gradiente térmico de diseño en puentes cajón unicelulares. El primero de ellos tiene como base de partida el mapa peninsular de isolíneas del gradiente térmico en puentes cajón unicelulares mostrado en la figura 4.18. El segundo método, simplificado, adopta un gradiente inicial de referencia correspondiente a un gradiente medio peninsular imponiendo la misma velocidad de viento en todas las estaciones meteorológicas contempladas. Dicha velocidad es de 4.0 m/seg y representa la velocidad de viento media peninsular en el mes o meses de máxima radiación solar global media mensual.

Para ambos métodos se obtendrán los pertinentes factores correctores relativos a cada uno de los parámetros que muestran una mayor influencia sobre el valor de esta acción térmica y se expondrán las metodologías de obtención de los gradientes de diseño para cada uno de ellos.

Obtención del gradiente térmico de diseño en puentes cajón unicelulares a partir del mapa peninsular de isolíneas de gradiente

Factores de corrección

En lo referente a los parámetros geométricos de la sección cajón se tendrá en cuenta, inicialmente, la influencia del canto total del tablero vista su importancia en los estudios paramétricos llevados a cabo en el capítulo anterior. La tabla 4.20 muestra los valores de los gradientes térmicos inducidos en puentes cajón unicelulares con diferente canto en diversas estaciones meteorológicas. Los espesores de alas superior e inferior y el canto del alma varían de forma proporcional a la variación del canto total del tablero cajón.

Partiendo de los resultados presentados en dicha tabla es posible definir un factor de corrección k_2 que tenga en cuenta la influencia del canto del tablero y cuyo valor, en función de dicha dimensión geométrica, puede obtenerse de la gráfica que se muestra a continuación en la figura 4.19.

Otro parámetro geométrico a considerar en la determinación del gradiente térmico en puentes cajón unicelulares es la relación ancho tablero losa superior-ancho tablero losa inferior. Efectivamente, el análisis de los resultados del estudio paramétrico de esta relación geométrica, presentado en el subapartado 3.3.1.2 del anterior capítulo, permitía llegar a la conclusión de que cuanto mayor es la longitud de los voladizos, manteniendo constante el canto del alma o el ancho de la losa inferior del tablero, mayor es el gradiente térmico vertical. Ello es debido a la influencia que tiene un aumento de la temperatura en los voladizos como consecuencia de la radiación solar incidente. La integración del momento originado por la temperatura de cada uno de los filamentos en que se ha discretizado la sección da como resultado una mayor curvatura térmica vertical impuesta.

Gradientes térmicos G en puentes cajón unicelulares (°C)					
Estación metereológica	h=1.67m		h=2.22m	h=3.33m	
	$G_{1.67}$	$G_{1.67}/G_{2.22}$	$G_{2.22}$	$G_{3.33}$	$G_{3.33}/G_{2.22}$
Lugo	10.8	1.23	8.8	6.7	0.76
Finisterre	6.7	1.24	5.4	4.0	0.74
Santander	10.1	1.25	8.1	6.2	0.77
León	10.5	1.22	8.6	6.6	0.77
Burgos	10.7	1.22	8.8	6.8	0.77
Salamanca	10.1	1.22	8.3	6.3	0.76
Madrid (Bar.)	11.6	1.21	9.6	7.4	0.77
Ciudad Real	10.0	1.22	8.2	6.1	0.74
Albacete	10.7	1.22	8.8	6.6	0.75
Badajoz	11.5	1.21	9.5	7.3	0.77
Pamplona	12.6	1.22	10.3	8.0	0.78
Zaragoza	9.5	1.22	7.8	5.9	0.76
Montseny	10.6	1.22	8.7	6.7	0.77
Tortosa	10.8	1.21	8.9	6.8	0.76
San Javier	9.7	1.20	8.1	6.2	0.77
Sevilla	14.4	1.20	12.0	9.3	0.78
Córdoba	14.5	1.20	12.1	9.5	0.79
Granada	11.5	1.22	9.4	7.2	0.77
Huelva	15.4	1.20	12.8	10.2	0.80
Tarifa	7.1	1.20	5.9	4.4	0.75
Teruel	10.0	1.23	8.1	6.1	0.75

Tabla 4.20.- Valores de los gradientes térmicos inducidos en puentes cajón unicelulares para diferentes cantos de tablero en diversas estaciones metereológicas.

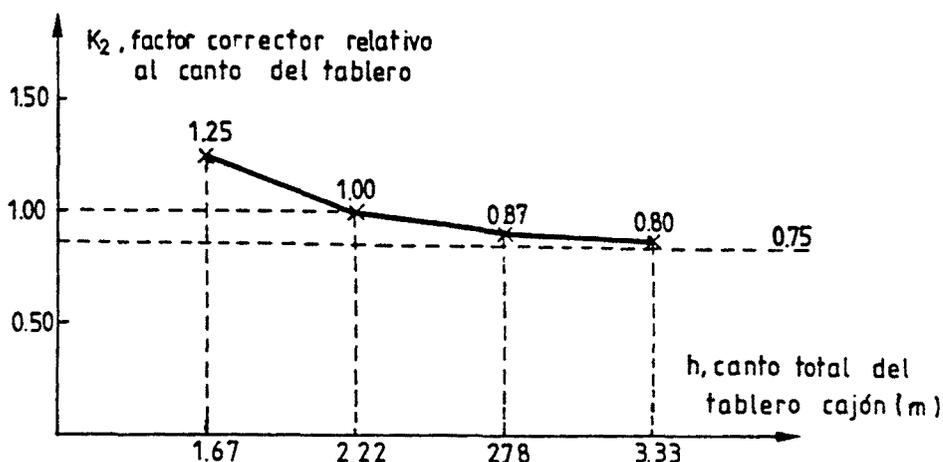


Fig. 4.19.- Factor de corrección k_2 relativo al canto del tablero para determinar el gradiente térmico en puentes cajón unicelulares.

Para poder definir el factor corrector relativo a este parámetro geométrico se ha procedido a obtener la respuesta térmica de puentes cajón unicelulares emplazados en diversas estaciones metereológicas.

En ellos la longitud de los voladizos ha ido variándose manteniendo constante el resto de dimensiones que definen la sección transversal -recordemos que dicha sección es la sección cajón de referencia de la figura 4.15-. En concreto las longitudes de voladizo contempladas en este estudio han sido de 1.15 metros, 2.50 metros, 3.85 metros y 5.20 metros. A continuación, en la tabla 4.21 se muestran algunos de los resultados de los gradientes térmicos inducidos en puentes cajón unicelulares emplazados en diferentes estaciones metereológicas.

A tenor de los resultados presentados en esta tabla y habiendo sido comprobado que los valores que adopta el factor de corrección correspondiente a esta relación geométrica son independientes del canto total del tablero, es posible definir tal factor a través de una única gráfica la cual se presenta en la figura 4.20.

Gradientes térmicos G en puentes cajón unicelulares (°C) para diferentes relaciones $r = \text{ancho losa sup.} / \text{ancho losa inf.}$							
Estación meteorológica	r=1.5		r=2.0	r=2.5		r=3.0	
	$G_{1.5}$	$G_{1.5}/G_{2.0}$	$G_{2.0}$	$G_{2.5}$	$G_{2.5}/G_{2.0}$	$G_{3.0}$	$G_{3.0}/G_{2.0}$
Lugo	8.1	0.92	8.8	9.2	1.05	9.5	1.08
Finisterre	5.0	0.93	5.4	5.7	1.06	5.9	1.09
Ciudad Real	7.4	0.90	8.2	8.7	1.06	9.1	1.05
Barcelona	7.6	0.92	8.3	8.6	1.04	8.8	1.06
Huelva	12.0	0.94	12.8	13.4	1.05	13.8	1.08

Tabla 4.21.- Valores de los gradientes térmicos inducidos en puentes cajón unicelulares para diferentes relaciones ancho losa superior-ancho losa inferior del tablero en diversas estaciones meteorológicas.

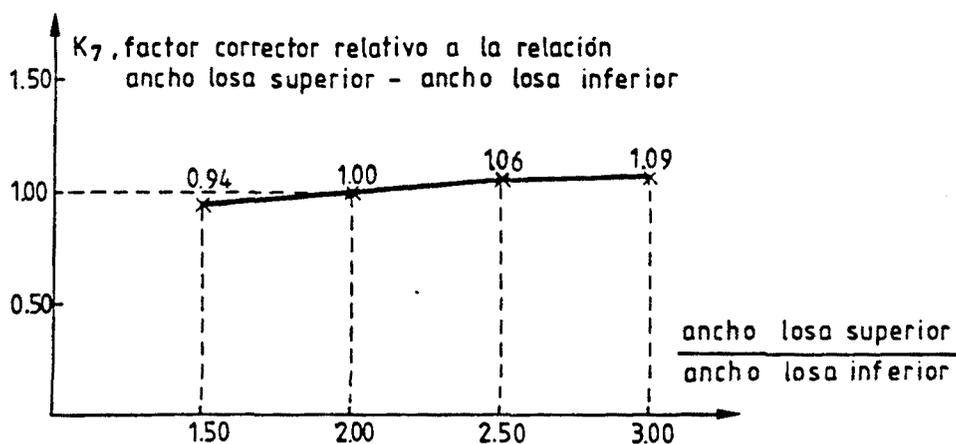


Fig. 4.20.- Factor de corrección k_7 relativo a la relación ancho losa superior-ancho losa inferior para determinar el gradiente térmico vertical en puentes cajón unicelulares.

Del conjunto de parámetros contemplados en los estudios paramétricos referentes a la sección cajón presentados en el subapartado 3.3.1 del capítulo anterior, algunos de ellos ya han sido considerados en este estudio de forma implícita -radiación solar, rango de la temperatura ambiente, número de horas de sol y velocidad de viento- o de forma explícita -canto total del tablero y relación de anchos de la losa superior e inferior-.

De aquellos parámetros que muestran una influencia apreciable sobre el valor del gradiente térmico inducido en puentes cajón unicelulares sólo resta contemplar el espesor de capa asfáltica de rodadura, si ésta existe.

En efecto, al igual como ocurría en puentes losa, se llegaba a la conclusión de que cuanto menor fuera el espesor de asfalto mayor era el valor del gradiente térmico inducido. Por otra parte, un análisis de los resultados derivados de los estudios paramétricos de la sección cajón permitía apreciar la existencia de un cierto espesor por encima del cual los gradientes térmicos obtenidos eran inferiores al gradiente térmico inducido en el caso de que no se dispusiera capa asfáltica de rodadura.

La tabla 4.22 muestra los valores del gradiente térmico en puentes cajón unicelulares con diferente canto y diferente espesor de capa asfáltica emplazados en distintas estaciones meteorológicas, representativas de la variada climatología existente en nuestro país.

En base a estos resultados y a los valores del cociente entre el gradiente térmico con un determinado espesor de capa asfáltica y el gradiente térmico sin asfalto es posible definir un factor corrector relativo al espesor de asfalto que variará de forma paramétrica con el canto total del tablero cajón.

		Gradientes térmicos en puentes cajón unicelulares (°c)								
Estación metereológica	h=1.67m			h=2.22m			h=3.33m			
	Espesor asfalto (cm)			Espesor asfalto (cm)			Espesor asfalto (cm)			
	5.0	7.5	10.0	5.0	7.5	10.0	5.0	7.5	10.0	
Finisterre	7.0	5.4	4.2	6.0	4.8	3.8	4.9	4.0	3.3	
Ciudad Real	10.6	8.3	6.5	9.3	7.5	6.0	7.7	6.3	5.2	
Badajoz	12.8	10.3	8.3	11.3	9.3	7.7	9.4	7.9	6.6	
Pamplona	14.4	11.6	9.4	12.5	10.3	8.5	10.4	8.7	7.3	
Montseny	11.9	9.7	7.9	10.4	8.5	7.1	8.6	7.2	6.0	
San Javier	11.0	9.0	7.3	9.7	8.0	6.7	8.0	6.8	5.8	
Sevilla	17.3	14.2	11.6	15.1	12.7	10.6	12.8	10.9	9.3	

Tabla 4.22.- Valores del gradiente térmico en puentes cajón unicelulares con diferente canto y diferente espesor de capa asfáltica emplazados en distintas estaciones metereológicas.

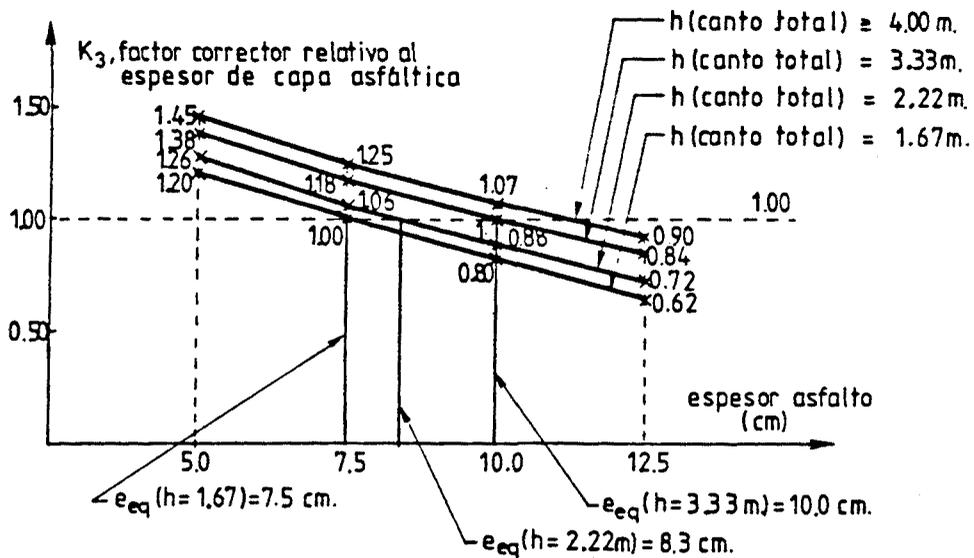


Fig. 4.21.- Factor de corrección k_3 relativo al espesor de capa asfáltica para determinar el gradiente térmico en puentes cajón unicelulares.

Metodología

La metodología a seguir para determinar el valor del gradiente térmico a considerar en el diseño de puentes cajón unicelulares tomando como base de partida el mapa de isolíneas de gradiente será la siguiente:

- Situación del lugar de emplazamiento del puente.
- Obtención para dicho lugar del gradiente térmico en base a lo representado en el mapa de isolíneas de gradiente térmico mostrado en la figura 4.18. Recordemos que en dicho mapa se recoge de forma implícita la velocidad de viento media mensual existente en el lugar de emplazamiento del puente.
- Obtención del factor de corrección k_2 , relativo al canto del tablero, y del factor de corrección k_3 , relativo al espesor de capa asfáltica, a partir de las gráficas mostradas en las figuras 4.19 y 4.21 respectivamente.
- Obtención del factor de corrección k_7 , relativo a la relación de dimensiones ancho losa superior-ancho losa inferior a partir de la gráfica mostrada en la figura 4.20.
- El gradiente térmico a considerar en diseño será

$$\text{GRAD} = (k_2 \cdot k_3 \cdot k_7) \text{GRAD}_{\text{referencia}} \quad |4.10|$$

Obtención del gradiente térmico de diseño en puentes cajón unicelulares a partir de un gradiente medio peninsular de referencia

La estrategia seguida para la obtención del gradiente térmico de diseño en puentes cajón unicelulares es idéntica a la seguida en el estudio correspondiente a los puentes losa.

Así, adoptando para todas las estaciones metereológicas la misma velocidad de viento e igual a la media peninsular de 4.0 m/seg, puede obtenerse un gradiente medio peninsular de referencia. El valor de dicho gradiente se verá inicialmente corregido mediante la aplicación de un factor que contemplará la velocidad de viento real existente en el lugar de emplazamiento del puente y, posteriormente, mediante la aplicación de los factores relativos a los parámetros ya mencionados al desarrollar el método de obtención de los gradientes de diseño a partir del mapa peninsular de isolíneas de gradiente térmico.

En la tabla 4.23 se muestran los valores de la velocidad de viento existentes en las diversas estaciones metereológicas así como los gradientes térmicos obtenidos en cada una de ellas suponiendo una velocidad de viento igual a la media peninsular de 4.0 m/seg (Atlas Climático de España (47)).

A tenor de los resultados presentados en esta tabla puede adoptarse un gradiente medio peninsular de referencia en puentes cajón unicelulares de 9.1°C , valor claramente inferior al obtenido en puentes losa, el cual era de 12.5°C . Ello es debido a la influencia de la dimensión del canto del tablero sobre el valor del gradiente térmico. La desviación típica obtenida ha sido de 0.58°C .

Estación metereológica	Velocidad de viento en la estación (m/sg)	Gradiente térmico G (v=4.0m/sg)	$\frac{(G)_{v=v_{estación}}}{(G)_{v=4.0m/sg}}$
Coruña	8.0	7.8	0.72
Lugo	4.0	8.8	1.00
Finisterre	9.0	8.0	0.68
Santiago	5.0	7.5	0.91
Pontevedra	4.0	7.8	1.00
Vigo	4.0	7.9	1.00
Orense	3.0	9.0	1.11
Ponferrada	3.0	8.9	1.11
Gijón	5.0	8.1	0.91
Oviedo	3.0	7.8	1.10
Santander	5.0	8.9	0.91
Bilbao	5.0	9.3	0.91
San Sebastián	5.0	9.6	0.91
León	4.0	8.6	1.00
Zamora	5.0	9.2	0.90
Palencia	5.0	8.6	0.92
Burgos	4.0	8.8	1.00
Valladolid	5.0	8.7	0.91
Soria	5.0	9.4	0.90
Salamanca	5.0	9.1	0.91
Avila	4.0	9.4	1.00
Segovia	4.0	9.6	1.00
Navacerrada	6.0	9.6	0.82
Madrid (Barajas)	4.0	9.6	1.00
Guadalajara	4.0	10.0	1.00
Molina de Aragón	4.0	9.1	1.00
Toledo	4.0	9.6	1.00
Cuenca	4.0	8.7	1.00
Ciudad Real	5.0	9.0	0.91

Tabla 4.23.- Valores de los gradientes térmicos en puentes cajón unicelulares de canto 2.22 metros adoptando una velocidad de viento igual a la media peninsular de 4.0 m/seg en cada una de las estaciones metereológicas (en °C).

Estación metereológica	Velocidad de viento en la estación (m/sg)	Gradiente térmico G (v=4.0m/sg)	$\frac{(G)_{v=v_{estación}}}{(G)_{v=4.0m/sg}}$
Albacete	5.0	9.6	0.92
Cáceres	4.0	9.5	1.00
Badajoz	4.0	9.5	1.00
Vitoria	4.0	9.2	1.00
Logroño	5.0	9.7	0.91
Pamplona	3.0	9.3	1.11
Huesca	5.0	9.2	0.91
Zaragoza	6.0	9.4	0.83
Lérida	5.0	9.4	0.91
Montseny	5.0	9.6	0.91
Gerona	4.0	9.6	1.00
Barcelona	5.0	9.0	0.92
Tarragona	4.0	9.5	1.00
Tortosa	5.0	9.8	0.91
Castellón	4.0	9.1	1.00
Valencia	4.0	9.1	1.00
Alicante	5.0	9.2	0.91
Alcantarilla	4.0	9.7	1.00
San Javier	5.0	8.9	0.91
Sevilla	2.0	9.7	1.25
Córdoba	2.0	9.6	1.25
Jaén	2.0	9.6	1.25
Granada	4.0	9.4	1.00
Huelva	2.0	10.2	1.25
Cádiz	5.0	8.6	0.91
Tarifa	9.0	8.9	0.66
Málaga	5.0	9.1	0.91
Almería	5.0	9.1	0.91
Teruel	5.0	8.9	0.91

Tabla 4.23 (cont.).- Valores de los gradientes térmicos en puentes cajón unicelulares de canto 2.22 metros adoptando una velocidad de viento igual a la media peninsular de 4.0m/seg en cada una de las estaciones metereológicas (en °C).

Factores de corrección

De los valores de los cocientes entre los gradientes térmicos obtenidos considerando la velocidad de viento correspondiente a cada una de las estaciones meteorológicas y los obtenidos considerando una velocidad de viento de 4.0 m/seg pueden deducirse los valores del factor de corrección k_4 relativo a la influencia de la velocidad del viento existente en el lugar de emplazamiento del puente de cara a la determinación del gradiente térmico de diseño en puentes cajón unicelulares mediante el presente método simplificado. Los valores de este factor corrector, en función del valor del parámetro climatológico, se presentan en la figura 4.22.

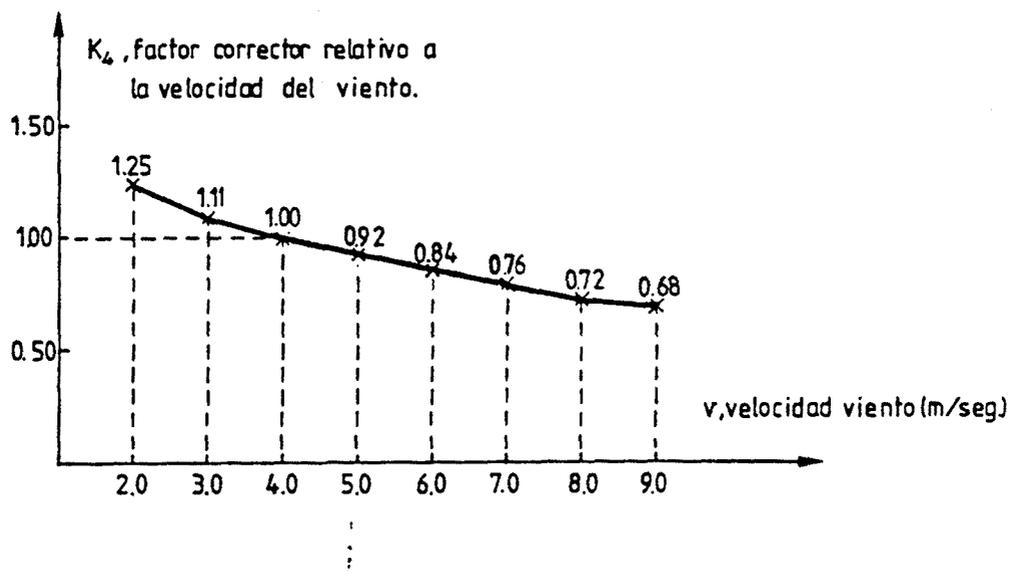


Fig. 4.22.- Factor de corrección k_4 relativo a la velocidad del viento a considerar en la determinación del gradiente térmico en puentes cajón unicelulares mediante el método simplificado.

Conviene señalar que dichos valores son exactamente iguales a los obtenidos en el estudio de los puentes losa.

Análisis posteriores muestran que los valores que adoptan los factores de corrección relativos al espesor de la ca-

pa asfáltica, canto del tablero y relación ancho losa superior-ancho losa inferior son prácticamente independientes de la velocidad de viento considerada en el análisis.

Metodología

En base a todo lo expuesto con anterioridad, la metodología a seguir de cara a determinar el gradiente térmico de diseño en puentes cajón unicelulares a partir de un gradiente medio peninsular de referencia -método simplificado- será la siguiente:

- El gradiente térmico de referencia será de 9.10°C , valor medio peninsular del gradiente térmico en puentes cajón unicelulares considerando una velocidad de viento de 4.0 m/seg .
- Obtención de los factores de corrección k_2 , relativo al canto total del tablero, y k_3 , relativo al espesor de capa asfáltica, a partir de las gráficas presentadas en las figuras 4.19 y 4.21 respectivamente.
- Obtención del factor de corrección k_4 , relativo a la velocidad de viento media mensual existente en el lugar de emplazamiento del puente en el mes de máximos número medio mensual de horas de sol y radiación solar global media mensual, según la gráfica de la figura 4.22.
- Obtención del factor de corrección k_7 , relativo a la influencia de la relación ancho losa superior-ancho losa inferior a partir de la gráfica presentada en la figura 4.20.
- El gradiente térmico a considerar en diseño será:

$$\text{GRAD}=(k_2 \cdot k_3 \cdot k_4 \cdot k_7) 9.1^{\circ}\text{C} \quad |4.11|$$

De nuevo hay que insistir en que éste es un método simplificado y como tal puede acarrear errores al igual como ocurría en el estudio de puentes losa. No obstante, para la tipología de los puentes cajón unicelulares la magnitud de dichos errores es incluso menor a la observada al analizar los puentes losa puesto que la desviación típica obtenida al definir el gradiente medio peninsular es ligeramente inferior en el caso de los puentes cajón unicelulares.

A pesar de la existencia de tales errores, del 20% del lado de la seguridad y del 8% del lado de la inseguridad como máximo, es la opinión del autor de esta tesis que el método simplificado propuesto proporciona al proyectista una herramienta útil de diseño puesto que éste puede determinar con suma facilidad el gradiente térmico a considerar en el análisis y diseño de los puentes de hormigón atendiendo a la exposición de la estructura del puente al viento en el lugar de emplazamiento y atendiendo a determinadas características de la tipología transversal adoptada -espesor de capa asfáltica, canto del tablero y relación ancho losa superior-ancho losa inferior-.

Por otra parte, el llevar a cabo un rápido análisis comparativo entre lo propuesto en el presente estudio a través de ambos métodos -exacto y simplificado- y lo preconizado por la normativa vigente en lo que se refiere a la definición del gradiente térmico de diseño, permite extraer algunas conclusiones de cierta relevancia.

Por un lado, es claro que el valor del gradiente térmico debe atender a unas condiciones ambientales y climatológicas existentes en el lugar de emplazamiento del puente como lo muestra el hecho de que un mismo puente cajón unicelular de canto total 2.22 metros emplazado en las estaciones meteorológicas de Coruña y Huelva se vea sometido a unos gradientes de valor 5.6°C y 12.8°C respectivamente. Por otro, puede apre-

ciarse que, contrariamente a lo observado en puentes losa, en puentes cajón unicelulares difícilmente se supera el gradiente de 10°C , hecho éste que evidencia de forma meridiana la influencia de la propia tipología transversal del puente y, en concreto, la del canto total del tablero en el valor del gradiente térmico inducido.

4.2.5.3.- Otras acciones térmicas

Gradientes térmicos verticales negativos

A tenor de los resultados derivados de los estudios paramétricos referentes a la sección cajón, los cuales han sido presentados en el subapartado 3.3.1 del capítulo anterior, puede concluirse que los mayores gradientes térmicos negativos aparecen en los meses de invierno y tienen lugar en horas próximas a las 6 horas de la mañana bajo unas condiciones de baja intensidad de radiación solar, un rango diario de temperatura ambiente elevado y una alta velocidad de viento.

Por otra parte, a lo largo del desarrollo del subapartado 4.2.5 del presente capítulo, relativo a la definición de las acciones térmicas de diseño en puentes cajón unicelulares no se han observado gradientes negativos cuyo valor absoluto fuera superior a los 1.5°C .

Para poder definir con un mayor rigor científico el gradiente vertical negativo a considerar en puentes cajón unicelulares, se ha procedido al estudio de la respuesta térmica de un puente cajón unicelular adoptando como sección transversal la de referencia (ver figura 4.15) y emplazando éste en una estación metereológica que proporcione unas condiciones de temperatura y radiación similares a las mencionadas anteriormente. Dicha estación puede ser la de Vitoria para la cual, en el mes de Diciembre, se registran un mínimo número medio mensual de horas de sol, una mínima radiación solar global media mensual y un rango de temperatura ambiente elevado.

Los resultados de este estudio muestran que el máximo gradiente vertical negativo acaece a las 6.16 horas de la mañana y su valor es de -2.2°C .

Por consiguiente, y conociendo que esta acción térmica puede correlacionarse con diversos parámetros, aunque dichas correlaciones no son fácilmente visibles, parece idóneo adoptar un gradiente vertical negativo de diseño de -2.0°C . Por último cabe comentar que, al igual que ocurría en puentes losa, si se dispone capa asfáltica de rodadura no es necesaria la consideración en diseño de esta acción térmica.

$$\begin{aligned} \text{GRAD}_{\text{negativo}} &= -2.0^{\circ}\text{C} \\ \text{GRAD}_{\text{negativo}} &= 0^{\circ}\text{C} \text{ (si existe capa asfáltica)} \end{aligned} \quad |4.12|$$

Gradientes térmicos transversales

Evidentemente, el considerar esta acción en diseño sólo tiene sentido si existe la certeza de que vaya a incidir sobre los paramentos laterales de la sección en cajón radiación solar directa. Ello genera fuentes de calor en dichos paramentos que hacen que la respuesta térmica según un eje horizontal no sea simétrica y que, por lo tanto, la integral de los momentos de las temperaturas de cada uno de los filamentos en los que se ha discretizado la sección transversal induzca una curvatura térmica impuesta horizontal no nula.

Analizando los resultados derivados de los estudios paramétricos puede advertirse que el valor que adopta el gradiente térmico transversal se encuentra correlacionado con la latitud del lugar de emplazamiento del puente y con el día del año para el cual se pretende obtener dicha acción térmica.

En efecto, cuanto más elevada es la latitud del lugar de emplazamiento mayores son los gradientes térmicos trans-

versales debido a que la inclinación de los rayos solares con respecto a un plano tangente a la superficie terrestre es menor. Ello también ocurre en los meses de invierno.

Es evidente que este hecho también se presenta en puentes losa maciza pero, debido a la propia tipología de estos puentes, la influencia de la radiación solar incidente sobre los paramentos laterales en el valor del gradiente térmico transversal es mínima. Ello no es así en puentes cajón en donde la masa de hormigón según un eje horizontal se concentra alrededor de las dos almas, viéndose una de ellas sometida a mayor temperatura que la otra y generándose así gradientes transversales de cierta relevancia.

En base a todo lo dicho hasta este punto se procede a analizar el puente cajón unicelular con la sección transversal de referencia (figura 4.15) emplazando éste en una latitud elevada de la Península Ibérica y llevando a cabo el análisis térmico en un día representativo de uno de los meses de invierno. Las condiciones ambientales en las que se encontrará inmerso el puente corresponden a una situación de radiación solar global media mensual elevada y de rango diario de temperatura ambiente también elevado. El azimut del puente analizado será de 0° (eje E-O) por lo que únicamente incidirá radiación solar directa en uno de los paramentos laterales de la sección.

Los resultados muestran que el gradiente transversal máximo acaece en el mes de Diciembre y su valor es de 2.5°C . Tal gradiente puede ser calificado, para la sección cajón análizada, de cota superior de esta acción térmica. No obstante, existe una relación geométrica que influye de forma notable en el valor alcanzado por dicha acción térmica.

Dicha variable geométrica es la relación longitud del voladizo-canto del alma. Su influencia lleva implícita, de alguna forma, la influencia del canto total del tablero so-

bre la respuesta térmica y, en particular, sobre el gradiente térmico transversal. Efectivamente, cuanto mayor es la relación anterior menor es el gradiente transversal puesto que el voladizo proyecta sombra sobre los paramentos laterales impidiendo que en ellos se generen fuentes de calor.

En resumen, y en base a estos comentarios y a los resultados obtenidos a lo largo de los estudios paramétricos realizados, pueden establecerse los siguientes valores de diseño para el gradiente térmico transversal:

$$\begin{aligned} \text{GRAD}_{\text{transversal}} &= 2.5 \div 3.0^{\circ}\text{C} \text{ si } \text{long.voladizo} \leq 0.5 \times \text{canto alma} \\ \text{GRAD}_{\text{transversal}} &= 0^{\circ}\text{C} \text{ si } \text{long.voladizo} > 0.5 \times \text{canto alma} \quad | 4.13 | \end{aligned}$$

Como ya se ha comentado con anterioridad, el gradiente transversal depende claramente de la inclinación de los rayos solares, es decir, de la altitud solar. Sabiendo que esta coordenada angular varía entre 0° y 90° , dependiendo del día del año, de la hora del día y de la latitud, se supondrá para dicha coordenada un valor medio de $\beta = 45^{\circ}$. Bajo esta condición de altitud solar parece idóneo el adoptar la hipótesis de que cuando el paramento lateral se encuentre en sombra en un 50% de su longitud como mínimo, se desprece la influencia de la radiación solar incidente en el paramento lateral de la sección cajón, y viceversa; es decir, que cuando el coeficiente de sombra -longitud del canto del alma en sombra/longitud del canto del alma- sea superior a 0.5 no sea necesaria la consideración en diseño de esta acción térmica.

Asignando a la altitud solar el valor de 45° es evidente que esto último tendrá lugar cuando se verifique la segunda de las dos condiciones geométricas expresadas en la relación |4.13|.

Conviene señalar que en puentes cajón de inercia variable la primera de las dos condiciones geométricas presen-

tadas en |4.13| se verifica con suma facilidad en secciones próximas a los apoyos intermedios generándose gradientes transversales que pueden incluso superar los 3°C . No obstante, hay que tener presente que para estos casos la curvatura térmica impuesta según un plano horizontal no es constante si no que es máxima en zonas cercanas a los apoyos y mínima, en algunos casos incluso nula, en secciones próximas a la sección de clave del vano. Por ello, parece lógico adoptar en estos casos un gradiente medio a lo largo de la directriz igual al que se propone en |4.13|.

Por otra parte, hay que hacer hincapié en que dichos gradientes transversales no son concomitantes con los gradientes verticales de diseño apareciendo los primeros en los meses de invierno y los segundos en los meses de verano. En general, y en base a los resultados obtenidos puede afirmarse que para los meses de verano no es necesaria la consideración del gradiente transversal en el diseño y análisis de los puentes cajón unicelulares.

Por último, es importante destacar la influencia del azimut sobre el valor del gradiente térmico transversal. En el caso de que el azimut del puente se encuentre comprendido entre -22.5° y $+22.5^{\circ}$, es decir, el puente presente una dirección Este-Oeste -azimut nulo- o próxima a ésta, es claro que únicamente incidirá radiación solar directa en uno de los dos paramentos laterales del puente. En este caso tiene sentido el definir un gradiente térmico transversal y adoptar como valor de diseño el propuesto en |4.13|). Para otras orientaciones del puente puede incidir radiación solar sobre ambos paramentos laterales. Aunque dicha incidencia no ocurre simultáneamente, puede observarse la existencia de un cierto equilibrio térmico según el eje horizontal y es por ello por lo que para tales orientaciones del puente se puede prescindir de los efectos originados por el gradiente térmico transversal.

Solicitaciones térmicas transversales

En el subapartado 1.3.2 del primer capítulo de la presente tesis se expuso cómo resolver el problema térmico tensional de forma general en elementos bidimensionales -placas y láminas-, obteniendo las tensiones térmicas transversales como parte integral de la solución global del problema.

Sin embargo, para secciones transversales más complejas -secciones en cajón de puentes- es conveniente desacoplar las tensiones térmicas longitudinales y transversales y analizarlas separadamente.

La figura 4.23 muestra una distribución de temperaturas genérica a considerar en el análisis transversal tensional de una sección en cajón.

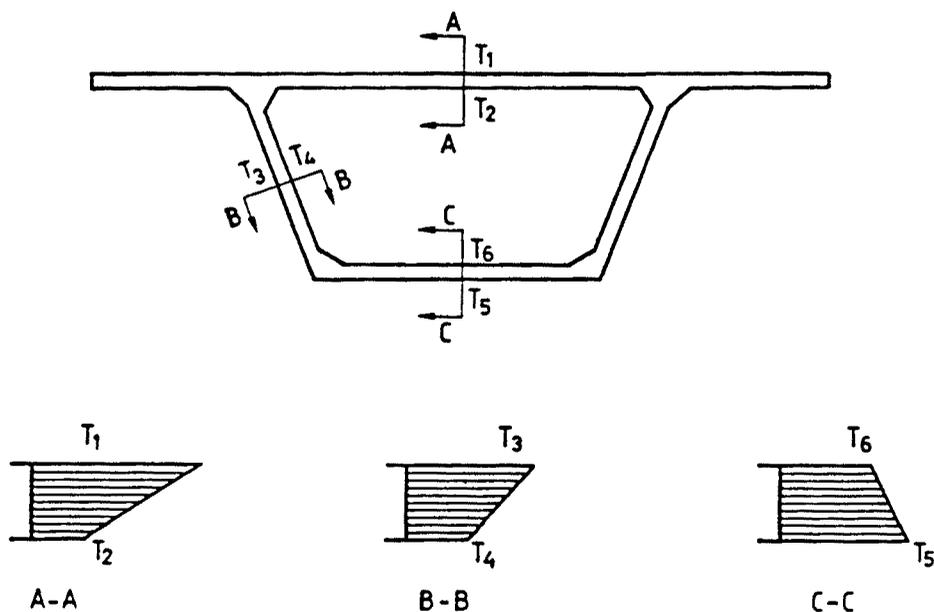


Fig. 4.23.- Distribuciones de temperaturas a considerar en el estudio y obtención de las tensiones térmicas transversales en puentes cajón.

En general, los estudios transversales se realizan para los instantes cercanos a aquél en el que se generan los máximos gradientes térmicos verticales. Para tal instante suele ocurrir que las temperaturas T_3 y T_4 y T_5 y T_6 presentan valores similares y a la hora de determinar el estado tensional transversal asociado a la distribución de temperaturas únicamente se considera una distribución de temperaturas a través del espesor de la losa superior del tablero; al ser dicho espesor pequeño la distribución adoptada es lineal. Es este tipo de sollicitación térmica -incremento uniforme de temperatura y gradiente lineal en la losa superior del tablero cajón- el considerado en algunas de las normativas internacionales de cara a la obtención de la respuesta tensional contenida en el plano de la sección frente a los efectos térmicos (MWD New Zealand (71), PTI-PCI (86), NAASRA Australia (72), OMTC Ontario (74)).

Los esfuerzos generados por dicha sollicitación se presentan de forma cualitativa en la figura 4.24.

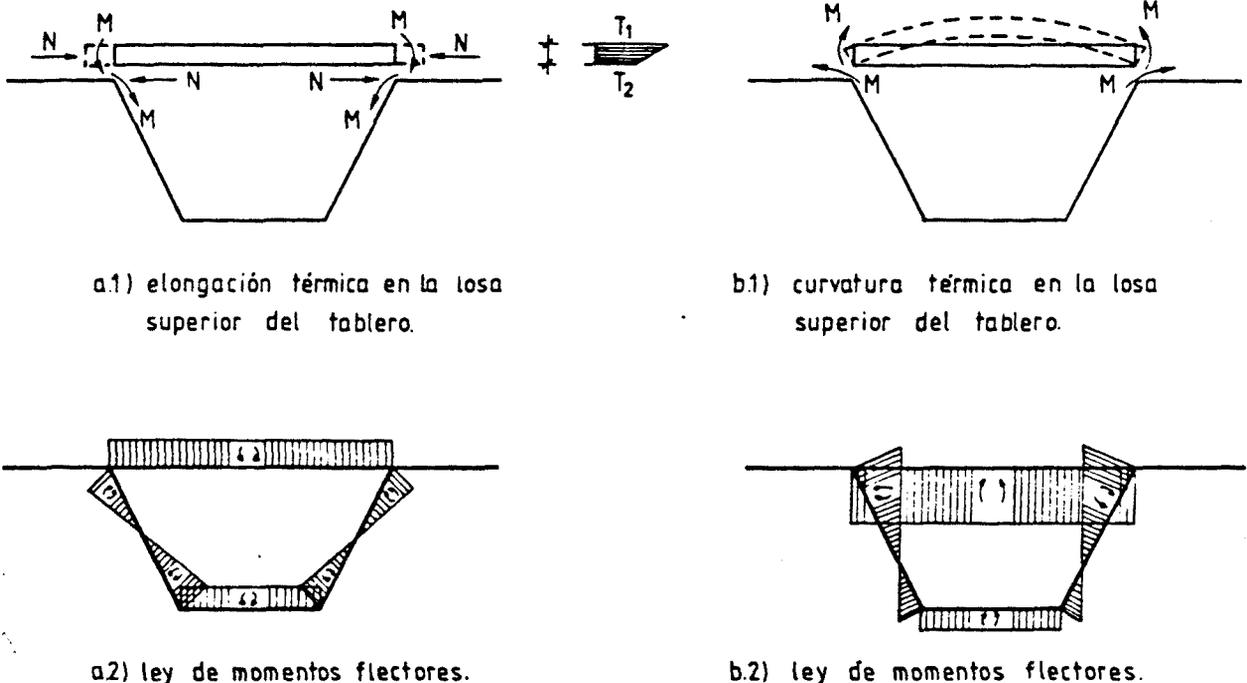


Fig. 4.24.- Leyes de momentos generados por la elongación y curvatura térmicas impuestas en la losa superior del tablero de puentes en cajón.

Estos efectos pueden verse recogidos de forma global si lo que se define como sollicitación térmica transversal es la diferencia de temperaturas existente entre el interior de la célula y el ambiente exterior. Es ésta la otra forma en cómo abordan otras normativas vigentes (DMT Denmark (29)) y otros autores (Johannson (51), Leonhardt et al. (56)) la respuesta tensional contenida en el plano de la sección, asociada a la distribución del campo de temperaturas.

El seguimiento hora a hora de la diferencia de temperaturas existente entre la célula y el ambiente exterior permite además visualizar varios instantes críticos en lo que se refiere al valor de dicha sollicitación térmica transversal, hecho éste que no ha sido contemplado hasta la fecha en las especificaciones de las normativas internacionales y que tiene su importancia como se verá a continuación

A lo largo del desarrollo de los estudios paramétricos relativos a la sección cajón -apartado 3.3 del capítulo anterior- se observa que las máximas diferencias positivas entre la temperatura de la célula y la del ambiente exterior acaecen en instantes próximos al de mínima temperatura ambiente, instante éste que no se encuentra próximo, en absoluto, al instante de máximo gradiente térmico mientras que las máximas diferencias negativas tienen lugar en instantes próximos al de máxima temperatura ambiente que, en este caso, si se sitúa, en el tiempo, próximo al instante de máximo gradiente térmico.

Por consiguiente, es interesante destacar que el análisis tensional transversal no se puede limitar al estudio de la diferencia de temperatura entre célula y ambiente exterior para un instante del día cercano al de máximo gradiente sino que también debe ser contemplado el instante para el cual el gradiente vertical es mínimo.

La necesidad de la consideración de ambos instantes en la determinación de la respuesta tensional contenida en el plano de la sección es una de las conclusiones importantes que se deriva de los estudios recientes realizados por Prakash Rao ((80)), el cual muestra de forma clara la importancia que tiene, desde un punto de vista tensional, el obtener la respuesta de la estructura marco de un puente cajón en un instante próximo al instante en el cual se induce el mínimo gradiente vertical -máximo gradiente negativo o mínimo positivo-.

Este hecho también se observa de forma clara en los estudios paramétricos realizados por el autor de esta tesis y presentados en el apartado 3.3 del capítulo anterior. En efecto, los resultados obtenidos muestran que las máximas diferencias positivas de temperatura entre el interior de la célula y el ambiente exterior se encuentran comprendidas entre los 14°C y los 16°C mientras que las máximas negativas se encuentran comprendidas entre los -8°C y los -10°C . Así pues, puede observarse que las máximas diferencias en valor absoluto acaecen precisamente en instantes cercanos al de mínimo gradiente térmico vertical y no al de máximo gradiente vertical.

Es conveniente señalar que los valores mencionados en el párrafo anterior se derivan del estudio paramétrico relativo a la sección cajón realizado en el capítulo anterior. En dicho estudio, se suponían unas condiciones de emplazamiento y ambientales que correspondían a la ciudad de Calgary, Canadá -latitud 51.03°N y rango diario de la temperatura ambiente de 20°C -. De ahí el que, en un principio, pueda objetarse que los saltos térmicos existentes entre la célula y el ambiente exterior obtenidos en el estudio paramétrico de la sección cajón no sean extrapolables a puentes emplazados en algún lugar de la geografía española.

Realizando un repaso a los resultados derivados de los estudios paramétricos relativos a cada una de las variables ambientales, físicas, estructurales y de emplazamiento que influyen en la respuesta térmica y tensional de los puentes cuando se llegaba a la conclusión de que las diferencias de temperatura existentes entre el interior de la célula y el ambiente exterior dependían fundamentalmente del día del año, del rango diario de la temperatura ambiente y de la velocidad del viento en el lugar de emplazamiento del puente observándose que tales diferencias, positivas y negativas, eran máximas en meses de verano de máxima intensidad de radiación solar global -Junio y Julio-.

Diversos análisis de puentes emplazados en estaciones meteorológicas de nuestro país en donde se han registrado altas radiaciones solares globales, bajas velocidades de viento y elevados rangos diarios de temperatura ambiente, condiciones éstas que proporcionan mayores diferencias de temperatura existentes entre el interior de la célula y el ambiente exterior, han dado como resultado unas máximas diferencias positivas que no han superado los 14.2°C y unas mínimas diferencias negativas que no han superado los -6.1°C .

La comparación entre estos valores y los obtenidos para el puente emplazado en la localidad de Calgary, Canadá, muestra la influencia, aunque leve, del rango diario de temperatura ambiente adoptado en el análisis. Así, en esta ciudad canadiense el rango es de 20°C mientras que en cualquiera de las estaciones meteorológicas principales de nuestro país, contempladas en las publicaciones del Instituto Nacional de Meteorología (Guía resumida del clima en España (46)), dicho rango no alcanza nunca ese valor siendo el máximo observado, para los meses de Junio y Julio, de 18°C y tiene lugar en la estación meteorológica de la base aérea de Tablada, cercana a la ciudad de Sevilla.

En base a todo lo expuesto con anterioridad se recomienda considerar en diseño de cara a la obtención de las tensiones térmicas transversales en puentes cajón las siguientes diferencias de temperatura entre el interior de la célula y el ambiente exterior:

$$\begin{aligned} T_{\text{célula}} - T_{\text{ambiente}} &= 14^{\circ}\text{C} \\ T_{\text{célula}} - T_{\text{ambiente}} &= -6^{\circ}\text{C} \end{aligned} \quad |4.14|$$

Dichos valores de diseño deben ser especialmente contemplados en aquellos lugares de emplazamiento en donde se prevean aumentos o descensos bruscos y repentinos de la temperatura ambiente exterior.

En cualquier caso, las diferencias térmicas presentan relevancia y pueden originar tensiones de tracción considerables tanto en las fibras del contorno exterior del cajón -la temperatura en la célula es mayor que la temperatura exterior- como en las fibras del contorno interior -la temperatura en la célula es menor que la temperatura exterior-. El reparto transversal de momentos flectores y el estado tensional ya dependerá, como es lógico, de los espesores de losas y almas así como de la rigidez relativa de los diferentes elementos que conforman la sección transversal.

Por último hay que hacer hincapié en que las diferencias térmicas señaladas en la expresión |4.14| son concomitantes con el mínimo gradiente térmico y con el máximo gradiente térmico vertical respectivamente.

4.2.6.- Puentes cajón multicelulares

Del análisis de los resultados obtenidos en el estudio paramétrico relativo a esta tipología transversal de puentes de hormigón -subapartado 3.3.2 del anterior capítulo- se extraía la conclusión de que su respuesta térmica no difería de forma apreciable de la obtenida en puentes cajón unicelulares ya que el sentido en el que actúan todos los parámetros y variables que intervienen en el fenómeno de la transmisión de calor en puentes de hormigón era el mismo para ambas tipologías.

En cuanto a las variaciones diarias de la temperatura media del puente multicelular, podía observarse que éstas eran ligeramente menores que las correspondientes al puente unicelular de igual ancho de tablero e igual canto total. No obstante, dichas diferencias no influyen de forma apreciable en el rango anual de la temperatura media.

Por consiguiente, la metodología a seguir de cara a la obtención de dicho rango anual de la temperatura media del puente multicelular es idéntica a la presentada para los puentes unicelulares. Así pues, se concluye que el puente cajón multicelular puede ser considerado como un puente cajón unicelular de idénticos anchos de losa superior e inferior y canto, en lo que se refiere a la determinación de la variación anual de su temperatura media.

Con respecto a los gradientes térmicos verticales, a igualdad de anchos de losa superior del tablero y del canto total, dicha acción térmica es ligeramente inferior en puentes cajón multicelulares. Dichas diferencias, de tipo cuantitativo, se encuentran íntimamente relacionadas con la relación de longitudes ancho de losa superior-ancho de losa inferior del tablero.

En general, tal relación de longitudes es menor en puentes cajón multicelulares que en unicelulares y es por ello por lo que los primeros se ven sometidos a menores gradientes térmicos verticales.

No obstante, no es necesario introducir ningún factor corrector relativo a la tipología multicelular puesto que dicha relación de longitudes ya está contemplada en el factor de corrección k_7 definido a la hora de determinar el gradiente térmico de diseño a considerar en puentes cajón unicelulares.

Por consiguiente, la metodología a seguir para la determinación de dicha acción térmica en los puentes multicelulares es exactamente la misma a la propuesta en puentes cajón unicelulares.

En cuanto al resto de acciones térmicas a considerar en diseño no aparecen diferencias apreciables en función del número de células existente a través de la sección transversal si bien puede afirmarse que los puentes cajón multicelulares son más susceptibles de verse solicitados con gradientes térmicos transversales que los puentes unicelulares. No obstante, los valores de diseño propuestos para esta última tipología cubren perfectamente el rango de gradientes transversales al que pueden verse sometidos los puentes multicelulares.

En resumen, los valores de diseño, mapas de isolfneas y fórmulas de diseño citados en el subapartado 4.2.5 y aplicables, en un principio, a puentes cajón unicelulares son perfectamente extrapolables a los puentes cajón multicelulares. El posible factor de corrección que contemplara la presencia de dos o más células en la sección transversal del puente se presenta de forma implícita en el factor corrector relativo a la relación de longitudes ancho de la losa superior del ta

blero-ancho de la losa inferior del tablero. Por todo ello, la metodología a seguir, tanto en una como en otra tipología transversal, es exactamente la misma.

4.2.7.- Influencia de la inercia variable sobre las acciones térmicas a considerar en diseño

Para luces de vano importantes es claro que el peso propio del tablero del puente representa una fracción considerable de la totalidad de la carga a soportar por la estructura. Ello conduce, en general, a adoptar tableros de canto variable decreciendo éste de forma gradual desde los apoyos intermedios hacia la clave del vano. Por otra parte, la sección cajón es una de las tipologías transversales que mejor se adapta a la construcción de puentes de hormigón pretensado y, en particular, a los construídos por voladizos sucesivos.

Ambas razones nos han llevado a estudiar la influencia de la inercia variable en puentes cajón sobre los valores de las acciones térmicas a considerar en el diseño.

Para ello se ha analizado la respuesta térmica del puente cajón unicelular de inercia y canto variables que se presenta en la figura 3.97 del capítulo anterior. Dicho análisis se ha reducido a la obtención de la respuesta térmica a nivel seccional de tres secciones transversales -sección sobre apoyo, sección intermedia a $L/4$ y sección en clave-.

El puente genérico ha sido emplazado en diversas estaciones meteorológicas del país y los resultados relativos al gradiente térmico y variación anual de la temperatura media para las tres secciones transversales se muestran en la tabla 4.24.

Acciones térmicas: Gradientes verticales (°C) y variaciones anuales de la temperatura media (°C)						
Estación meteorológica	Sección clave		Sección intermedia		Sección apoyo	
	GRAD	ΔT	GRAD	ΔT	GRAD	ΔT
Lugo	10.1	27.5	9.2	26.2	7.6	24.8
Finisterre	6.3	19.4	5.7	18.4	4.7	17.5
Santander	9.4	20.1	8.3	19.0	6.8	18.0
León	9.8	35.7	9.3	34.1	7.9	32.7
Burgos	10.0	32.7	9.2	31.3	7.8	29.9
Salamanca	9.6	37.4	9.1	35.7	7.8	34.2
Barajas	10.9	40.2	10.1	38.4	8.6	36.9
Ciudad Real	9.5	41.2	9.1	39.5	7.9	37.9
Albacete	10.1	41.1	9.6	39.4	8.2	37.7
Badajoz	10.8	37.0	10.1	35.4	8.7	33.7
Pamplona	11.6	32.7	10.6	31.2	8.9	29.8
Zaragoza	8.9	34.6	8.4	33.2	7.2	31.8
Montseny	9.8	26.5	8.8	25.2	7.3	24.0
Tortosa	10.1	31.5	9.2	30.0	7.7	28.6
San Javier	9.0	30.5	8.3	29.2	7.0	27.9
Córdoba	13.4	39.4	12.3	37.5	10.3	35.7
Granada	10.8	40.9	10.1	39.1	8.7	37.5
Huelva	14.2	33.7	12.8	31.8	10.7	29.9
Tarifa	6.6	21.2	6.1	20.2	5.2	19.3
Teruel	9.4	40.2	8.9	38.4	7.7	37.0

Tabla 4.24.- Gradientes térmicos y variaciones anuales de temperatura media en diferentes secciones transversales de un puente genérico de inercia variable (figura 3.97) emplazado en diversas estaciones meteorológicas de nuestro país.

Los resultados referentes a la variación anual de la temperatura media en las tres secciones transversales contempladas muestran que las diferencias máximas, existentes entre la sección de apoyos y la sección de clave, son pequeñas. Por

otra parte, las temperaturas medias máximas alcanzadas en ambas secciones transversales son muy similares observándose que las diferencias máximas tienen lugar en estaciones meteorológicas en las que la velocidad de viento supuesta en el análisis es pequeña; en cualquier caso no se aprecian diferencias superiores a los 3.3°C . Para las temperaturas medias mínimas dichas diferencias son incluso más reducidas no alcanzándose para ninguna estación meteorológica de las analizadas una diferencia superior a los 0.8°C .

Ello permite concluir que la influencia de la inercia variable sobre la variación anual de la temperatura media del puente y sobre los valores de la máxima y mínima temperatura media del puente a lo largo del año no es significativa y, por consiguiente, no merece su consideración en diseño.

Así pues, en lo que se refiere a la determinación de la variación anual de la temperatura media del puente, y obtención de los esfuerzos de continuidad debido a la posible hiperestaticidad de la estructura del puente, dicha acción térmica se evaluará en la sección de clave del vano. El rango anual de la temperatura media de esta sección será considerado como rango anual de la temperatura media del puente quedando dicho valor del lado de la seguridad puesto que la sección de clave de un puente de inercia variable es aquella sección para la cual la temperatura media máxima es más alta y la temperatura media mínima es más baja.

En cuanto al gradiente térmico, los resultados muestran que la influencia de la inercia variable es significativa. En efecto, para algunos de los puentes emplazados en diversas estaciones meteorológicas se aprecian diferencias del orden del 27% entre los gradientes térmicos inducidos en la sección de clave y en la sección de apoyos.

Mathivat (64) obtiene para diferentes puentes cajón de inercia constante e inercia variable la tensión máxima de tracción existente en la fibra inferior de la sección de clave del puente generada por la actuación de un gradiente térmico y en base a los resultados obtenidos para dicha tracción máxima llega a la conclusión de que un puente de inercia variable es aproximadamente unavez y media más sensible a los gradientes térmicos que un puente de inercia constante. Esta conclusión es válida si se supone que el gradiente térmico es constante a lo largo del tablero, hecho éste que como se ha demostrado con anterioridad no se verifica en la realidad.

Planteemos el problema en su forma más general. Sea un tramo simétrico de un puente de inercia variable perfectamente empotrado en sus extremos sometido a un gradiente térmico cuyo valor depende de la abscisa curvilínea x (figura 4.25).

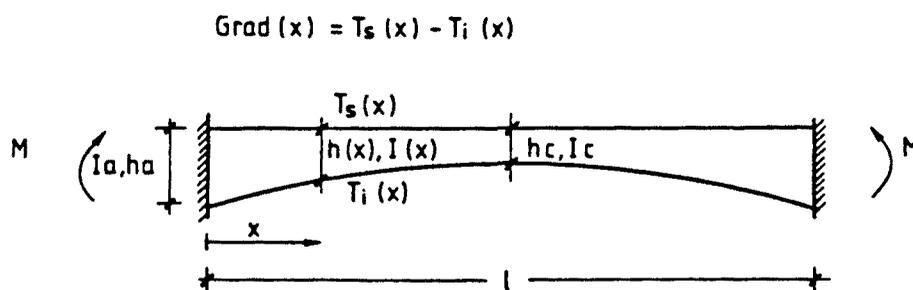


Fig. 4.25.- Tramo simétrico de puente de inercia variable sometido a un gradiente térmico variable.

Los esfuerzos flectores de empotramiento perfecto inducidos por el gradiente térmico pueden obtenerse mediante la aplicación de la siguiente fórmula integral:

$$M = \alpha \cdot E \cdot \frac{\int_0^l \frac{\text{Grad}(x)}{h(x)} dx}{\int_0^l \frac{dx}{I(x)}}$$

Definiendo el coeficiente de forma f como función de las características geométricas del tramo de inercia variable

$$f = \frac{2l}{I_c \int_0^l \frac{dx}{I(x)}} = \frac{1}{I_c \int_0^{l/2} \frac{dx}{I(x)}} \quad |4.15|$$

la expresión que permite obtener el momento de empotramiento perfecto puede reescribirse de la siguiente forma

$$M = f \cdot \frac{\alpha E I_c}{l} \int_0^{l/2} \frac{\text{Grad}(x)}{h(x)} dx \quad |4.16|$$

Conocido dicho momento de empotramiento puede obtenerse el valor del gradiente térmico que, supuesto constante a lo largo de la directriz del tablero, induciría exactamente el mismo momento de empotramiento perfecto.

Igualando ambas expresiones:

$$f \cdot \frac{\alpha E I_c}{l} \int_0^{l/2} \frac{\text{Grad}(x)}{h(x)} dx = f \cdot \frac{\alpha E I_c}{l} \text{Grad} \cdot \int_0^{l/2} \frac{dx}{h(x)}$$

se obtiene que

$$\text{Grad} = \frac{\int_0^{l/2} \frac{\text{Grad}(x)}{h(x)} dx}{\int_0^{l/2} \frac{dx}{h(x)}} \quad |4.17|$$

La integral del denominador, para una variación parabólica del canto, tiene la siguiente solución analítica:

$$\int_0^{1/2} \frac{dx}{h(x) = 2h_c} = \frac{\arctg \sqrt{\frac{h_a}{h_c} - 1}}{\sqrt{\frac{h_a}{h_c} - 1}} \quad |4.18|$$

En la tabla 4.25 se presentan los valores de la expresión |4.18| correspondientes a diversos puentes cajón de inercia variable con variación parabólica del canto construidos en Francia y España.

A la vista de los resultados presentados en esta tabla puede adoptarse un valor medio de dicha integral igual a 18.0. En cualquier caso, la integral de la expresión |4.18| para el puente a analizar en cuestión puede afrontarse de forma sencilla desde un punto de vista numérico o analítico.

En cuanto a la integral que aparece en el numerador de la expresión |4.17| puede observarse que aquélla no es integrable analíticamente a no ser que, para cada caso, se obtuviera una ley analítica de la distribución de gradientes a lo largo de la directriz. Ello es realmente complejo y, por lo tanto, la forma de abordar el problema debe hacerse desde un punto de vista numérico obteniendo valores del gradiente en puntos discretos del puente y llevando a cabo una integración numérica mediante los métodos usuales -trapecio, Simpson, etc...-.

No obstante, en diseño puede abordarse el problema de forma más simplificada. En efecto, la figura 4.26 muestra los perfiles cualitativos de la ley de gradientes, cantos y el cociente entre ambos a lo largo del puente de inercia variable.

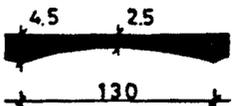
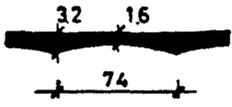
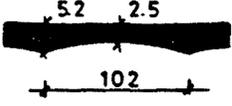
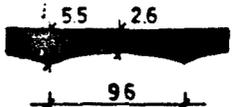
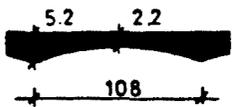
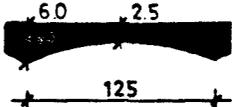
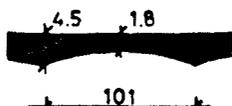
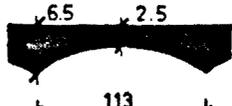
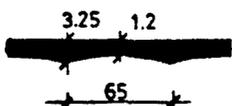
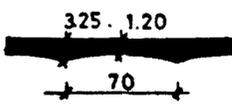
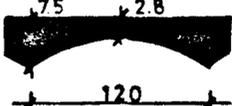
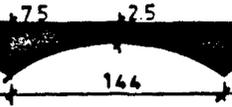
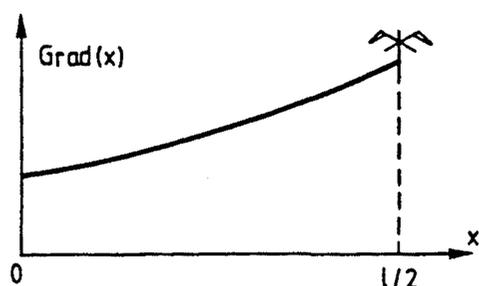
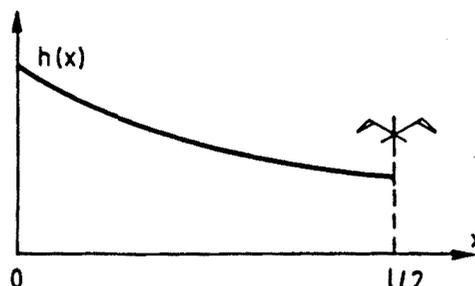
Puente	Dimensiones	$\frac{h_a}{h_c}$	$\int_0^{1/2} \frac{dx}{h(x)}$
Viaducto de la Fuente del Azufre		1.8	21.2
Puente de los Vados		2.0	18.2
Puente de Woippy		2.1	15.8
Puente de Ascó sobre el Ebro		2.1	14.2
Puente de Joinville		2.4	18.1
Puente de Molins		2.4	18.4
Puente en Castejón sobre el Ebro		2.5	20.3
Puente de Orleans		2.6	16.1
Viaducto de Frieira sobre el Miño		2.7	19.0
Viaducto del Barranco de Priego		2.7	20.5
Viaducto de Magnan		2.7	15.1
Viaducto de Catoira sobre el Ulla		3.0	19.5

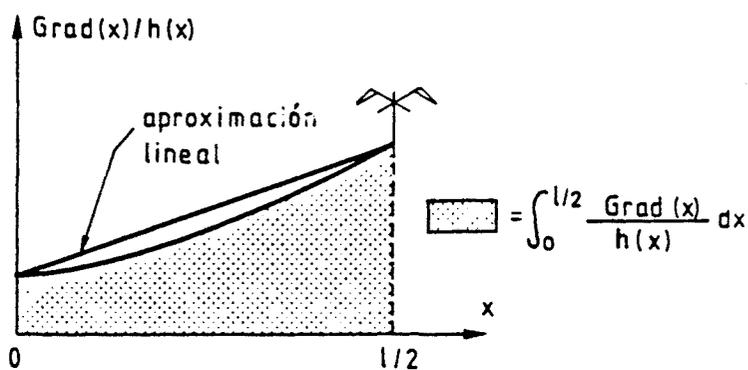
Tabla 4.25.- Valores de la integral $\int_0^{1/2} \frac{dx}{h(x)}$ para diferentes puentes cajón de inercia variable construidos en Francia y España.



a) ley de gradientes.



b) ley de cantos.



c) ley de gradientes/cantos

Fig. 4.26.- Leyes de variación del gradiente, del canto y del cociente entre ambos para tramos simétricos de puentes de inercia variable.

Es evidente que la ley $\text{Grad}(x)/h(x)$ tiene el mismo perfil cualitativo independientemente de la forma en cómo varía la tipología transversal del puente. Por consiguiente, parece oportuno el aproximar el área rayada de la figura 4.26.c por el área del trapecio circunscrito quedando ello siempre del lado de la seguridad.

Así se obtiene que

$$\int_0^{l/2} \frac{\text{Grad}(x)}{h(x)} dx \approx \frac{\frac{\text{Grad}_{\text{clave}}}{h_{\text{clave}}} + \frac{\text{Grad}_{\text{apoyo}}}{h_{\text{apoyo}}}}{2} \cdot \frac{l}{2} \quad |4.19|$$

con lo cual resulta que el gradiente térmico equivalente a adoptar en diseño en puentes de inercia variable puede ser a proximado por la siguiente expresión:

$$\text{Grad} = \frac{\int_0^L \frac{1/2 \text{ Grad}(x)}{h(x)} dx}{\int_0^L \frac{1/2 dx}{h(x)}} \approx \frac{1}{72} \left(\frac{\text{Grad}_{\text{clave}}}{h_{\text{clave}}} + \frac{\text{Grad}_{\text{apoyo}}}{h_{\text{apoyo}}} \right) \cdot L \quad |4.20|$$

A modo ilustrativo se presentan en la tabla 4.26 los gradientes térmicos equivalentes y constantes a lo largo de la directriz para el puente cajón de inercia variable analizado en el subapartado 3.3.1.2 del capítulo anterior (figura 3.97), el cual se emplazará en diversas estaciones metereológicas de nuestro país. Recordemos que dicho puente presenta una luz de vano principal de 100 metros y el canto de la sec ción transversal varía parabólicamente desde 2.20 metros en clave a 5.00 metros en apoyos.

En dicha tabla puede observarse que el gradiente térmico de diseño no coincide ni con el valor medio entre el gra diente existente en apoyos y el existente en clave ni con el gradiente que aparece en una sección transversal situada a L/4 sino que dicho gradiente de diseño presenta un valor que, independientemente del lugar de emplazamiento, se encuentra comprendido entre los valores de los gradientes correspondientes a la sección de apoyos y a la sección intermedia situada a L/4.

Gradientes térmicos en puentes de inercia variable (°C)				
Estación metereológica	Gradiente sección clave	Gradiente sección a L/4	Gradiente sección apoyos	Gradiente de diseño
Lugo	10.1	9.2	7.6	8.5
Finisterre	6.3	5.7	4.7	5.3
Santander	9.4	8.3	6.8	7.8
León	9.8	9.3	7.9	8.4
Burgos	10.0	9.2	7.8	8.5
Salamanca	9.6	9.1	7.8	8.2
Barajas	10.9	10.1	8.6	9.3
Ciudad Real	9.5	9.1	7.9	8.2
Albacete	10.1	9.6	8.2	9.2
Badajoz	10.8	10.1	8.7	9.2
Pamplona	11.6	10.6	8.9	9.8
Zaragoza	8.9	8.4	7.2	7.6
Montseny	9.8	8.8	7.3	8.2
Tortosa	10.1	9.2	7.7	8.5
San Javier	9.0	8.3	7.0	7.6
Córdoba	13.4	12.3	10.3	11.3
Granada	10.8	10.1	8.7	9.2
Huelva	14.2	12.8	10.7	11.9
Tarifa	6.6	6.1	5.2	5.6
Teruel	9.4	8.9	7.7	8.1

Tabla 4.26.- Valores del gradiente térmico a considerar como gradiente constante en el diseño del puente cajón de inercia variable de la figura 3.97 del capítulo anterior en diferentes estaciones metereológicas de nuestro país.

En resumen, la metodología a seguir de cara a la obtención del gradiente térmico de diseño en puentes de inercia variable es la siguiente:

- La expresión general de dicho gradiente viene definida por la siguiente integral:

$$\text{GRAD} = \frac{\int_0^{1/2} \frac{\text{Grad}(x)}{h(x)} dx}{\int_0^{1/2} \frac{dx}{h(x)}}$$

- La expresión integral del numerador puede aproximarse mediante la siguiente expresión

$$\frac{1}{4} \cdot \left(\frac{\text{Grad}_{\text{clave}}}{h_{\text{clave}}} + \frac{\text{Grad}_{\text{apoyo}}}{h_{\text{apoyo}}} \right) \cdot l$$

- La expresión integral del denominador, a falta de llevar a cabo una integración numérica para cada puente, puede aproximarse a un valor igual a 18, valor éste próximo a la media de los valores que adopta dicha integral para la mayoría de los puentes de inercia variable con variación parabólica del canto.
- En diseño puede adoptarse la expresión |4.20| para la determinación del gradiente térmico en puentes de inercia variable

$$\text{GRAD} = \frac{1}{72} \left(\frac{\text{Grad}_{\text{clave}}}{h_{\text{clave}}} + \frac{\text{Grad}_{\text{apoyo}}}{h_{\text{apoyo}}} \right) \cdot l$$

Así pues, para definir dicha acción térmica mediante esta expresión, es necesario conocer únicamente el valor del gradiente en la sección de clave y en la sección de apoyo; dichos gradientes se obtendrán a partir de las expresiones |4.10| o |4.11| dependiendo del método elegido -método exacto o método simplificado-.

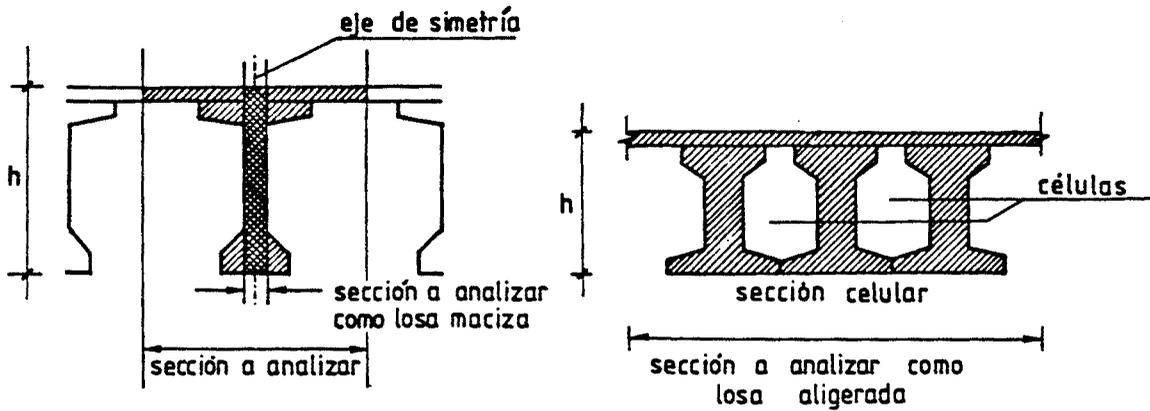
Analizada la influencia de la inercia variable sobre la respuesta térmica de los puentes cajón y, en particular, sobre el rango anual de la temperatura media del puente y sobre el gradiente térmico resta únicamente contemplar la influencia de dicha inercia variable sobre las demás acciones térmicas.

A la vista de los resultados obtenidos a lo largo del presente capítulo y del anterior puede concluirse que los valores de diseño asignados a los gradientes verticales negativos, gradientes transversales y sollicitaciones térmicas transversales en puentes cajón unicelulares son valores que se mantienen aproximadamente constantes independientemente de la variación de inercia a lo largo de la directriz del puente. Por ello, de cara al análisis y diseño de puentes cajón de inercia variable frente a tales acciones térmicas se adoptarán los valores de diseño de los gradientes verticales negativos, gradientes transversales y sollicitaciones transversales térmicas anteriormente definidos en las expresiones |4.12|, |4.13| y |4.14|, del subapartado 4.2.5.

4.2.8.- Puentes de vigas

Del análisis de los resultados derivados del estudio paramétrico referente a los puentes de vigas, presentados en el subapartado 3.5.2 del capítulo anterior, se extraían algunas conclusiones de relevancia.

Por una parte, la obtención de la respuesta térmica de los puentes de vigas se puede afrontar, desde un punto de vista numérico, de igual forma que en puentes losa maciza o aligerada dependiendo respectivamente de si las vigas presentan una distancia interejos superior al ancho de la viga o se encuentran en contacto conformándose así una sección transversal de tipo aligerada (figura 4.27).



el eje de simetría puede ser considerado como eje unidireccional de flujo de calor -sección losa maciza suponiendo flujo unidireccional-

el tablero de vigas se transforma en una sección celular -sección losa aligerada-

Fig. 4.27.- Puentes de vigas. Su asimilación a puentes losa.

Asimismo, todos los parámetros físicos, ambientales, climatológicos y de emplazamiento que pueden influir en la respuesta térmica y tensional de los puentes de vigas actúan en el mismo sentido en el que lo hacen en puentes losa.

En base a lo expuesto en los párrafos anteriores y dado el eminente carácter isostático de los puentes de hormigón que adoptan esta tipología transversal, no se ha considerado oportuno el llevar a cabo estudios tan exhaustivos como los realizados anteriormente en este capítulo para otras tipologías de cara a la determinación de las acciones térmicas a considerar en el diseño y análisis de los puentes de vigas de hormigón emplazados en diferentes lugares de la geografía española.

En cualquier caso, pueden extraerse algunas conclusiones en lo que se refiere a la definición de las acciones térmicas de diseño en los puentes de vigas:

- Las acciones térmicas de diseño obtenidas para puentes losa -expresiones |4.1|, |4.2|, |4.3| y |4.4| del subapartado 4.2.3- son aplicables a los puentes de vigas en los que la distancia interejos sea superior al ancho de la viga simple si bien el gradiente térmico vertical positivo debe ser corregido mediante un factor de corrección, mayor que la unidad, que contemple la influencia de la distribución de temperaturas en la losa superior sobre el valor de esta acción térmica.

El análisis de diversos tableros de puentes de vigas con canto total de 0.90 metros emplazados en diferentes estaciones meteorológicas de nuestro país da como resultado que dicho factor de corrección, entendido éste como el cociente entre los valores del gradiente térmico obtenido en puentes de vigas y puentes losa de igual canto, se encuentra próximo a 1.30.

- Las acciones térmicas de diseño obtenidas para puentes losa aligerada -expresiones |4.5|, |4.6|, |4.7| y |4.8| del subapartado 4.2.4- son aplicables a los puentes de vigas en los que la distancia interejos sea justamente el propio ancho de la viga simple, sin necesidad de introducir factores de corrección para ninguna acción.

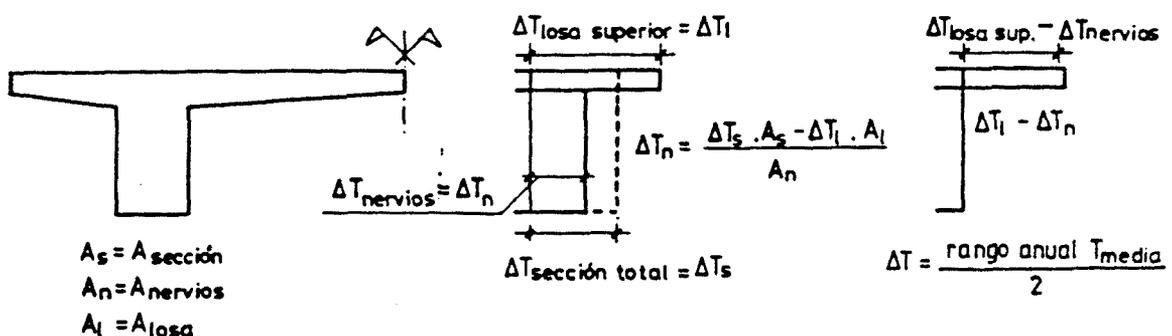
Por último, conviene señalar la importancia que adquiere en la tipología transversal de los puentes de vigas en π y, en general, en aquellos tableros de puentes de hormigón claramente nervados, las dilataciones o contracciones y curvaturas térmicas impuestas en la losa superior del tablero.

Efectivamente, la obtención de la respuesta tensional contenida en el plano de la sección -tensiones transversales secundarias- frente a las deformaciones térmicas impuestas en

la losa superior da como resultado la aparición de unos momentos torsores según el eje longitudinal que solicitan ambos nervios de la sección en π y de unos momentos flectores transversales en la losa pudiendo ser la magnitud de las tensiones inducidas no despreciable.

En cuanto al gradiente térmico, se ha podido observar a lo largo del desarrollo del presente capítulo que para losas de espesores próximos o inferiores a los 30 cms, espesores éstos comúnmente adoptados para la losa superior de los puentes de vigas en π -puente de Roquemaure (Mathivat (64)), viaductos de accesos a Galicia (Hormigón pretensado. Realizaciones españolas. ATEP (9))- dicha acción puede aproximarse mediante un gradiente lineal de valor $0.55^{\circ}\text{C}/\text{cm}$.

Las dilataciones o contracciones diferenciales a considerar en la losa superior del tablero pueden obtenerse como diferencia de los incrementos de temperatura contemplando dos secciones parciales: la propia losa tablero y el nervio de la viga. La figura 4.28 muestra claramente cómo obtener dicho incremento o decremento térmico diferencial.



a) Semisección transversal

b) Distribuciones térmicas en secciones parciales

c) Distribución térmica de diseño

Fig. 4.28.- Incrementos o decrementos uniformes de temperatura de diseño a considerar de cara a la obtención de la respuesta tensional contenida en el plano de la sección de los puentes en π frente a la acción térmica ambiental.

Efectivamente, es posible determinar los rangos anuales de la temperatura media de la losa superior del tablero y de la sección transversal del tablero mediante las expresiones expuestas a lo largo de este capítulo. A partir de dichos rangos se obtienen los incrementos o decrementos uniformes de temperatura sobre la losa superior y la sección transversal en su totalidad, deduciéndose a partir de éstos el incremento o decremento uniforme de temperatura en los nervios mediante proporcionalidad de áreas. El incremento o decremento térmico de diseño a considerar viene definido por la diferencia entre los incrementos o decrementos uniformes de temperatura impuestos en las dos secciones parciales -losa superior y nervios-.

En resumen, las acciones térmicas de diseño a considerar a la hora de obtener la respuesta tensional contenida en el plano de la sección transversal de los puentes en π son las siguientes:

$$\Delta T = \Delta T_{\text{losa superior}} - \Delta T_{\text{nervios}} \quad |4.21|$$

GRAD=0.55°C/cm

4.3.- EJEMPLOS

A continuación se exponen diversos ejemplos en los que se muestra la metodología a seguir de cara a la determinación de las acciones térmicas de diseño a considerar en el proyecto de puentes de hormigón con diferentes tipologías transversales. Los puentes analizados están ya construídos ubicándose en diversos lugares de la geografía española.

4.3.1.- Puentes losa

- Paso superior de la ronda norte de Zaragoza sobre la autopista Bilbao-Zaragoza (ATEP. Realizaciones españolas (9)).
Puente losa maciza de canto constante igual a 1.0 metro.

Rango anual de la temperatura media del puente:

Mapa de isolíneas (figura 4.5)	$\Delta T_{ref}=33.5^{\circ}C$
Factor corrector relativo canto (figura 4.7)	$k_1=0.96$
<u>Rango anual de temperatura media de diseño</u> (expresión 4.1)	$\Delta T=32.2^{\circ}C$

Gradiente térmico:

Mapa de isolíneas (figura 4.8)	$GRAD_{ref}=10.5^{\circ}C$
Factor corrector relativo canto (figura 4.9)	$k_2=0.83$
Factor corrector relativo espesor de asfalto (figura 4.10)	
(sin asfalto)	$k_3=1.00$
(e=7.0 cm)	$k_3=1.15$
<u>Gradiente térmico de diseño (sin asfalto)</u> (expresión 4.2)	$GRAD=8.7^{\circ}C$
<u>Gradiente térmico de diseño (espesor asfalto=7.0 cm)</u> (expresión 4.2)	$GRAD=10.0^{\circ}C$

Gradiente térmico inverso:

<u>Gradiente térmico inverso de diseño</u> <u>(sin asfalto)</u> (expresión 4.4)	GRAD _{neg} = -2.0°C
<u>Gradiente térmico inverso de diseño</u> <u>(e=7.0 cm)</u> (expresión 4.4)	GRAD _{neg} = 0.0°C

- Puente de San Isidro. Accesos (ATEP. Realizaciones españolas (9)). Puente losa aligerada de canto igual a 1.20 metros.

Rango anual de la temperatura media del puente:

Mapa de isolíneas (figura 4.5)	$\Delta T_{ref} = 39.0^\circ C$
Factor corrector relativo canto (figura 4.7)	$k_1 = 0.95$
Factor corrector aligeramientos (figura 4.12)	$k_5 = 1.02$
<u>Rango anual de temperatura media de diseño</u> (expresión 4.5)	$\Delta T = 37.8^\circ C$

Gradiente térmico:

Mapa de isolíneas (figura 4.8)	GRAD _{ref} = 12.8°C
Factor corrector relativo canto (figura 4.9)	$k_2 = 0.78$
Factor corrector relativo espesor de asfalto (figura 4.14)	
(sin asfalto)	$k_3 = 1.00$
(e=7.0 cm)	$k_3 = 1.18$
Factor corrector aligeramientos (figura 4.13)	$k_6 = 1.06$
<u>Gradiente térmico de diseño (sin asfalto)</u> (expresión 4.6)	GRAD = 10.6°C
<u>Gradiente térmico de diseño (e=7.0 cm)</u> (expresión 4.6)	GRAD = 12.5°C

Gradiente térmico inverso:

<u>Gradiente térmico inverso de diseño</u> <u>(sin asfalto) (expresión 4.8)</u>	GRAD _{neg} = -2.0°C
<u>Gradiente térmico inverso de diseño</u> <u>(e=7.0 cm) (expresión 4.8)</u>	GRAD _{neg} = 0.0°C

4.3.2.- Puentes cajón

- Viaductos de acceso al puente de Rande. (ATEP. Realizaciones españolas (9)). Puente cajón unicelular de canto constante igual a 2.32 metros.

Rango anual de la temperatura media del puente:

Mapa de isolíneas (figura 4.16)	$\Delta T_{ref} = 22.1^\circ C$
Factor corrector relativo canto (figura 4.17)	$k_1 = 0.99$
<u>Rango anual de temperatura media de</u> <u>diseño (expresión 4.9)</u>	$\Delta T = 21.9^\circ C$

Gradiente térmico:

Mapa de isolíneas (figura 4.18)	GRAD _{ref} = 7.9°C
Factor corrector relativo canto (figura 4.19)	$k_2 = 0.98$
Factor corrector espesor de asfalto (figura 4.21)	
(sin asfalto)	$k_3 = 1.00$
(e=7.0 cms)	$k_3 = 1.11$
Factor corrector ancho losa superior-ancho losa inferior (figura 4.20)	$k_7 = 1.05$
<u>Gradiente térmico de diseño (sin</u> <u>asfalto) (expresión 4.10)</u>	GRAD = 8.1°C
<u>Gradiente térmico de diseño (e=7.0</u> <u>cm) (expresión 4.10)</u>	GRAD = 9.0°C

Gradiente térmico inverso:

<u>Gradiente térmico inverso de diseño</u> (sin asfalto) (expresión 4.12)	GRAD _{neg} = -2.0°C
<u>Gradiente térmico inverso de diseño</u> (e=7.0 cm) (expresión 4.12)	GRAD _{neg} = 0.0°C

Gradiente térmico transversal:

<u>Gradiente térmico transversal de diseño</u> (expresión 4.13)	GRAD _{trans} = 0.0°C
---	-------------------------------

Solicitaciones térmicas transversales:

<u>Temperatura célula - Temperatura ambiente</u> (expresión 4.14)	14.0°C
<u>Temperatura célula - Temperatura ambiente</u> (expresión 4.14)	-6.0°C

- Puente Ingeniero Carlos Fernández-Casado. Puente de Barrios de Luna. (Manterola, Fernández-Troyano (62)). Puente cajón tricelular de canto constante igual a 2.40 metros.

Rango anual de la temperatura media del puente:

Mapa de isolíneas (figura 4.16)	$\Delta T_{ref} = 28.0^\circ C$
Factor corrector relativo canto (figura 4.17)	$k_1 = 0.99$
<u>Rango anual de temperatura media de diseño</u> (expresión 4.9)	$\Delta T = 27.7^\circ C$

Gradiente térmico:

Mapa de isolíneas (figura 4.18)	GRAD _{ref} = 8.6°C
Factor corrector relativo canto (figura 4.19)	$k_2 = 0.96$
Factor corrector espesor asfalto (figura 4.21)	
(sin asfalto)	$k_3 = 1.00$
(e=7.0 cm)	$k_3 = 1.12$

Factor corrector ancho losa superior-ancho losa inferior (figura 4.20)	$k_7=0.94$
<u>Gradiente térmico de diseño (sin asfalto)</u> (expresión 4.10)	GRAD=7.8°C
<u>Gradiente térmico de diseño (e=7.0 cm)</u> (expresión 4.10)	GRAD=8.7°C

Gradiente térmico (método simplificado):

Gradiente inicial de referencia	GRAD _{ref} =9.1°C
Factor corrector relativo canto (figura 4.19)	$k_2=0.96$
Factor corrector espesor asfalto (figura 4.21)	
(sin asfalto)	$k_3=1.00$
(e=7.0 cm)	$k_3=1.12$
Factor corrector ancho losa superior-ancho losa inferior (figura 4.20)	$k_7=0.94$
Factor corrector velocidad de viento (figura 4.22) ($v_{\text{emplazamiento}}=5.0$ m/seg)	$k_4=0.92$
<u>Gradiente térmico de diseño (sin asfalto)</u> (expresión 4.11)	GRAD=7.6°C
<u>Gradiente térmico de diseño (e=7.0 cms)</u> (expresión 4.11)	GRAD=8.5°C

Gradiente térmico inverso:

<u>Gradiente térmico inverso de diseño (sin asfalto)</u> (expresión 4.12)	GRAD _{neg} =-2.0°C
<u>Gradiente térmico inverso de diseño (e=7.0 cm)</u> (expresión 4.12)	GRAD _{neg} =0.0°C

Gradiente térmico transversal:

<u>Gradiente térmico transversal de diseño</u> (expresión 4.13)	GRAD _{trans} =0.0°C
---	------------------------------

Solicitaciones térmicas transversales:

<u>Temperatura célula - Temperatura ambiente</u> (expresión 4.14)	14.0°C
<u>Temperatura célula - Temperatura ambiente</u> (expresión 4.14)	-6.0°C

- Puente de Molíns de Rey. (ATEP. Realizaciones españolas (9)). Puente cajón unicelular de inercia variable y canto variable de 2.50 metros a 6.0 metros.

Rango anual de la temperatura media del puente:

Mapa de isolíneas (figura 4.16)	$\Delta T_{ref} = 26.4^\circ\text{C}$
Factor corrector relativo canto (figura 4.17)	$k_1 = 0.985$
<u>Rango anual de temperatura media de diseño</u> (expresión 4.9)	$\Delta T = 26.0^\circ\text{C}$

Gradiente térmico:

Mapa de isolíneas (figura 4.18)	$GRAD_{ref} = 8.4^\circ\text{C}$
Sección clave:	
Factor corrector relativo canto (figura 4.19)	$k_2 = 0.94$
Factor corrector espesor asfalto (figura 4.21)	
(sin asfalto)	$k_3 = 1.00$
(e=7.0 cm)	$k_3 = 1.13$
Factor corrector ancho losa superior-ancho losa inferior (figura 4.20)	$k_7 = 0.99$
Gradiente en clave (sin asfalto) (expresión 4.10)	$GRAD_{clave} = 7.8^\circ\text{C}$
Gradiente en clave (e=7.0 cms) (expresión 4.10)	$GRAD_{clave} = 8.8^\circ\text{C}$

Gradiente en clave (sin asfalto) (expresión 4.10)	GRAD _{clave} =8.5°C
Gradiente en clave (e=7.0 cms) (expresión 4.10)	GRAD _{clave} =9.6°C
Sección apoyos:	
Factor corrector relativo canto (figura 4.19)	k ₂ =0.75
Factor corrector espesor asfalto (figura 4.21)	
(sin asfalto)	k ₃ =1.00
(e=7.0 cm)	k ₃ =1.29
Factor corrector ancho losa superior-ancho losa inferior (figura 4.20)	k ₇ =0.99
Factor corrector velocidad de viento (figura 4.22) (v _{emplazamiento} =4.0 m/seg)	k ₄ =1.00
Gradiente en apoyos (sin asfalto) (expresión 4.10)	GRAD _{apoyo} =6.8°C
Gradiente en apoyos (e=7.0 cm) (expresión 4.10)	GRAD _{apoyo} =8.7°C
<u>Gradiente térmico de diseño (sin asfalto) (expresión 4.20)</u>	GRAD=7.9°C
<u>Gradiente térmico de diseño (e=7.0 cm) (expresión 4.20)</u>	GRAD=9.2°C

Gradiente térmico inverso:

<u>Gradiente térmico inverso de diseño (sin asfalto) (expresión 4.12)</u>	GRAD _{neg} =-2.0°C
<u>Gradiente térmico inverso de diseño (e=7.0 cm) (expresión 4.12)</u>	GRAD _{neg} =0.0°C

Gradiente térmico transversal:

<u>Gradiente térmico transversal de diseño (expresión 4.13)</u>	GRAD _{trans} =0.0°C
---	------------------------------

Solicitaciones térmicas transversales:

<u>Temperatura célula - Temperatura ambiente (expresión 4.14)</u>	14.0°C
<u>Temperatura célula - Temperatura ambiente (expresión 4.14)</u>	-6.0°C

C A P I T U L O 5

ESTADOS TENSIONALES DE DISEÑO
INDUCIDOS POR LA ACCION TERMICA AMBIENTAL
EN PUENTES DE HORMIGON

5.1.- INTRODUCCION

Una vez conocida la respuesta de los puentes de hormigón en lo que se refiere a la determinación de las acciones térmicas a considerar en el diseño de tales estructuras, ello ha sido recogido de forma exhaustiva a lo largo del desarrollo del capítulo anterior, resta conocer las distribuciones tensionales inducidas en los puentes de hormigón, asociadas a las distribuciones del campo de temperaturas originado por los efectos térmicos ambientales. Este es el principal objetivo que persigue este capítulo.

Los estados tensionales a analizar serán los siguientes:

- Estado tensional térmico longitudinal primario.
- Estado tensional térmico transversal primario.
- Estado tensional térmico transversal secundario.

Recordemos que las distribuciones de tensiones primarias -autoequilibradas-, tanto longitudinales como transversales, vienen originadas por la no linealidad de la distribución de temperaturas existente a través de las secciones transversales de las tipologías adoptadas en el diseño de puentes de hormigón mientras que las distribuciones tensionales secundarias vienen originadas por la propia hiperestaticidad de la estructura ya sea a nivel sección -marco cajón-, ya sea a nivel estructural -dependiente de la tipología longitudinal del puente-.

De acuerdo con lo expuesto anteriormente, las distribuciones de tensiones térmicas a analizar en esta tesis se limitan al estudio tensional inducido, de forma intrínseca, por la propia acción térmica. Por consiguiente, no se estudiarán las distribuciones de tensiones térmicas longitudinales secundarias -de continuidad- originadas por la propia hi

perestaticidad de la estructura longitudinal del puente, remitiendo al lector a diversos estudios realizados en este campo recientemente (Aparicio (6), Cooke et al. (24)). No obstante, ello no elimina la posibilidad cierta de que, en determinados casos, se incida sobre la influencia que pueden ejercer los estados tensionales térmicos longitudinales primarios y los estados tensionales térmicos transversales sobre la respuesta tensional global de la estructura del puente.

En base a lo expuesto, se analizará la respuesta tensional a nivel seccional inducida por la acción térmica en las tipologías transversales comúnmente adoptadas en diseño, se visualizarán para cada una de ellas las posibles zonas críticas sometidas a máximas tracciones y se propondrán recomendaciones de actuación relativas a la geometría de la sección transversal y a la disposición de armaduras para poder absorber las tensiones térmicas longitudinales primarias y las tensiones térmicas transversales primarias y secundarias.

5.2.- DISTRIBUCIONES TENSIONALES EN PUENTES DE HORMIGON

De los tres estados tensionales citados con anterioridad en el apartado 5.1 de este capítulo se ha podido observar a lo largo del desarrollo de la presente tesis que las tensiones transversales primarias, originadas por la no linealidad de la distribución del campo de temperaturas, son prácticamente despreciables puesto que los diferentes elementos que conforman la tipología transversal de aquellos puentes para los cuales aparecen dichas tensiones, fundamentalmente puentes cajón, suelen presentar pequeños espesores. En efecto, los espesores de losas superior e inferior, voladizos y almas son reducidos pudiendo apreciarse que las distribuciones del campo de temperaturas a través de dichos elementos son prácticamente lineales; recordemos que una de las conclusiones que se derivaba de los estudios paramétricos presentados en el tercer capítulo era que cuanto menor fuera el espesor del elemento o sección a analizar menos acusada era la no linealidad de la distribución de temperaturas.

Así pues, el estudio tensional se limitará a analizar las distribuciones de tensiones longitudinales primarias, debidas a la no linealidad de la distribución de temperaturas, y las distribuciones de tensiones transversales secundarias, originadas por la hiperestaticidad a nivel sección -marco cajón celular-.

La formulación en la que se basa la obtención de las tensiones longitudinales primarias ya ha sido expuesta de forma amplia en el subapartado 1.3.2.1 del primer capítulo de esta tesis y nos limitaremos aquí a recordar la expresión que permitía obtener la magnitud de tales tensiones en cualquier punto de la sección transversal del puente analizado.

$$\sigma_z(x,y) = E \left[\epsilon_0 + \psi_x \cdot y + \psi_y \cdot x - \alpha \cdot T(x,y)_{NL} \right] \quad |5.1|$$

$$\epsilon_0 = \frac{\alpha}{A} \iint_S T(x,y)_{NL} dx dy$$

$$\psi_x = \frac{\alpha}{I_x} \iint_S T(x,y)_{NL} y dx dy$$

$$\psi_y = \frac{\alpha}{I_y} \iint_S T(x,y)_{NL} x dx dy$$

Debe señalarse que dicho estado tensional autoequilibrado es independiente de las condiciones de apoyo y vinculación de la estructura del puente y aparecerá siempre que la distribución de temperaturas sea no lineal.

En lo referente a las propiedades térmicas y estructurales del hormigón basta señalar, por una parte, que cuanto mayor sea la difusividad térmica de éste menores son las tensiones longitudinales primarias y, por otra, que si bien el coeficiente de dilatación térmica del hormigón y su módulo de elasticidad no influyen en absoluto en la distribución del campo de temperaturas, sí influyen en la distribución de tensiones longitudinales primarias apreciándose que la magnitud de éstas es directamente proporcional a los valores adoptados por dichas propiedades.

Así pues, cuanto menores sean el coeficiente de dilatación y el módulo de elasticidad del hormigón y mayor sea su difusividad térmica se estará en condiciones más favorables frente a los posibles estados tensionales autoequilibrados primarios inducidos por la acción térmica ambiental. Dicha conclusión es válida para toda tipología transversal de puentes de hormigón.

En cuanto a las tensiones transversales secundarias, éstas se obtendrán a partir de un análisis lineal elástico de la sección transversal -subapartado 1.3.2.2 del primer capítulo de la presente tesis-, analizada ésta como una rebana

da estructural de ancho igual a la unidad. Los esfuerzos y estados tensionales generados dependerán de la rigidez relativa de los diferentes elementos que conforman la sección transversal, de las rigideces propias de cada uno de los elementos, de la sollicitación térmica y del coeficiente de dilatación térmica del hormigón, siendo dichos esfuerzos más elevados cuanto mayor sea el valor de esta propiedad térmica.

Dada la tipología transversal de los puentes de hormigón analizados a lo largo de esta tesis puede concluirse que dichas tensiones transversales tiene sentido contemplarlas únicamente en las tipologías de puente cajón y puente de vigas en π o puentes con tableros claramente nervados.

Al igual que como se hizo a la hora de determinar las acciones térmicas de diseño a considerar en el proyecto y análisis de los puentes de hormigón también se van a adoptar aquí unos valores de las propiedades térmicas, físicas y estructurales de los materiales hormigón y asfalto los cuales se supondrán constantes. Dichos valores, comúnmente adoptados en el estudio térmico del hormigón y asfalto, vienen a ser valores medios representativos de tales propiedades y se recogen en la tabla 5.1.

Propiedad	Hormigón	Asfalto
Conductividad térmica (W/m°C)	1.5	0.83
Calor específico (J/kg°C)	960.	880.
Densidad (kg/m ³)	2400.	2200.
Factor de absorción solar	0.5	0.9
Emisividad	0.88	0.92
Coef. dilatación térmica (°C ⁻¹)	10x10 ⁻⁶	---
Módulo de elasticidad (kp/cm ²)	350000.	---

Tabla 5.1.- Valores de las propiedades de los materiales hormigón y asfalto adoptados en el presente estudio.

A continuación, se analizan las distribuciones tensionales originadas por la acción térmica ambiental en las tipologías transversales adoptadas en el proyecto de los puentes de hormigón.

5.2.1.- Puentes losa

En base a los estudios paramétricos presentados en el apartado 3.2 del tercer capítulo, relativos a la tipología de puentes losa, puede concluirse a modo de resumen que la situación más desfavorable, en lo que se refiere a la magnitud de las tensiones longitudinales primarias, ocurre en presencia de las siguientes condiciones:

- Pequeño espesor de capa asfáltica de rodadura, si ésta existe.
- Rango diario elevado de la temperatura ambiente.
- Baja velocidad de viento.
- Radiación solar global diaria elevada. Ello es equivalente a un bajo factor de turbidez, a un emplazamiento del puente correspondiente a latitudes bajas y, en general, a unas condiciones ambientales y climatológicas correspondientes a los meses de verano de Junio y Julio.
- Canto de la sección losa elevado.

Existen dos instantes del día para los cuales se generan las tensiones máximas de tracción, tensiones que presentan, en general, un valor considerable con respecto a la resistencia a tracción del hormigón.

El primer instante tiene lugar en horas de madrugada, comprendidas entre las 2 horas y las 5 horas. Para dicho instante, correspondiente al período de enfriamiento del tablero, las zonas de la sección losa sometidas a tracciones máxi

mas son los voladizos y los paramentos laterales apareciendo los picos tensionales en las esquinas superior e inferior de la sección transversal. Para dicho instante también aparecen tensiones de tracción en las fibras superior e inferior de la losa; no obstante, la magnitud de éstas es inferior a la obtenida en esquinas y paramentos laterales.

Conviene señalar que para el período de enfriamiento del tablero se aprecian diferencias notables entre las distribuciones tensionales obtenidas según el eje vertical que se contemple. Así, en la zona de sección próxima al eje de simetría, las fibras intermedias se encuentran sometidas a compresión mientras que dichas fibras, en las zonas cercanas a los paramentos laterales, se encuentran sometidas a tracción.

Asimismo, es de interés destacar el que tales distribuciones tensionales tienen lugar en instantes próximos al instante en el que se induce el máximo gradiente térmico vertical inverso o negativo. Así, en estructuras hiperestáticas de puentes de hormigón -vigas continuas, puentes pórtico- la fibra que se ve sometida a mayores tensiones térmicas de tracción es la fibra superior de la sección losa apareciendo el máximo absoluto en las esquinas superiores de ambos voladizos.

En base a ello siempre será recomendable el diseñar una sección transversal en la que la existencia de puntos angulosos se reduzca a un mínimo evitándose así la aparición de zonas en donde la concentración de tensiones sea elevada.

Debido a la variabilidad de los perfiles y magnitudes de las tensiones longitudinales primarias en función de las condiciones de contorno y del punto considerado de la sección transversal se cree de interés el estimar una cota superior de las tensiones máximas de tracción que aparecen a lo largo del contorno de la sección.

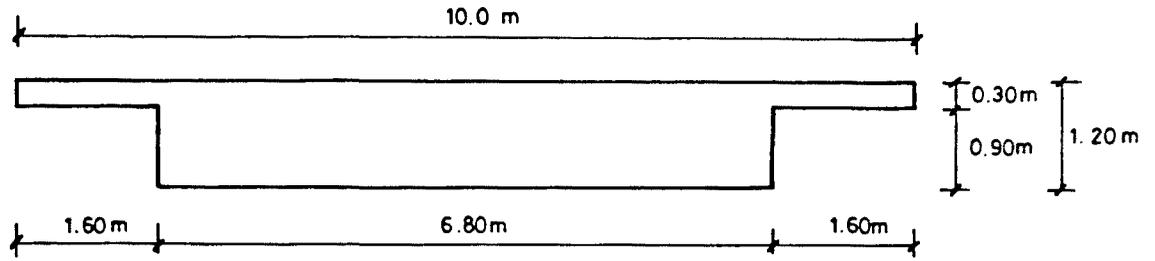
Para la estimación de dicha cota superior se ha analizado la respuesta tensional de un puente losa maciza de canto 1.20 metros con voladizos imponiendo las siguientes condiciones de contorno (figura 5.1):

- Espesor de capa asfáltica de 5.0 cms.
- Rango diario de la temperatura ambiente de 24.0°C.
- Velocidad del viento de 1.0 m/seg.
- Radiación solar global diaria de 9500 Wh/m².

El adoptar un canto de 1.20 metros para la sección losa a analizar viene justificado por el hecho de que, en puentes losa, cuanto mayor es el canto, mayor es la magnitud de las tensiones longitudinales primarias originadas por la no linealidad de la distribución del campo de temperaturas. Por ello, en puentes losa con cantos inferiores al mencionado, la magnitud de dichas tensiones es menor.

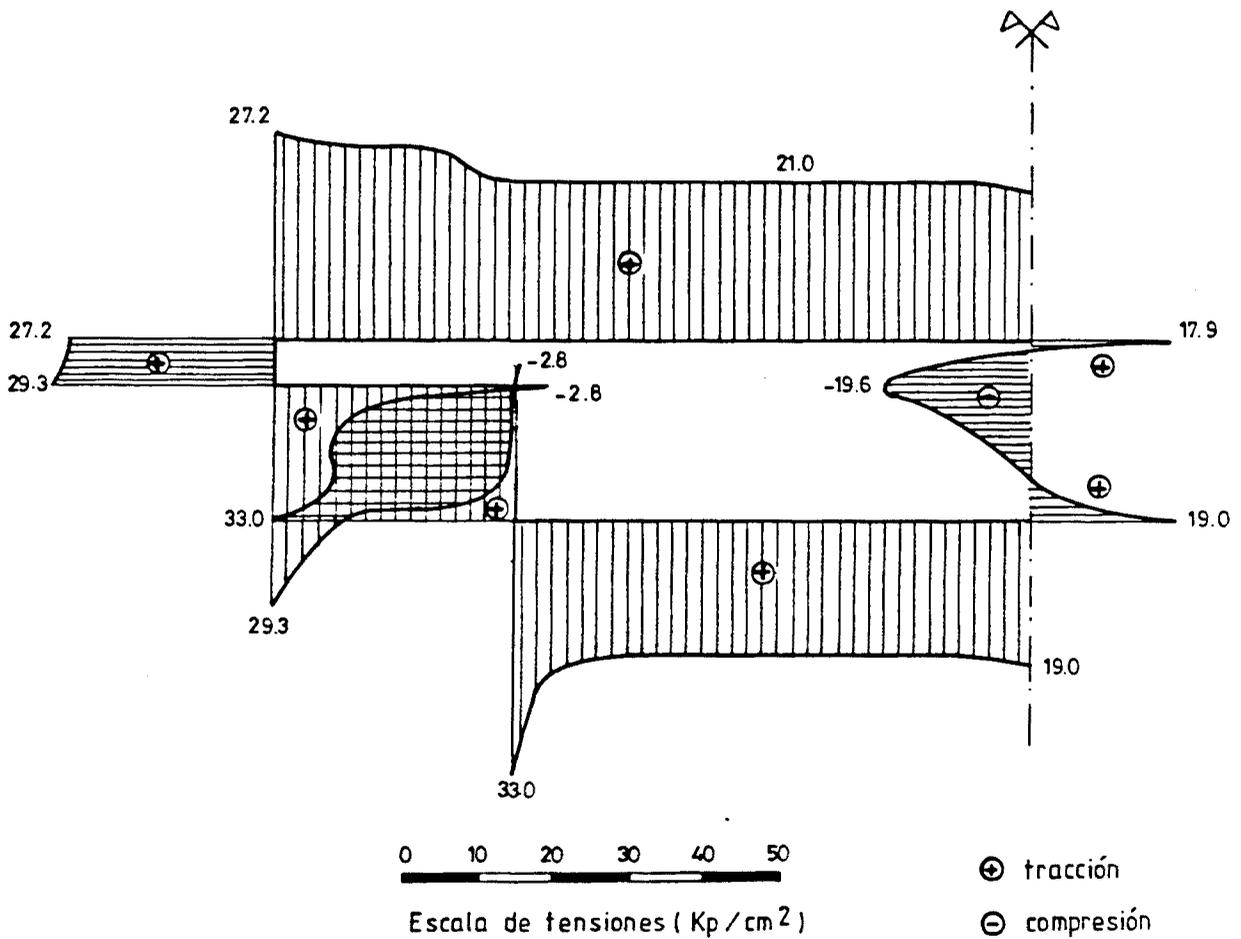
Evidentemente, las condiciones de contorno presentadas anteriormente no son concomitantes para un determinado lugar de emplazamiento de la Península Ibérica, aunque sí pueden presentarse, algunas de ellas de forma conjunta, o por separado, en diferentes regiones de nuestro país. El actuar de esta forma, se insiste, tiene como objetivo el poder estimar una cota superior de las tensiones de tracción longitudinales primarias inducidas en puentes losa emplazados en la Península Ibérica durante el período de enfriamiento del tablero.

Los resultados de las distribuciones tensionales correspondientes al instante de máxima tracción observada en algún punto de la sección transversal analizada durante el período de enfriamiento del tablero se muestran en la figura 5.1.



$E = 350\,000 \text{ Kp/cm}^2$
 $\alpha = 0.00001 \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$

a) Sección transversal



b) Distribuciones tensionales

Fig. 5.1.- Sección losa maciza analizada. Distribuciones de tensiones longitudinales primarias correspondientes al instante más desfavorable durante el período de enfriamiento del tablero a lo largo del contorno de la sección (a las 4.00 horas).

El segundo instante del día para el cual se generan tensiones máximas de tracción tiene lugar entre las 12 horas del mediodía solar y el instante para el cual se induce el máximo gradiente térmico vertical positivo, el cual se alcanza entre las 14 horas y las 16 horas.

Para dicho instante, correspondiente al período de calentamiento del tablero, la zona de la sección losa sometida a las tracciones más elevadas es la zona intermedia de la sección situada a una profundidad entre $0.2 h$ y $0.3 h$ a partir de la fibra superior siendo h el canto total del tablero. El pico tensional aparece en la zona de unión de los voladizos con los paramentos laterales de la sección transversal.

Conviene señalar que, para el período de calentamiento del tablero, las diferencias entre las distribuciones tensionales obtenidas según diversos ejes verticales no son tan notables como en el período de enfriamiento. Así, independientemente del eje vertical que se contemple, las fibras superiores e inferiores de la sección losa se ven sometidas a compresión mientras que las fibras intermedias se ven solicitadas a tracción, si bien tales tracciones son de mayor magnitud cuanto más próximo se encuentre el eje vertical contemplado al paramento lateral exterior de la sección. Por otra parte, es de interés el destacar que estas distribuciones tensionales aparecen en instantes próximos al instante de máximo gradiente térmico vertical.

A continuación, la figura 5.2 muestra las distribuciones de tensiones longitudinales primarias existentes a lo largo del perímetro de la sección losa presentada en la figura 5.1 durante el período de calentamiento, en el instante en el que se genera la tensión máxima de tracción. Las condiciones de contorno, lógicamente, son idénticas a las adoptadas con anterioridad al estudiar la respuesta tensional del puente losa en período de enfriamiento.

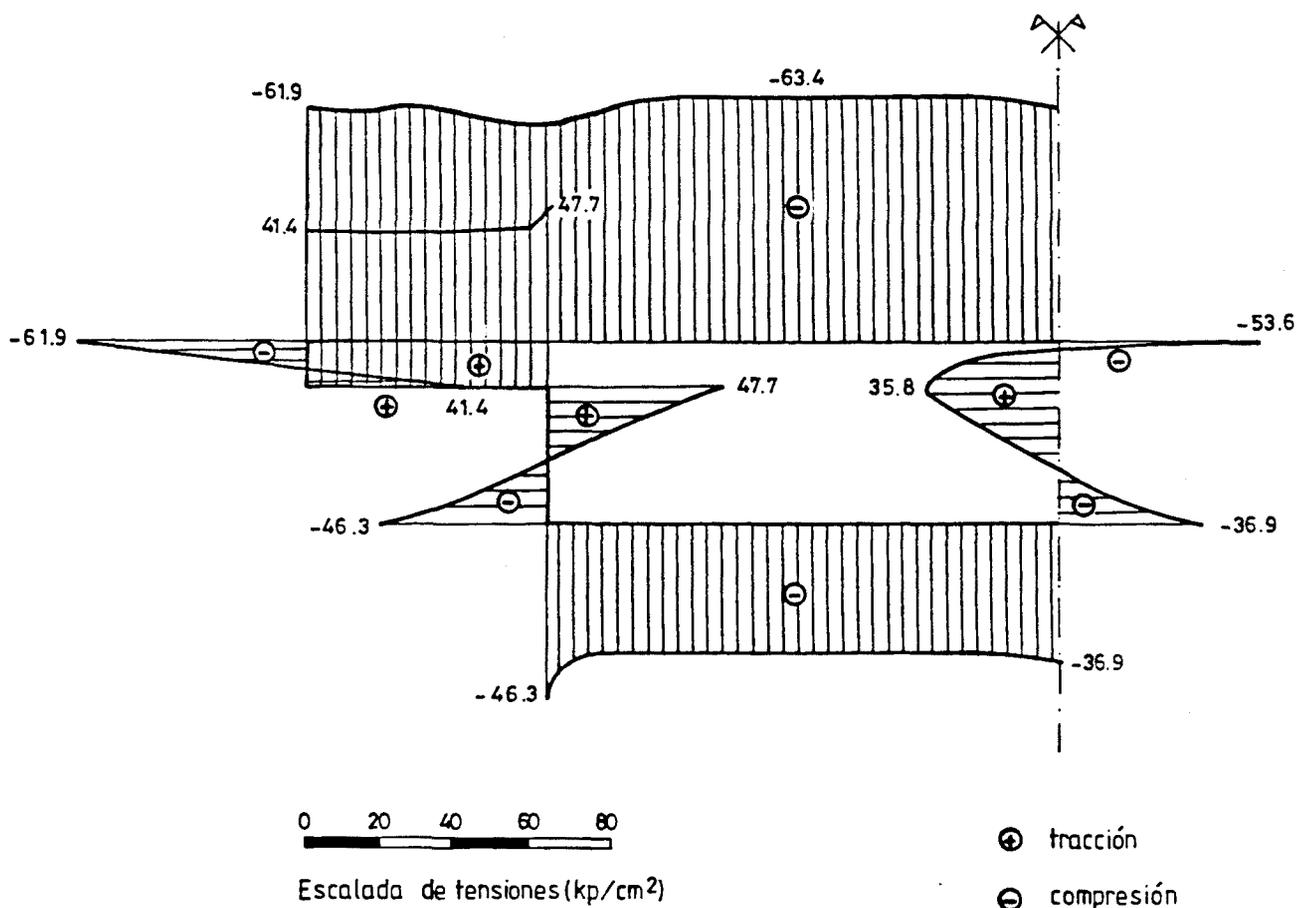


Fig. 5.2.- Distribuciones de tensiones longitudinales primarias correspondientes al instante más desfavorable durante el período de calentamiento del tablero a lo largo del contorno de la sección (a las 12.70 horas).

A modo de ejemplo y para corroborar el hecho de adoptar los estados tensionales obtenidos como cotas superiores de la magnitud de las tensiones longitudinales primarias de tracción, se ha obtenido la respuesta tensional de un puente losa maciza de canto 1.20 metros y con espesor de asfalto de 5.0 cms emplazado en la localidad de Huelva. La estación meteorológica ubicada en esta ciudad, amén de otras, proporciona unas condiciones climatológicas y ambientales simi-

lares a las adoptadas para el estudio de obtención de las cotas superiores de las tensiones longitudinales primarias. Los resultados de dicho análisis se presentan de forma sucinta en la tabla 5.2.

Nodo contemplado	Tensiones (Kp/cm ²)	
	Cota superior de la tensión de tracción	Tracción obtenida en el análisis
Esquina superior voladizo	27.2 (enfriamiento)	19.4 (enfriamiento)
Esquina inferior voladizo	41.4 (calentamiento)	36.1 (calentamiento)
Esquina inferior sección	33.0 (enfriamiento)	21.0 (enfriamiento)
Unión voladizo-paramento lateral	47.7 (calentamiento)	43.6 (calentamiento)

Tabla 5.2.- Valores de las tensiones longitudinales primarias de tracción obtenidas en diversos nodos de la sección de un puente losa de canto 1.20 metros para el caso más desfavorable y el caso de emplazamiento en la localidad de Huelva.

Como puede apreciarse en dicha tabla, los valores obtenidos para las tensiones no se alejan en exceso de las cotas superiores -véase que para el nodo que idealiza la unión voladizo-paramento lateral la diferencia obtenida entre ambos valores de la tensión es incluso inferior al 10%-.

En base a todo lo expuesto hasta este punto puede definirse un determinado estado tensional de tracciones a lo largo del contorno de la sección a utilizar en dimensionamiento, basado en los esquemas tensionales representados en las figuras 5.1 y 5.2, correspondientes respectivamente a los períodos de enfriamiento y calentamiento del tablero. Dicho estado tensional, el cual se presenta a continuación en la

figura 5.3, es la envolvente de ambos estados tensionales y no la superposición de éstos puesto que las distribuciones tensionales no son concomitantes en el tiempo.

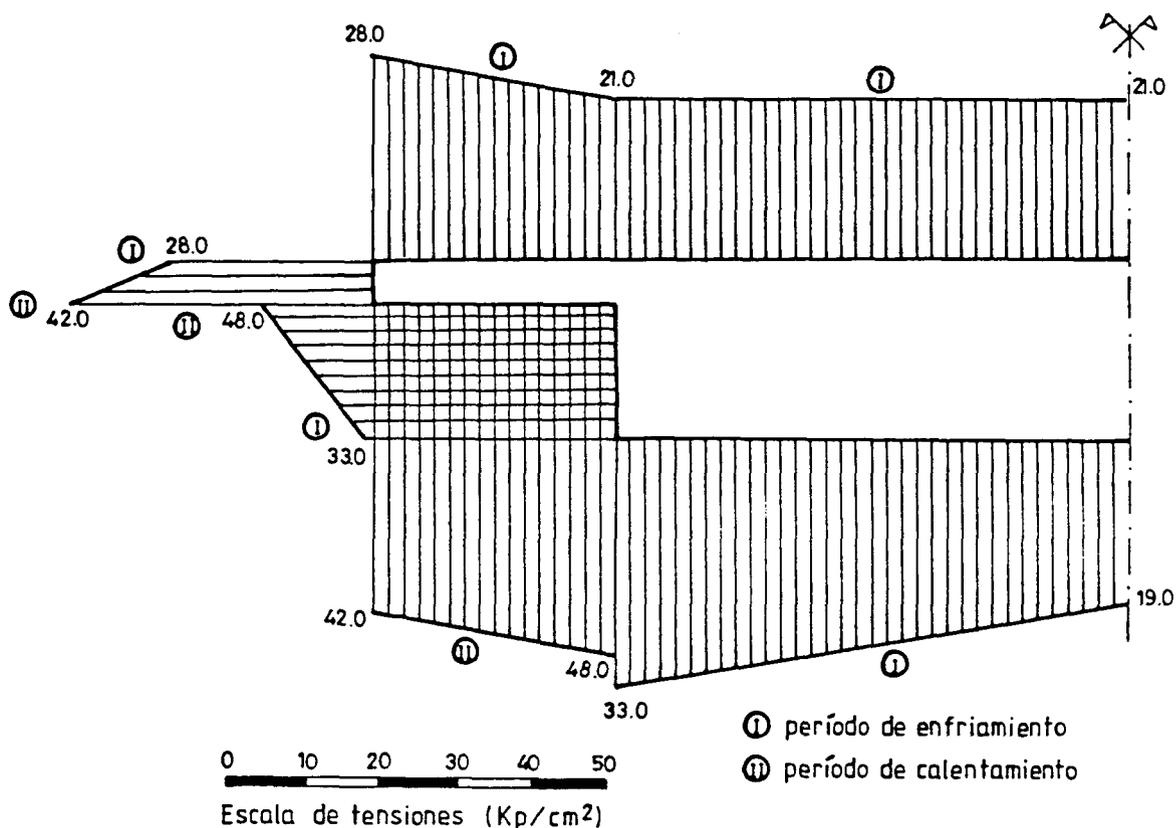


Fig. 5.3.- Estado tensional longitudinal primario de tensiones máximas de tracción a lo largo del perímetro de los puentes losa a utilizar en dimensionamiento.

En dicha figura se indica, mediante los símbolos I y II, cuáles son las distribuciones de tensiones obtenidas en período de enfriamiento y de calentamiento del tablero.

Se insiste, de nuevo, en el hecho de que el estado tensional mostrado en la figura 5.3 ofrece como resultado la definición de las cotas superiores de las tensiones máximas de tracción que pueden aparecer a lo largo del contorno de la

sección transversal de los puentes losa. Lógicamente, en puentes losa emplazados en algún lugar de la Península Ibérica imponiendo otras condiciones de contorno no tan desfavorables, los valores de dichas tracciones pueden ser significativamente más bajos.

En cuanto a las compresiones longitudinales primarias, puede observarse que éstas son máximas en las fibras superior e inferior de la sección y aparecen durante la fase de calentamiento del tablero (figura 5.2). Si bien, en general, la aparición de compresiones en dichas fibras no es excesivamente preocupante cabe resaltar el hecho de que el valor de las compresiones primarias máximas -del orden de los 60 Kp/cm^2 - a las que se ve sometida la fibra superior no es despreciable; dichas compresiones, sumadas a las originadas por la propia flexión longitudinal de la estructura del puente, pueden dar lugar a la aparición de determinadas zonas de la sección en donde las tensiones de compresión sean ciertamente elevadas -zonas de voladizos con pequeño espesor-. Por el contrario, la aparición de compresiones primarias en la fibra inferior de la sección durante el período de calentamiento del puente proporciona un efecto favorable puesto que las tracciones originadas por las cargas permanentes y sobrecargas de uso y el gradiente térmico vertical positivo se ven reducidas.

Por último, en lo que respecta a la respuesta tensio-nal de los puentes losa aligerada, puede afirmarse que ésta es similar a la obtenida para puentes losa maciza, a excepción de la aparición de tensiones de tracción en las fibras que se encuentran en contacto con la parte superior de los aligeramientos. En el caso de que éstos no sean circulares, las zonas de tracción se amplían por lo cual es conveniente tener en cuenta tales tensiones de tracción en el análisis y diseño estructural. La cota superior de dichas tracciones se sitúa, en base a los resultados obtenidos a lo largo del estudio paramétrico relativo a los puentes losa aligerada, pró

xima a los 20 Kp/cm² obtenida dicha cota durante el período de calentamiento del tablero.

5.2.2.- Puentes cajón

5.2.2.1.- Tensiones térmicas longitudinales primarias

Basándonos en los resultados derivados de los estudios realizados referentes a la sección cajón se puede concluir que la situación más desfavorable en lo que se refiere a la magnitud de las tensiones longitudinales primarias tiene lugar en presencia de las siguientes condiciones de contorno:

- Pequeño espesor de capa asfáltica de rodadura.
- Rango diario elevado de la temperatura ambiente.
- Alta velocidad de viento en período de enfriamiento del tablero.
- Baja velocidad de viento en período de calentamiento del tablero.
- Radiación solar global diaria elevada. Ello es equivalente a un bajo factor de turbidez, a un emplazamiento del puente correspondiente a latitudes bajas y, en general, a unas condiciones ambientales y climatológicas correspondientes a los meses de verano de Junio y Julio.

Las demás variables analizadas en el estudio paramétrico relativo a la sección cajón, presentado en el apartado 3.3 del tercer capítulo, no influyen de forma notoria en los perfiles y magnitudes de las distribuciones de tensiones longitudinales primarias inducidas en puentes cajón.

De nuevo, al igual como ocurría en puentes losa, existen dos instantes del día para los cuales se generan las tensiones de tracción más elevadas.

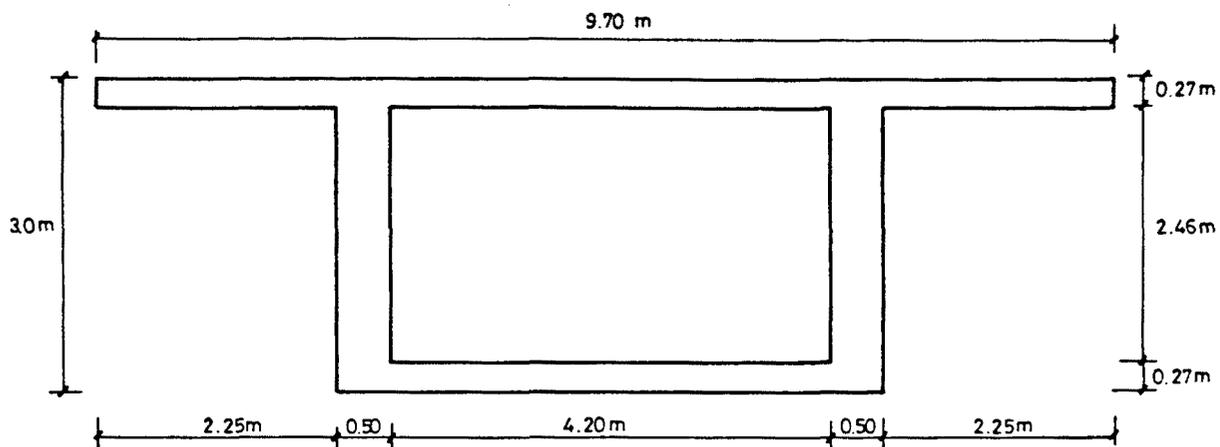
El primer instante tiene lugar en horas de madrugada, comprendidas entre las 3 horas y las 5 horas. Para dicho instante, correspondiente al período de enfriamiento del tablero, las zonas de la sección cajón que se ven sometidas a tracciones máximas son los voladizos y los paramentos laterales apareciendo los picos tensionales en las esquinas superior e inferior de los voladizos y en la esquina inferior de la sección transversal. Para este mismo instante también aparecen tensiones de tracción en las fibras superior e inferior si bien su magnitud es ligeramente inferior a la obtenida en esquinas.

De nuevo, hay que incidir en que siempre será deseable el diseñar una sección transversal cajón en la que se reduzca a un mínimo la existencia de puntos angulosos evitándose así la aparición de zonas sometidas a elevadas concentraciones de tensión.

A continuación se analiza la respuesta tensional longitudinal primaria de un puente cajón unicelular de canto constante igual a 3.0 metros sometido a unas determinadas condiciones de contorno climatológicas y ambientales existentes en la Península Ibérica, aunque no de forma concomitante. Dichas condiciones, las cuales generarán las distribuciones de tensiones longitudinales más desfavorables, son las mismas que las adoptadas al analizar la respuesta tensional de los puentes losa, análisis presentado con anterioridad en el subapartado 5.2.1 de este mismo capítulo.

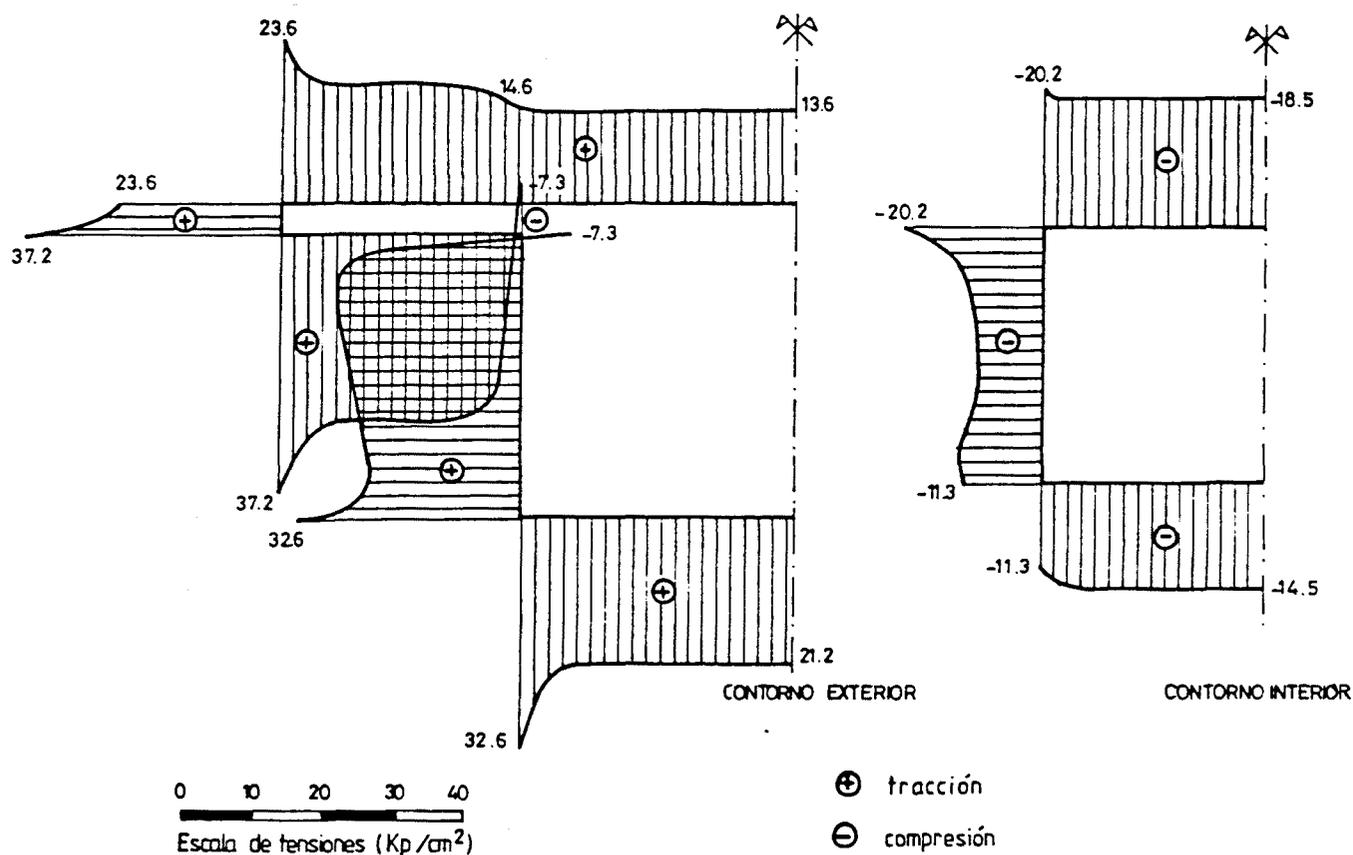
La sección transversal analizada así como la respuesta tensional obtenida para el período de enfriamiento del tablero se muestran en la figura 5.4.

El segundo instante del día para el cual se generan tensiones máximas de tracción acaece en horas comprendidas entre las 12 horas del mediodía solar y el instante para el cual se induce el máximo gradiente térmico, el cual se alcanza entre las 15 horas y las 16.50 horas.



$\alpha = 0.00001 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$
 $E_c = 350000 \text{ Kp/cm}^2$

a) Sección transversal analizada



b) Distribuciones tensionales

Fig. 5.4.- Sección cajón analizada. Distribuciones de tensiones longitudinales primarias correspondientes al instante más desfavorable durante el período de enfriamiento del tablero a lo largo de los contornos exterior e interior de la sección (a las 3.50 horas).

Para tal instante, correspondiente al período de calentamiento del tablero, la zona de la sección cajón sometida a las tracciones más elevadas es la zona de unión de las almas con la losa superior del tablero apareciendo los picos tensionales en los nodos situados a una profundidad, medida a partir de la fibra superior de la sección, comprendida entre $0.2 h$ y $0.3 h$, siendo h el canto total del tablero cajón.

Por otra parte, conviene destacar el hecho de que también aparecen tensiones de tracción considerables en el contorno interior de la sección cajón y, fundamentalmente, en los nodos de alma en contacto con la célula y situados a una profundidad de $0.2 h$ a $0.3 h$ y en la fibra inferior de la losa superior del tablero en contacto con la célula.

Al igual como ocurría también en puentes losa, la respuesta tensional longitudinal primaria de los puentes cajón es más uniforme en período de calentamiento que de enfriamiento apreciándose, independientemente del eje vertical que se contemple, que las fibras extremas de la sección se ven sometidas a compresión mientras que las fibras intermedias se ven sometidas a tracción.

A continuación la figura 5.5 muestra las distribuciones de tensiones longitudinales primarias existentes a lo largo de los contornos exterior e interior de la sección cajón analizada, presentada en la figura 5.4. Dichas distribuciones corresponden al instante en el que se genera la tensión máxima de tracción durante la fase de calentamiento del tablero del puente.

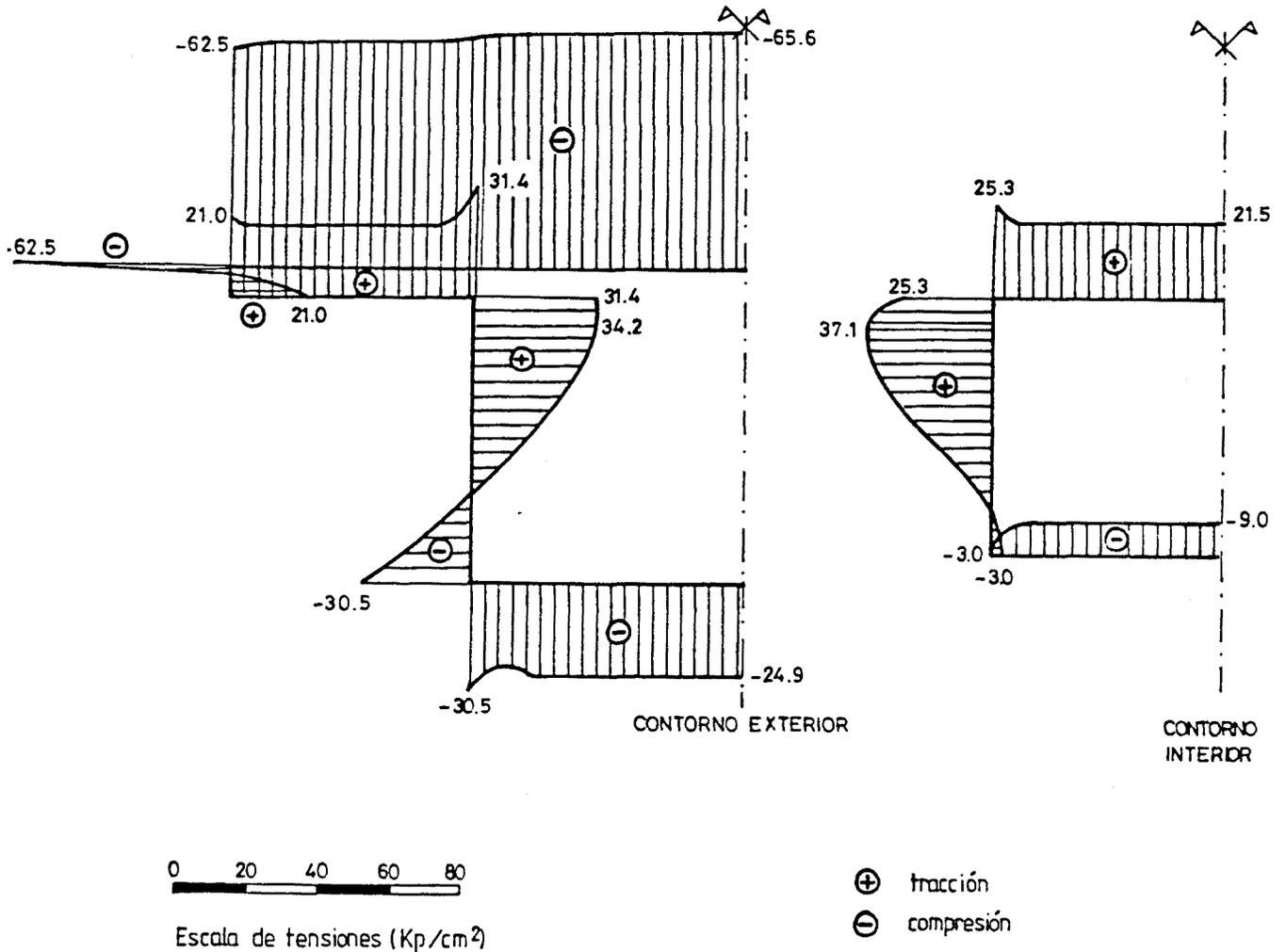


Fig. 5.5.- Distribuciones de tensiones longitudinales primarias correspondientes al instante más desfavorable durante el período de calentamiento del tablero a lo largo de los contornos exterior e interior de la sección (a las 15.50 horas).

A modo de ejemplo, también aquí se ha obtenido la respuesta tensional longitudinal primaria del mismo puente cajón de 3.0 metros de canto y con un espesor de asfalto de 5.0 cms. emplazado en la localidad de Huelva, ciudad donde se han registrado unas condiciones climatológicas y ambientales similares a las adoptadas en el análisis relativo a la obtención de la magnitud de las tensiones máximas de tracción. Los resultados derivados de este estudio se presentan en la tabla 5.3.

Nodo contemplado	Tensiones de tracción (Kp/cm ²)	
	Cota superior de la tensión de tracción	Tracción obtenida en el análisis
Esquina superior voladizo	23.6 (enfriamiento)	15.5 (enfriamiento)
Esquina inferior voladizo	37.2 (enfriamiento)	25.2 (enfriamiento)
Unión voladizo-paramento lateral	31.4 (calentamiento)	29.9 (calentamiento)
Unión losa superior-alma	25.3 (calentamiento)	23.7 (calentamiento)
Fibra superior sección en eje de simetría	13.6 (enfriamiento)	8.5 (enfriamiento)
Fibra inferior losa superior en eje de simetría	21.5 (calentamiento)	21.3 (calentamiento)
Fibra inferior sección en eje de simetría	21.2 (enfriamiento)	10.1 (enfriamiento)
Nodo situado a 0.2 h. de profundidad y en contacto con la célula	37.1 (calentamiento)	30.0 (calentamiento)

Tabla 5.3.- Valores de las tensiones longitudinales primarias de tracción obtenidas en diversos nodos de la sección de un puente cajón de canto 3.0 metros para el caso más desfavorable y el caso de emplazamiento en la localidad de Huelva.

Como podrá ser observado en dicha tabla, los valores obtenidos para las tensiones no se alejan en exceso de las cotas superiores apreciándose que las discrepancias son algo mayores para las tensiones de los nodos cuya cota superior viene determinada en fase de enfriamiento -esquinas superior e inferior de los voladizos y nodos de las fibras superior e inferior de la sección transversal cajón- y ello es debido a que las condiciones de velocidad de viento existentes en la estación meteorológica de Huelva se acercan más a la situación desfavorable en fase de calentamiento del tablero.

En resumen, y siguiendo un desarrollo totalmente paralelo al empleado en el estudio tensional de puentes losa, es posible definir un estado tensional a lo largo del contorno exterior y el contorno interior de la sección a considerar en dimensionamiento, basado en los esquemas tensionales representados en las figuras 5.4 y 5.5, correspondientes respectivamente a los períodos de enfriamiento y calentamiento del tablero (figura 5.6).

En lo que se refiere a la obtención de la respuesta tensional longitudinal primaria, conviene hacer un mayor hincapié en la influencia del canto del tablero sobre la magnitud de dicha respuesta. Como ya ha sido comentado, y se demostró con anterioridad en capítulos precedentes, la magnitud de las tensiones longitudinales primarias aumenta, en general, a medida que aumenta el canto total de la sección. No obstante, para el caso que nos ocupa -puentes cajón- los cantos adoptados en diseño son, en general, elevados -cantos superiores a 1.50 metros-. Ello hace que el efecto de la no linealidad de la distribución del campo de temperaturas a partir de un determinado valor del canto total del tablero cajón se vea muy amortiguado generándose tensiones longitudinales de valores muy similares. Ello quedó recogido en el subapartado 3.3.1.2 del tercer capítulo de la presente tesis, al analizar la influencia del canto variable en la respuesta térmica y tensional de los puentes cajón.

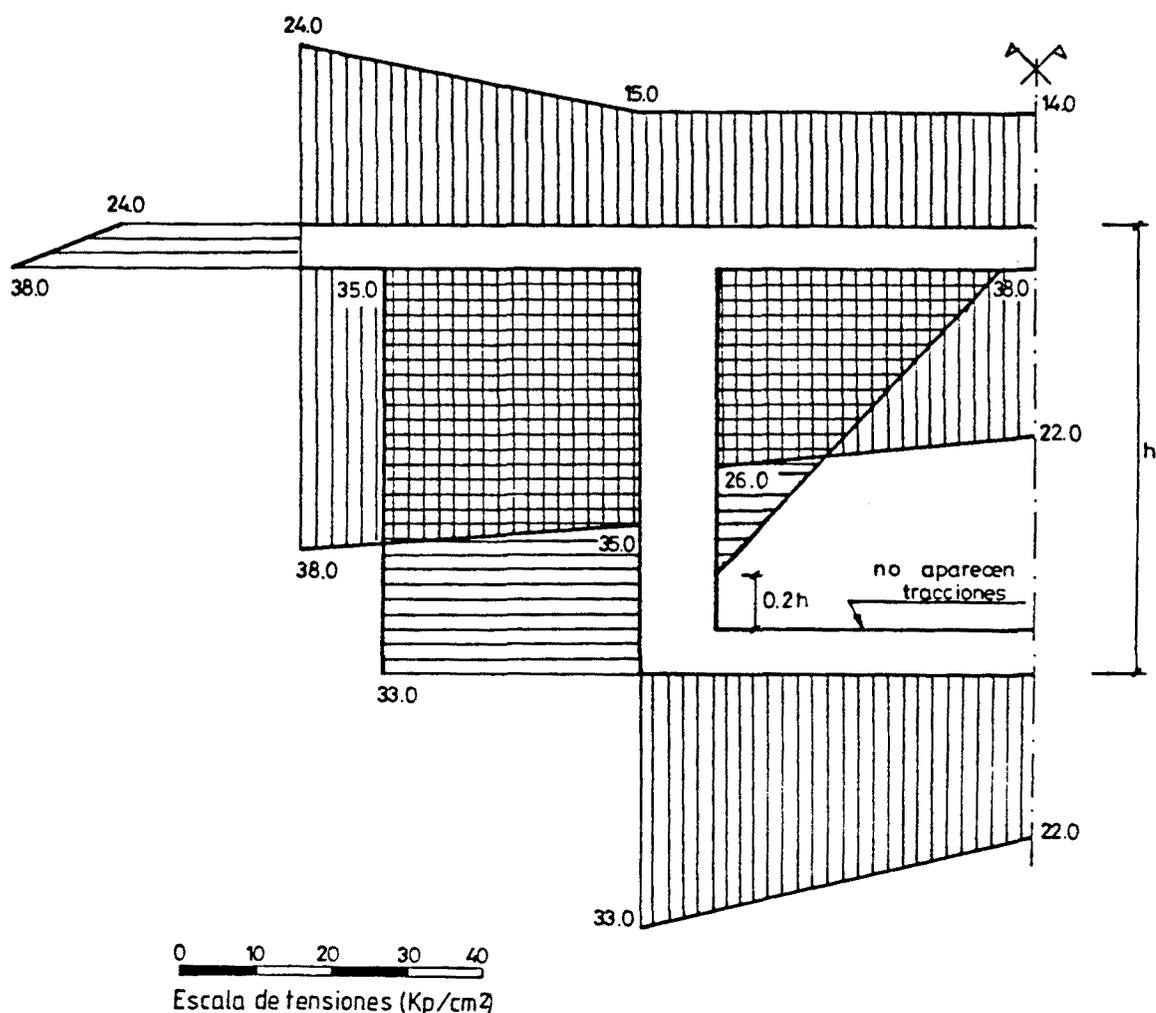


Fig. 5.6.- Estado tensional longitudinal primario de las tensiones máximas de tracción a lo largo de los contornos exterior e interior de puentes cajón con canto igual a 3.0 metros a utilizar en dimensionamiento.

No obstante, también se podía observar que las tensiones máximas de tracción en las fibras superiores e inferiores de la sección eran mayores cuanto mayor fuera el canto del tablero y mayor fuera la velocidad del viento. Por contra, las tensiones máximas de tracción a lo largo del alma, en la zona de unión con la losa superior, aparecían para cantos relativamente pequeños de la sección cajón y en presencia de una velocidad de viento baja.

En base a lo comentado en el párrafo anterior se hace

necesario obtener y analizar la respuesta tensional de un puente cajón que tenga en cuenta ambas observaciones. Para ello se han analizado dos secciones cajón de canto 1.50 metros y 6.00 metros con velocidades de viento de 1.0 m/seg y 9.0 m/seg respectivamente. Tales valores representan, con suficiente aproximación, las cotas inferior y superior del canto adoptado en el diseño de puentes cajón y de la velocidad de viento media mensual en la Península Ibérica (Atlas Climático de España (47)).

Los resultados derivados de ambos estudios relativos a las tensiones máximas en los nodos críticos se presentan, a continuación, en la tabla 5.4.

En base a estos resultados el estado tensional de diseño obtenido para un puente cajón de 3.0 metros de canto debe ser corregido. Tales correcciones atañen a la tensión de tracción alcanzada en las fibras superior e inferior de la sección y a la alcanzada tanto en el paramento lateral exterior del alma como en el paramento lateral interior de ésta, en contacto con la célula. La figura 5.7 muestra, de forma definitiva, el estado tensional longitudinal primario a considerar en dimensionamiento.

En dicha figura puede apreciarse cuáles son las fibras cuya tensión máxima de tracción viene determinada en período de enfriamiento o de calentamiento del tablero.

También cabe comentar aquí que todo lo dicho relativo a la aparición de compresiones longitudinales primarias en las fibras superior e inferior de la sección losa es perfectamente válido para secciones cajón.

Nodo contemplado	Tracciones máximas (Kp/cm ²)	
	Sección cajón h=1.50m v _{viento} =1.0 m/seg	Sección cajón h=6.0m v _{viento} =9.0 m/seg
Esquina superior voladizo	----	26.9 (enfriamiento)
Esquina inferior voladizo	----	34.9 (enfriamiento)
Unión voladizo-paramento lateral	18.0 (calentamiento)	----
Unión losa superior-alma	18.8 (calentamiento)	----
Fibra superior sección en eje de simetría	----	21.0 (enfriamiento)
Fibra inferior losa superior en eje de simetría	2.9 (calentamiento)	----
Fibra inferior sección en eje de simetría	----	24.3 (enfriamiento)
Nodo con tensión máxima en paramento lateral	42.4 (calentamiento)	----
Nodo con tensión máxima en alma y en contacto con célula	42.2 (calentamiento)	----
Esquina inferior sección	----	31.8 (enfriamiento)

Tabla 5.4.- Tracciones máximas en nodos críticos de puentes cajón de canto 1.50 metros y 6.0 metros con velocidad de viento mínima y máxima emplazados en la Península Ibérica.

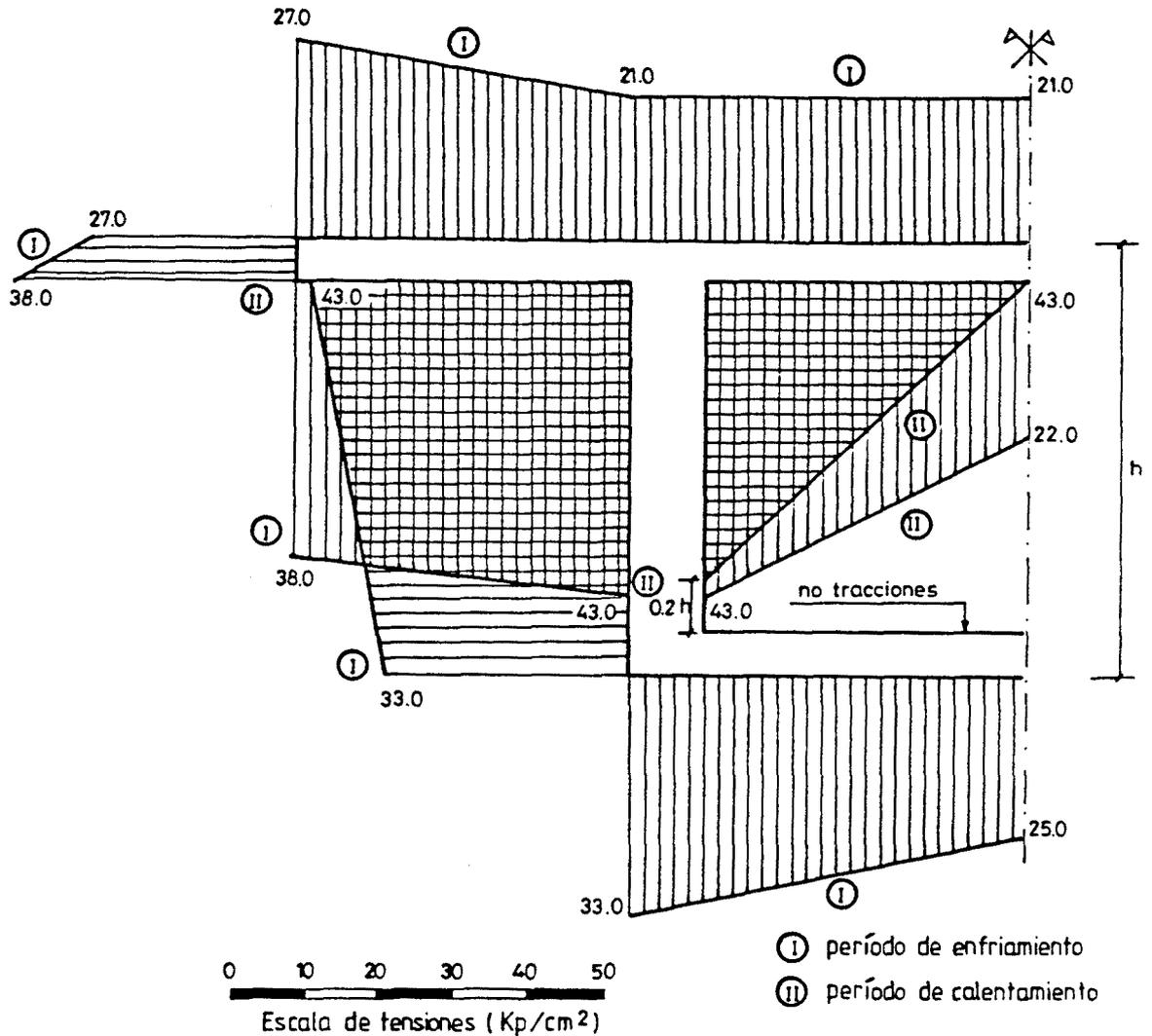


Fig. 5.7.- Estado tensional longitudinal primario de las tensiones máximas de tracción a lo largo de los contornos exterior e interior de puentes cajón a utilizar en dimensionamiento.

Por otra parte, dado que la respuesta tensional de los puentes multicelulares es prácticamente idéntica a la de los puentes unicelulares, como ya se demostró en el subapartado 3.3.2 del tercer capítulo de esta tesis, el estado tensional a considerar en dimensionamiento, representado en la figura 5.7, es aplicable a toda tipología transversal de puentes cajón unicelulares o multicelulares.

Por último, es de interés el señalar que dicho estado tensional es muy similar cualitativamente al obtenido para puentes losa, si bien existen algunas diferencias de tipo cuantitativo, aunque realmente no muy acusadas.

5.2.2.2.- Tensiones térmicas transversales secundarias

Dichas tensiones térmicas transversales son debidas a la diferencia de temperaturas existente entre el interior de las células y el ambiente exterior.

Recordemos que existen dos instantes del día para los cuales la diferencia entre la temperatura de la célula y la del ambiente exterior se hace máxima positiva o máxima negativa.

La primera de ellas ocurre en instantes próximos al instante en el que se alcanza la mínima temperatura ambiente y recordemos que su valor de diseño, definido en el subapartado 4.2.5.3 del anterior capítulo, era de 14°C mientras que la segunda tiene lugar en instantes próximos a aquél en el que se alcanza la máxima temperatura ambiente, siendo su valor de diseño de -6°C .

Las tensiones originadas en el marco cajón unicelular o multicelular pueden obtenerse de forma sencilla mediante la aplicación del análisis matricial de estructuras a la estructura marco de ancho la unidad adoptando la hipótesis de linealidad entre tensiones y deformaciones. De ahí, el que no se vaya a incidir en el aspecto de obtención de tales tensiones térmicas transversales.

No obstante, en base a los resultados obtenidos a lo largo de la presente tesis, conviene puntualizar que si bien siempre es recomendable el disponer acartelamientos en las zo

nas de unión de alas y almas para facilitar el procedimiento constructivo y el recorrido de las trayectorias de tensiones originadas por las cargas de tráfico, dichos acartelamientos deben presentar una transición muy gradual tanto longitudinal como transversalmente evitándose siempre en la medida de lo posible la unión de elementos de fuerte espesor -como podrían ser las almas de la sección cajón- con elementos de pequeño espesor -como podrían ser las losas superior e inferior de la sección cajón-. Conviene destacar que el reparto transversal siempre dependerá de las rigideces relativas de alas y almas, las cuales influyen de forma directa en los valores de los momentos transversales que solicitan los elementos barra que conforman el marco cajón a analizar.

En el caso de puentes cajón de inercia variable la armadura transversal a disponer en almas y losas superior e inferior para hacer frente a tales tensiones térmicas debe obtenerse a partir de la sección en clave, sección ésta que, en general, se muestra como sección crítica debido a que la sollicitación térmica transversal es ligeramente superior en secciones próximas a la de clave.

Por último, es importante señalar que la máxima diferencia positiva entre la temperatura de la célula y el ambiente exterior es, en general, concomitante con aquellas distribuciones de tensiones longitudinales primarias que generan tracciones máximas en las fibras superiores e inferiores de la sección transversal cajón mientras que la máxima diferencia negativa entre la temperatura de la célula y el ambiente exterior es concomitante con las distribuciones de tensiones que ocasionan tracciones máximas en las fibras intermedias y en concreto en la fibra inferior de la losa superior y en los paramentos laterales, tanto exterior como interior, de las almas de la sección cajón.

5.2.3.- Puentes de vigas

5.2.3.1.- Tensiones térmicas longitudinales primarias

En base a los estudios realizados en capítulos anteriores se puede apreciar que la respuesta tensional longitudinal primaria de los puentes de vigas no difiere, ni cualitativa ni cuantitativamente, de la respuesta tensional de los puentes losa.

Por ello, el estado tensional de diseño a adoptar en esta tipología transversal de puentes de hormigón es el mismo que el adoptado para puentes losa maciza. En el caso de que las vigas contiguas se encuentren en contacto entre sí la sección transversal se transforma, desde un punto de vista térmico-tensional, en una sección losa aligerada siendo entonces conveniente el considerar la aparición de tracciones en la fibra inferior de la losa superior, en contacto con las células o aligeramientos.

Así pues, el estado tensional a considerar en dimensionamiento que define las tensiones máximas de tracción que aparecen a lo largo del contorno de la sección transversal puede venir perfectamente determinado. Dicho estado tensional se presenta a continuación en la figura 5.8.

En dicha figura puede apreciarse cuáles son las fibras cuyas tensiones máximas de tracción vienen determinadas en período de enfriamiento o de calentamiento.

Ello, al igual como en anteriores tipologías estudiadas, debe ser contemplado puesto que la obtención de la respuesta térmica-tensional a nivel estructura depende de tales distribuciones y de las tensiones inducidas a nivel estructura originadas por la hiperestaticidad de la estructura del puente en sentido longitudinal. Recordemos una vez más que

aquellas distribuciones tensionales que generan máximas tracciones en las fibras superior e inferior de la sección son concomitantes con la actuación del mínimo gradiente positivo o máximo gradiente negativo mientras que las distribuciones tensionales que generan máximas tracciones en fibras intermedias y paramentos laterales son concomitantes con la actuación a nivel estructura del máximo gradiente térmico vertical positivo.

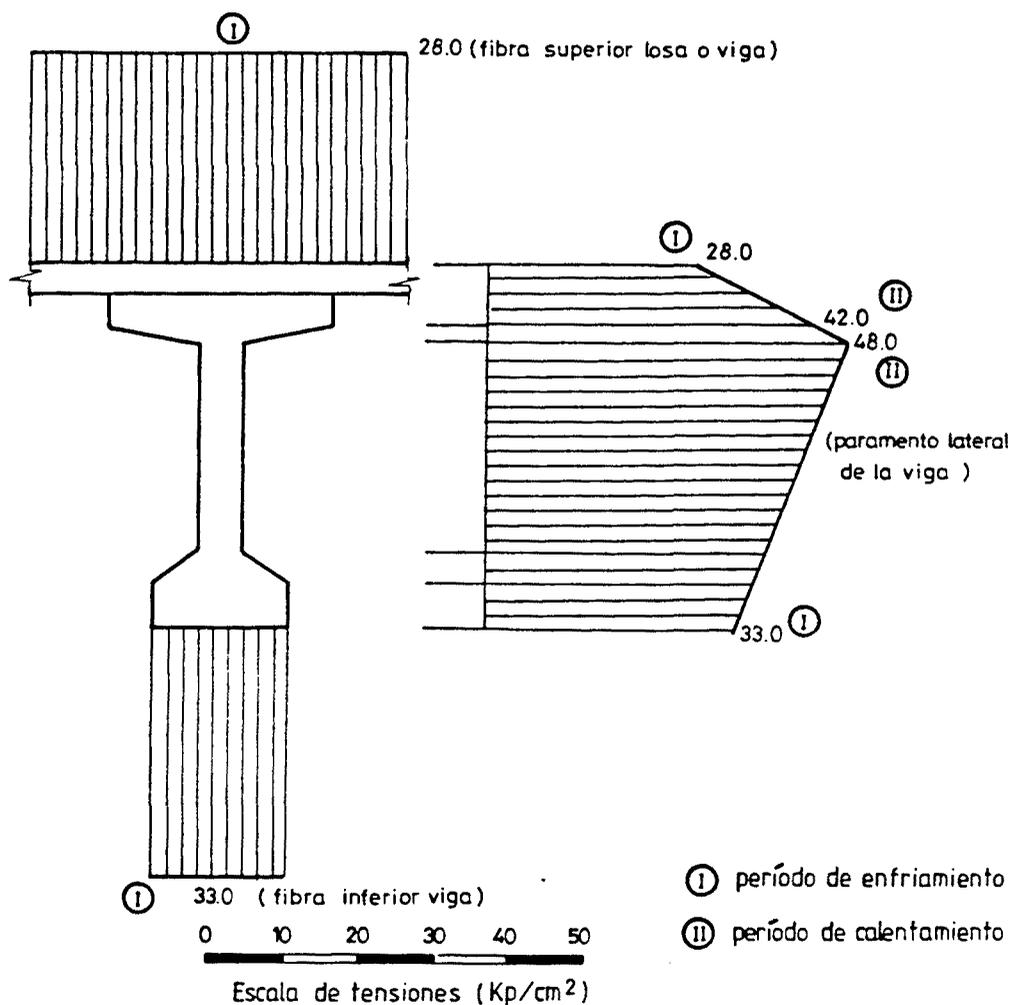


Fig. 5.8.- Estado tensional longitudinal primario de las tensiones máximas de tracción a lo largo del contorno de los puentes de vigas a utilizar en dimensionamiento.

5.2.3.2.- Tensiones térmicas transversales secundarias

Ya ha sido adelantado en el subapartado 4.2.8 del capítulo anterior que la influencia de la acción térmica en sentido transversal tiene interés analizarla fundamentalmente en el caso de puentes de vigas cuya tipología transversal viene definida por la existencia de dos nervios situados en ambos extremos del tablero unidos entre sí mediante una losa superior. Este es el caso de los puentes de vigas en π y, en general, el de aquellos puentes cuya sección transversal consta de dos nervios, ya sean éstos de sección hueca o maciza, y losa superior de hormigón -tableros de puentes de hormigón claramente nervados-.

En efecto, la obtención de la respuesta tensional contenida en el plano de la sección frente a las deformaciones térmicas impuestas -elongación y curvatura- genera la aparición de una ley de torsores en los nervios según el eje longitudinal y de una ley de momentos flectores transversales en la losa superior de hormigón.

Recordemos que las acciones térmicas de diseño a aplicar en la losa superior eran un gradiente lineal de $0.55^{\circ}\text{C}/\text{cm}$ concomitante con un incremento uniforme de temperatura obtenido éste como diferencia entre los incrementos uniformes de temperaturas impuestos en las dos secciones parciales: la losa superior y los nervios.

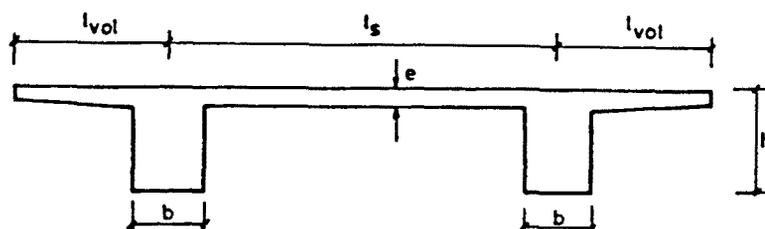
La figura 5.9 muestra esquemáticamente cómo obtener de forma muy simple la ley de torsores en los nervios y la ley de momentos flectores transversales en la losa superior.

El análisis estructural, tal como indican Priestley y Buckle (85), puede afrontarse de forma sencilla analizando la estructura como emparrillado plano, previa asimilación de la porción de losa superior incluida entre nervios a un conjunto de vigas transversales de canto el espesor de dicha

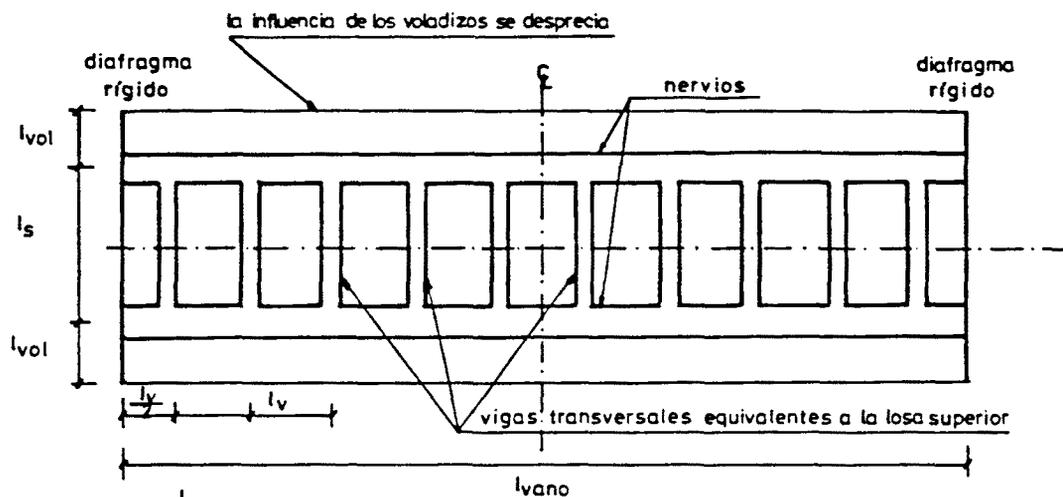
losa y de ancho la separación entre vigas. Dichas vigas se ven sometidas a unas deformaciones térmicas impuestas, deformaciones que, lógicamente, se ven coaccionadas por la presencia de los nervios en los extremos del tablero. El aplicar las ecuaciones de compatibilidad de giros en los nudos de enlace -giro a torsión en el nervio igual a giro a flexión en las vigas transversales- permite obtener las leyes longitudinales de torsores en nervios y flectores transversales en losa, las cuales se presentan de forma cualitativa en la figura 5.9. Para el caso mostrado se ha considerado la presencia de diafragmas rígidos -empotramientos a torsión- en los extremos del vano.

A modo de ejemplo, se ha analizado la respuesta tensional de un puente de sección transversal en π con luz de vano de 30.0 metros cuya losa superior se ve sometida a un gradiente de $0.55^{\circ}\text{C}/\text{cm}$. La sección transversal así como la estructura de emparrillado a analizar se muestra en la figura 5.10. En esta misma figura se presentan las leyes de torsores en nervios y flectores transversales en losa superior y los valores de las tensiones críticas de tracción.

A la vista de los resultados presentados en esta figura cabe concluir que las tensiones inducidas son, en general, de una magnitud no despreciable. Por otra parte, conviene señalar que las máximas tensiones tangenciales que solicitan el nervio coinciden con las tensiones tangenciales máximas originadas por la carga permanente y carga variable, y que las tensiones transversales de tracción inducidas en la losa superior se superponen a las originadas por la propia flexión transversal del tablero, debida a las cargas rodantes.



a) Sección transversal

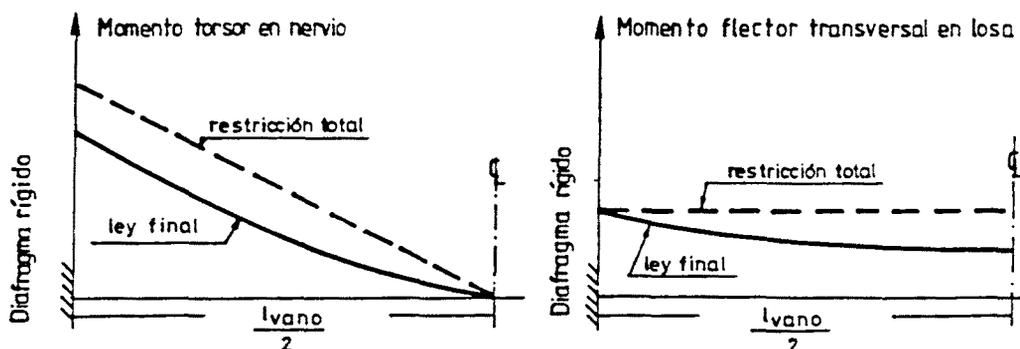


$$l_v = \frac{l_{vano}}{10}$$

Rigidez transversal de vigas $k_v = \frac{2EI}{l_s} = \frac{6l_v \cdot e^3}{l_s} E$

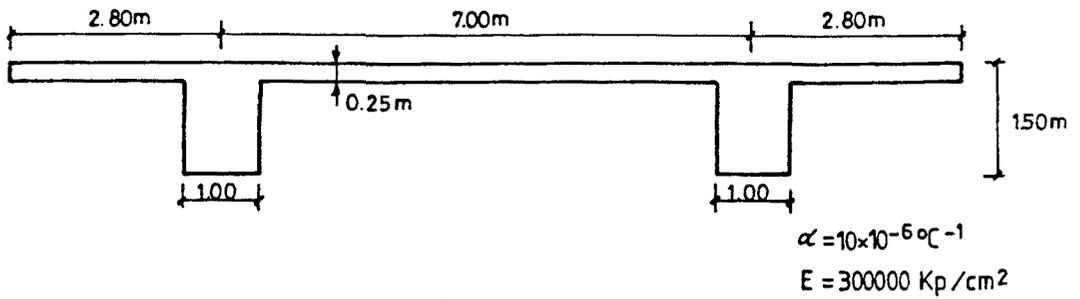
Rigidez a torsión de nervios $k_n = \frac{GJ}{l_v} = \frac{0.42bh^3\beta}{l_v} E$

b) Idealización de la estructura mediante un emparrillado plano

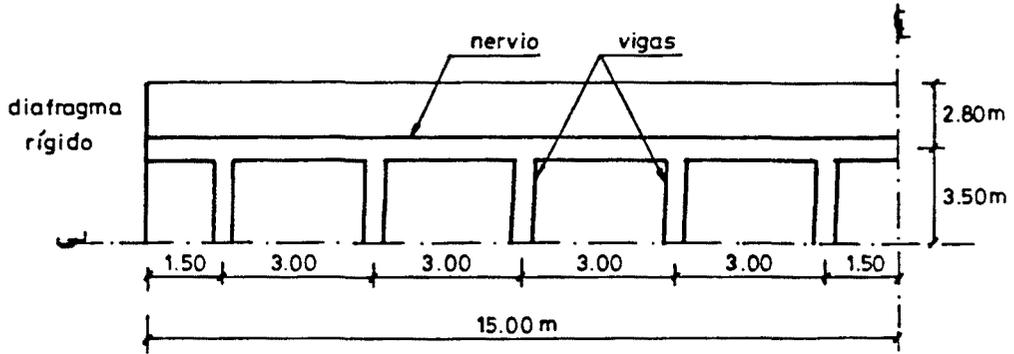


c) Perfiles cualitativos de la ley longitudinal de torsores en nervios y de la ley de momentos flectores transversales en la losa superior

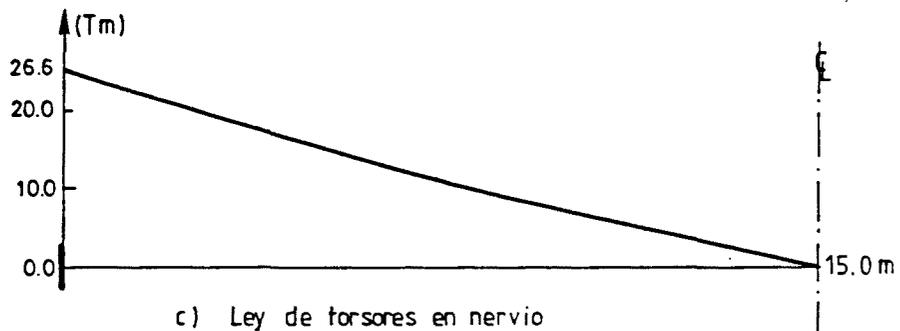
Fig. 5.9.- Análisis estructural lineal como emparrillado plano. Perfiles cualitativos de las leyes de torsores y flectores transversales originadas por la actuación de las deformaciones térmicas impuestas en la losa superior.



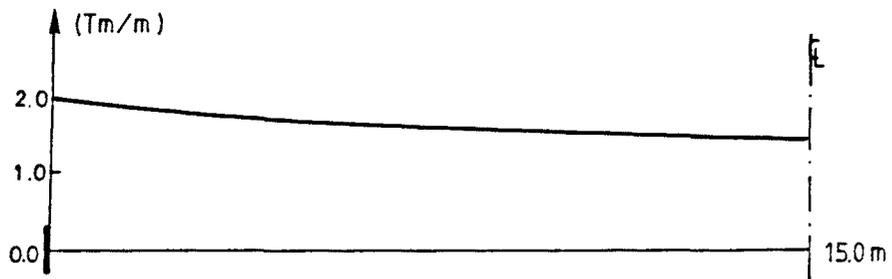
a) Sección transversal



b) Emparrillado plano



c) Ley de torsores en nervio



d) Ley de flectores transversales en losa

tensión máxima de tracción en losa superior = 19.2 Kp/cm²

tensión tangencial máxima en nervio = 7.7 Kp/cm²

Fig. 5.10.- Resultados del análisis de un puente de hormigón con sección transversal en π de luz de vano 30.0 metros sometido a un gradiente térmico de 0.55°C/cm en su losa superior.

5.3.- ZONAS CRITICAS DE LOS PUENTES DE HORMIGON FRENTE A LA ACCION TERMICA AMBIENTAL Y OTRAS ACCIONES

A la vista de los resultados presentados a lo largo de la tesis pueden visualizarse dos instantes críticos en lo que se refiere a la generación de tensiones de tracción que pueden provocar la aparición de fisuras a lo largo del contorno de la sección transversal de los puentes de hormigón.

En horas de madrugada, entre las 2 horas y las 5 horas, aparecen de forma concomitante las máximas tracciones longitudinales primarias en las fibras superior e inferior de la sección, el máximo gradiente negativo y la máxima diferencia positiva entre la temperatura de las células y el ambiente exterior, si estamos en presencia de una sección aligerada o celular.

En horas posteriores al mediodía solar, entre las 12 horas y las 16.50 horas, las tensiones y acciones térmicas que aparecen concomitantemente son máximas tracciones longitudinales primarias en los bordes inferiores de los voladizos y en los paramentos laterales exteriores, e interiores en el caso de secciones celulares, el máximo gradiente térmico vertical positivo y la máxima diferencia negativa entre la temperatura de las células y el ambiente exterior, en el caso de secciones celulares. .

En base a lo expuesto en los dos párrafos anteriores, la figura 5.11 muestra una geometría y una disposición de armadura convenientes a adoptar en el diseño de puentes losa para hacer frente a los estados tensionales inducidos por la acción térmica ambiental a nivel sección.

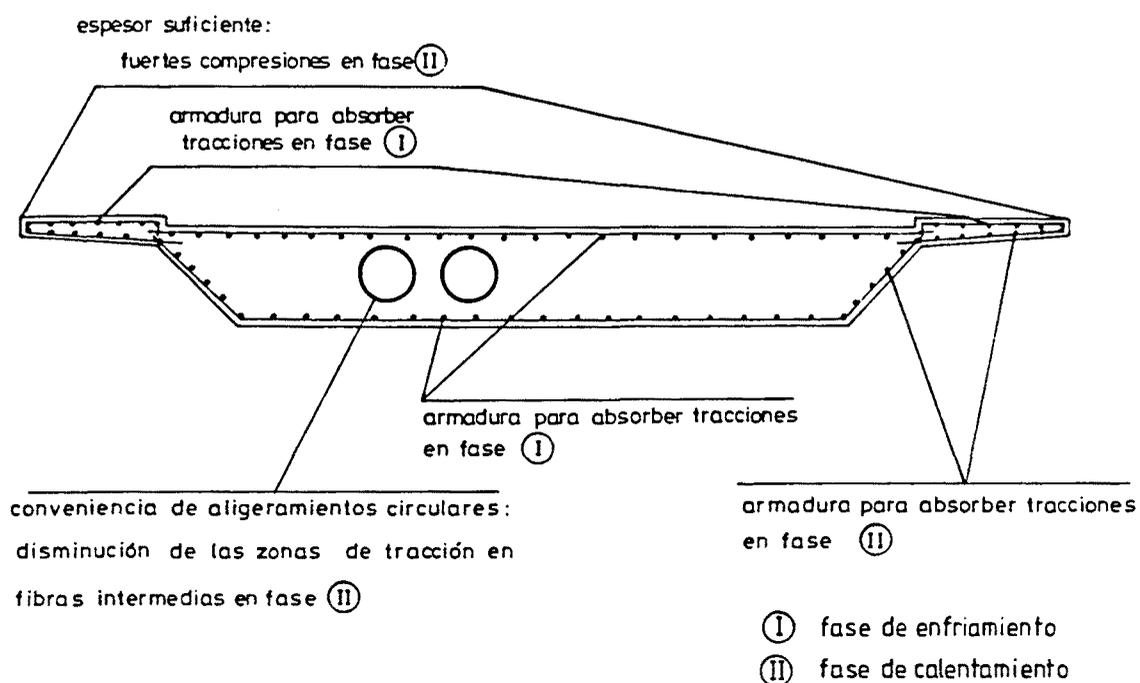


Fig. 5.11.- Recomendaciones de diseño en puentes losa frente a la acción térmica ambiental.

Conviene señalar que dicha armadura ya se dispone en la actualidad para paliar en la medida de lo posible los efectos perjudiciales ocasionados por la imposición de deformaciones de tipo atensional como son la retracción y las termohigrométricas. No obstante, el conocer los estados tensionales asociados a las deformaciones térmicas originadas por los efectos térmicos ambientales puede redundar en un dimensionamiento más preciso de tal armadura.

Para las tipologías transversales de puentes cajón conviene tener presente que, además de la existencia de tensiones longitudinales primarias de tracción, aparecen tensiones transversales térmicas secundarias de tracción debido a la hiperestaticidad del marco cajón lo que origina la aparición de determinadas zonas de la sección que se encuentran sometidas a un estado biaxial de tracciones.

Así, en fase de enfriamiento del tablero las fibras extremas de la sección se ven sometidas a unas tracciones longitudinales primarias y a unas tracciones transversales secundarias, provenientes éstas últimas de la resolución de la estructura marco cajón sometida a una diferencia positiva de temperaturas entre la célula y el ambiente exterior.

En fase de calentamiento del tablero, las fibras intermedias, y en concreto la fibra inferior de la losa superior y las que se encuentran en contacto con la célula y a una profundidad de 0.2 h a 0.3 h, siendo h el canto total del tablero, son las que se ven sometidas a las máximas tracciones longitudinales primarias. Debido a que para esta misma fase la diferencia entre la temperatura de la célula y la del ambiente exterior se hace máxima negativa, dichas fibras se ven sometidas a tracciones transversales secundarias, por lo cual aparecen de nuevo zonas de la sección cajón sometidas a un estado biaxial de tracciones.

Ello, si cabe, puede verse más acentuado si la temperatura ambiente sufre un descenso brusco y repentino generándose tensiones internas originadas por la no linealidad de la distribución de temperaturas y por los posibles efectos de una retracción diferencial existente entre almas y losas del tablero cajón (Leonhardt et al. (56)).

De acuerdo con lo expuesto en párrafos anteriores, siempre será recomendable que los acartelamientos de la sección cajón presenten una transición muy gradual y alcancen las fibras de las almas situadas a una profundidad de 0.2 h a 0.3 h. Por otra parte, no es conveniente unir elementos de fuerte espesor con elementos de pequeño espesor; de esta forma se reduce la probabilidad de aparición de estados tensionales indeseables debidos a retracción y se consigue un reparto transversal entre alas y almas equilibrado.

La figura 5.12 muestra de forma cualitativa una geometría y disposición de armaduras convenientes a adoptar en el diseño de la sección transversal de los puentes cajón frente a los efectos térmicos ambientales.

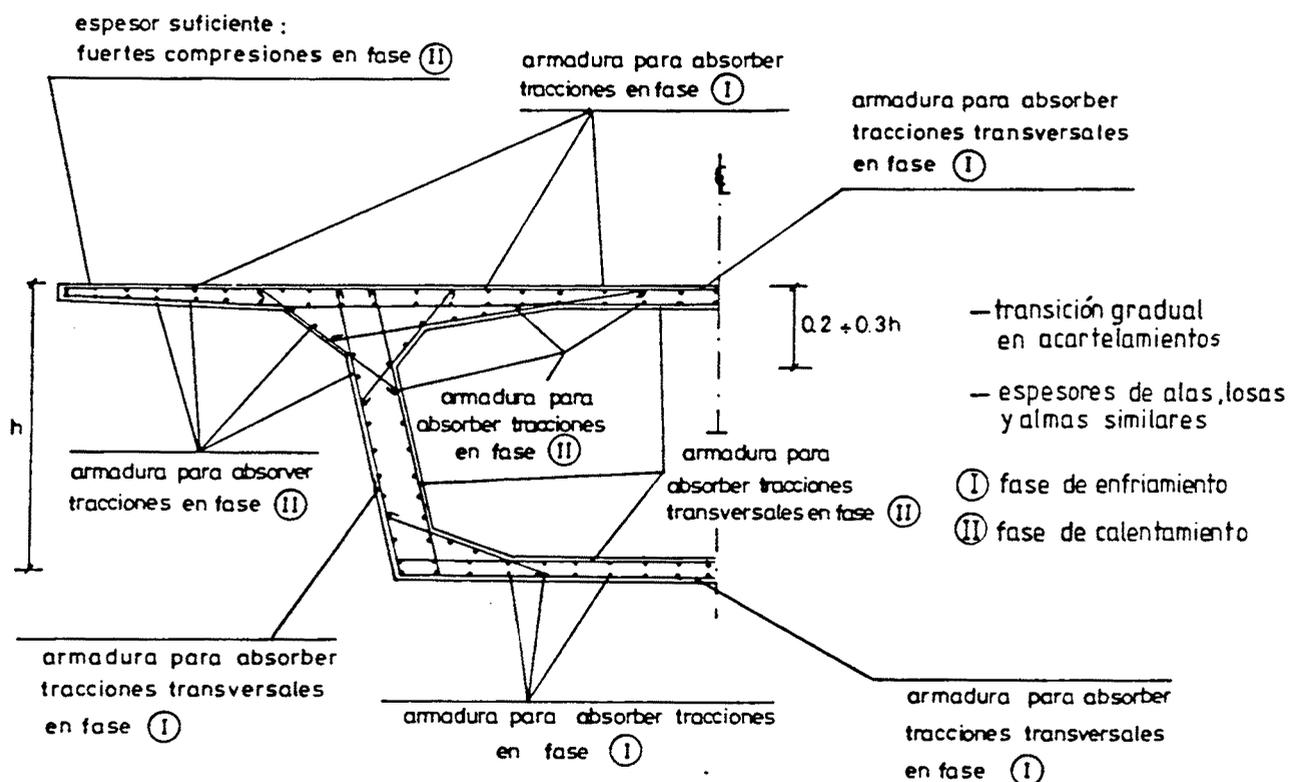


Fig. 5.12.- Recomendaciones de diseño en puentes cajón frente a la acción térmica ambiental.

También aquí hay que indicar que la armadura que se presenta en la figura 5.12 es una armadura que se dispone actualmente por razones de piel, retracción y deformaciones termohigrométricas. Ahora bien, el conocimiento de los valores de las tensiones originadas por la acción térmica ambiental permitirá dimensionar de forma más idónea la armadura longitudinal y transversal de los puentes cajón de hormigón.

Por otra parte, y a modo de resumen, es de interés el visualizar cuáles deben ser las secciones a comprobar en un puente genérico de hormigón cuando éste se ve sometido a la acción térmica en combinación con el resto de acciones a considerar en el diseño y proyecto de los puentes de hormigón, desde el punto de vista de obtención de su respuesta tensional según el eje longitudinal de la directriz.

En general, tales acciones serán, además de la acción térmica -tensiones longitudinales primarias y secundarias-, la carga permanente, el pretensado y la sobrecarga de uso.

Como ya ha sido comentado en capítulos precedentes se hace necesario el adoptar hipótesis de cargas que contemplen de forma realista la probabilidad de aparición conjunta de las acciones a considerar en diseño, estudio éste de vía futura que lógicamente debe afrontarse desde un punto de vista estadístico.

A continuación, se presentan en la tabla 5.5 las fibras de diferentes secciones de un puente de hormigón con tipología longitudinal de viga continua de n vanos que se ven sometidas a máximas tracciones longitudinales bajo diversas combinaciones de acciones.

Instante del día	Cargas permanentes	Pretensado		Sobrecargas de uso		Acción térmica			Fibras solicitadas a máximas tracciones
		Antes de pérdidas diferidas	Después de pérdidas diferidas	Vanos cargados	Alternancia de cargas y descargados	Tensiones longitudinales primarias	Gradiente negativo	Gradiente positivo	
Fase de enfriamiento del tablero (2-5 horas)	X	-	X	X	-	X	X	-	Fibra superior acción apoyos
	X	X	-	-	X	X	X	-	Fibra superior acción centro vano(*)
Fase de calentamiento del tablero (12-17 horas)	X	-	X	-	X	X	-	X	Fibra inferior acción centro vano
	X	X	-	-	-	X	-	X	Fibra inferior acción apoyos (*)

(*) El pretensado no puede controlar la fisuración.

Tabla 5.5.- Hipótesis de cargas a considerar en el diseño de puentes de hormigón teniendo en cuenta la acción térmica. Fibras de las secciones críticas sometidas a máximas tracciones.

Cabe resaltar el hecho de que en horas de madrugada, debido a la existencia de tensiones longitudinales primarias, la fibra superior del tablero del puente puede verse sometida a tracciones de cierta relevancia. El hecho de que para este instante del día la sección a comprobar sea la de apoyo o de centro vano ya dependerá de la propia combinación de acciones considerada en el análisis.

Durante la fase de calentamiento del tablero, la fibra que se ve sometida a máximas tracciones es la fibra inferior y la sección a comprobar dependerá, de nuevo, de la combinación de acciones contemplada. Conviene señalar que para este instante del día la distribución de tensiones longitudinales primarias produce un efecto favorable puesto que debido al perfil no lineal de la distribución de temperaturas existente a través de la sección transversal del tablero, dicha fibra inferior se ve sometida a una tensión longitudinal primaria de compresión.

Por último, es importante destacar que bajo aquellas hipótesis de cargas en las que se pueden generar tensiones de tracción considerables en la fibra superior de la sección centro vano y en la fibra inferior de la sección de apoyo, la posición de los tendones de pretensado no es, en general, la idónea para llevar a cabo un buen control de la fisuración. En estos casos puede ser conveniente disponer armadura pasiva y/u otros tendones de pretensado, esenciales para controlar dicha fisuración, o dimensionar el puente de hormigón mediante la adopción del pretensado parcial. Ello abre una nueva vía futura de investigación en lo que se refiere al diseño de puentes hormigón sometidos a la actuación de deformaciones impuestas.