

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

A mis padres

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero expresar mi más sincero agradecimiento al Profesor Antonio Aguado que me ha orientado y dirigido con maestría a lo largo de todo el período de desarrollo de la presente Tesis Doctoral.

También mi más sincero agradecimiento a María del Carmen Longás por su paciente y gran labor mecanográfica así como a Javier Luque y José Durante por los trabajos de delimitación llevados a cabo, que en esta Tesis Doctoral han sido ciertamente numerosos.

Por otra parte, deseo agradecer al Departament d'Ensenyament de la Generalitat de Catalunya el otorgamiento de un "Ajut per la finalització de Tesis Doctorals" concedido en Noviembre de 1985.

En este apartado de agradecimientos no puedo olvidar a aquellas personas que, de forma desinteresada, han suministrado información de mediciones experimentales llevadas a cabo en puentes de hormigón, relacionadas con la problemática a estudiar en la presente Tesis Doctoral. A ellas, mi gratitud.

Mi agradecimiento también a Antonio Alcayde por su ayuda y colaboración prestadas en la instrumentación de un puente de hormigón armado emplazado en el término municipal de Rubí, provincia de Barcelona, para medición de temperaturas.

También debo agradecer al Centro de Cálculo de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos las facilidades dadas para poder disponer de su sistema informático de cara a la realización de los pertinentes análisis numéricos.

Por último, mi más sincera gratitud al Profesor Antonio R. Marí y a todas aquellas personas que con su apoyo y sugerencias han hecho posible que esta Tesis Doctoral llegue a su fin. A todas ellas, gracias.

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

	<u>Pág</u>
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
 <u>CAPITULO 2.- MODELO DE ANALISIS PARA LA OBTENCION DE LA RESPUESTA TERMICA Y TENSIONAL DE LOS PUENTES DE HORMIGON</u>	
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 HORMI GON	423
3.5.1.- Puentes losa aligerada	423
3.5.2.- Puentes de vigas	432
 <u>CAPITULO 4.- ACCIONES TERMICAS DE DISEÑO EN PUENTES DE HORMIGON. APLICACION A PUENTES EMPLAZADOS EN LA GEOGRAFIA ESPAÑOLA</u>	
4.1.- INTRODUCCION	440
4.2.- ACCIONES TERMICAS DE DISEÑO	444
4.2.1.- Valores adoptados por los diferentes pará- metros 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 tempe- ratura 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 tempe- ratura 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 tempe- ratura 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

I N T R O D U C C I O N

INTRODUCCION

El interés por el análisis y diseño de estructuras de hormigón armado y hormigón pretensado frente a efectos térmicos ha ido aumentando notablemente en estos últimos años y prueba de ello son las numerosas publicaciones y artículos de investigación que versan sobre esta temática, algunos de los cuales quedan recogidos en la bibliografía de la presente tesis.

El estudio del comportamiento de las estructuras de hormigón frente a efectos térmicos, ya sea de cara a la definición de la propia acción térmica o a la obtención de la respuesta térmica a nivel sección y de la respuesta tensional a nivel sección y nivel estructura, es una temática ciertamente amplia que abarca diversas líneas de investigación como pueden ser el efecto de las elevadas temperaturas sobre las estructuras de hormigón -hornos, chimeneas,...-, el efecto de las bajas temperaturas sobre las estructuras de hormigón -depósitos de almacenamiento de gases licuados-, efectos térmicos en estructuras de hormigón durante el proceso de fraguado y los efectos térmicos ambientales sobre estructuras de hormigón.

De las líneas de investigación mencionadas en el párrafo anterior, es el estudio de los efectos térmicos ambientales en estructuras de hormigón la que presenta un ámbito de aplicación más amplio ya que, de alguna forma, toda estructura de hormigón, ya sea de hormigón en masa, hormigón armado u hormigón pretensado, se encuentra inmersa en unas determinadas condiciones de contorno ambientales y climatológicas que influyen sobre su respuesta térmica y tensional.

Por otra parte, en lo referente a la tipología de las estructuras de hormigón, es quizás la tipología estructural de los puentes de hormigón aquélla para la cual la incidencia de la acción térmica ambiental en su respuesta tensio-
nal a nivel sección y nivel estructura es clara y notable -incidencia de la radiación solar sobre el tablero, exposición de la estructura del puente a la velocidad del viento, variaciones estacionales y diarias de la temperatura ambiente en el lugar de emplazamiento, ...-.

En general, varias son las razones por las que el interés por el estudio del análisis y diseño de los puentes de hormigón frente a la acción térmica ambiental puede estar justificado.

En primer lugar, en las últimas décadas los principales interrogantes sobre el comportamiento de los puentes de hormigón estaban relacionados con los estados límites últimos y con consideraciones de seguridad. Sin embargo, recientemente, se ha prestado una mayor atención a cuestiones relativas al comportamiento en servicio y durabilidad de las estructuras de los puentes de hormigón, cuestiones que, evidentemente, no deben obviar la consideración de la acción térmica ambiental (CEB (22)).

En segundo lugar, conviene señalar que recientes estudios analíticos y experimentales han mostrado que las condiciones ambientales y climatológicas en las que se encuentran inmersos algunos puentes de hormigón son más severas que las previamente consideradas en diseño. Cabe aquí hacer hincapié en que estudios relativos a la puesta fuera de servicio de algunos puentes de hormigón y a diversas patologías observadas confirmaron que la razón desencadenante de ello fue un inadecuado diseño de la estructura frente a la acción térmica ambiental y la no consideración de determinadas solicitaciones térmicas que pueden presentarse con notable frecuen-

cia en los puentes de hormigón. (Leonhardt et al. (56), Leonhardt y Lippoth (57), Priestley (84), Imbsen et al. (44), Zichner (97)).

Quizás el caso más espectacular e instructivo sea el del Puente de Jagst en Untergriesheim, Alemania. Por ello, se cree de interés el exponer de forma algo detallada las razones por las cuales dicho puente quedó fuera de servicio. El puente presentaba una tipología longitudinal de viga con tinua de dos vanos con sección transversal en cajón y fue sometido a una investigación rutinaria en el mes de Julio de 1964 no observándose anomalía alguna. En el mes de Septiembre de ese mismo año se apreció la formación de una grieta de 5 a 6 mm. de espesor en la parte superior exterior del alma, extendida a lo largo de casi la totalidad de la longitud del puente.

La investigación posterior, presentada por Leonhardt, Kolbe y Peter (56), mostró que una de las causas decisivas que dieron lugar a la aparición de la grieta fue una brusca y repentina disminución de la temperatura ambiente exterior que generó una diferencia de temperaturas de aproximadamente 30°C entre la cara interior y la cara exterior del alma de la sección cajón. Debido a que el espesor de las almas era ciertamente elevado, 75 cms., la distribución de temperaturas a través del alma difería de forma considerable de una distribución lineal induciéndose el consecuente estado tensional interno autoequilibrado. Las fibras solicitadas a tracción eran las situadas en el exterior e interior del al ma apareciendo la tracción máxima absoluta en la fibra exte rior y evaluándose en, aproximadamente, 26 Kp/cm².

Dicha tensión de tracción, sumada a la tracción ya existente originada por el hecho de que la presencia de la vaina del tendón de pretensado impidiera la deformación por retracción del hormigón en la zona colateral a él, que se es

timó en unos 12 Kp/cm^2 , supuso la aparición de una tensión total de tracción en la parte superior exterior del alma del orden de 38 Kp/cm^2 en el instante en el que se produjo el descenso brusco de la temperatura ambiental exterior, tensión que claramente superaba la resistencia a tracción del hormigón la cual se estimó en unos 27 Kp/cm^2 . Todo ello explica bien la formación de la grieta.

Una tercera razón de este marcado interés por el estudio de los puentes de hormigón frente a los efectos térmicos ambientales es el tratamiento simplista y la falta de rigor científico que, en torno a la definición de la acción térmica a considerar en diseño, reflejan las normativas vigentes de ámbito nacional y la mayoría de las normativas vigentes de ámbito internacional. Dichas normativas no tienen en cuenta el carácter probabilístico y local de la acción y dan, en general, unos criterios de diseño excesivamente simplistas.

Centrándonos ya en la propia normativa nacional es de interés destacar el hecho de que la fórmula que preconizan la Instrucción EP-80 (38) y la Instrucción relativa a las acciones a considerar en el proyecto de puentes de carretera (68) para determinar el rango anual de la temperatura media de un puente de hormigón y, por consiguiente, los incrementos o decrementos uniformes de temperatura a considerar en el análisis data del año 1939 (Instrucción para el proyecto y ejecución de obras de hormigón (76)) no encontrándose el por qué de dicha expresión ni las bases e hipótesis de partida para llegar a ella.

Por otra parte, cabe señalar que instrucciones como las anteriormente citadas, que son, de alguna manera, instrucciones que debe tener presente en todo momento el proyectista de puentes de hormigón, no proporcionan criterios y pautas para poder evaluar, de una forma simple pero realista, los incrementos o decrementos uniformes de temperatura y

gradientes térmicos a considerar en el diseño de los puentes de hormigón, teniendo en cuenta su lugar de emplazamiento y las condiciones ambientales y climatológicas en las que se encuentra inmerso.

A estas deficiencias en la forma de cómo abordar la problemática de los efectos térmicos ambientales en puentes de hormigón se suman otras como son la no consideración de diversos factores físicos y geométricos que influyen de forma notable en la determinación de las acciones térmicas de diseño -la presencia de capa asfáltica de rodadura, la propia tipología transversal del puente,...

El poco rigor científico con el que, hasta la fecha, se ha resuelto la obtención de la respuesta térmica y tensional en los puentes de hormigón es también palpable en el estudio a nivel estructural. Por un lado, es evidente que la acción térmica se presenta de forma combinada con el resto de acciones permanentes y variables. Ahora bien, las hipótesis de cargas a considerar en el análisis deben contemplar la probabilidad de aparición conjunta de dichas acciones mediante los correspondientes coeficientes de frecuencia de aparición de acciones. Por otro lado, es clara la distinta respuesta del puente de hormigón en situación de servicio o en situaciones cercanas a rotura y de ahí que el método de cálculo a adoptar en el análisis deba contemplar la diferente respuesta tenso-deformacional del puente frente a las deformaciones térmicas impuestas.

No obstante, es la idea del autor de la presente tesis centrar el estudio de los efectos térmicos ambientales en puentes de hormigón a nivel sección fundamentalmente por considerar que el trabajo de investigación a llevar a cabo ya cubre numerosas lagunas de relevancia en lo referente a la temática mencionada, lagunas que algunas de ellas han sido suscitadas en las conversaciones que el autor de la tesis

ha mantenido con diferentes proyectistas españoles de puentes y por considerar también que el estudio es ya lo suficientemente complejo y extenso.

En cualquier caso, estudios del comportamiento a nivel estructura de los puentes de hormigón frente a la acción térmica ambiental relativos a la combinación de acciones a considerar en diseño y a la aplicación de modelos de análisis no lineal, estudios que ya tienen precedentes como pueden ser los trabajos realizados por Church y Clark (27) y Aparicio (6), pueden ser campo de futuras líneas de investigación.

Así pues, una vez definidas las líneas generales y específicas en las que se enmarca el presente trabajo de investigación, conviene exponer de forma breve cuáles son los objetivos finales perseguidos por el autor de esta tesis:

- Desarrollo de un modelo numérico capaz de obtener la respuesta térmica y tensional de los puentes de hormigón con tipología transversal variada para cualquier instante y que considere todas las posibles variables y parámetros que entran en juego en el fenómeno de la transmisión de calor en puentes de hormigón y que influyen sobre su respuesta tensional.
- Estudio de la influencia de los diversos parámetros geométricos, físicos, estructurales, ambientales y de emplazamiento sobre la respuesta térmica y tensional de los puentes de hormigón.
- Definición de las acciones térmicas de diseño -variaciones anuales de la temperatura media, gradientes térmicos y otras acciones térmicas- a considerar en el proyecto de puentes de hormigón con dife

rente tipología transversal emplazados en algún lugar de la geografía española.

- Obtención de estados tensionales de tracciones máximas a lo largo del contorno de las tipologías transversales comúnmente adoptadas en el diseño de los puentes de hormigón y recomendaciones de proyecto relativas a la geometría de la sección y a la disposición de armadura para hacer frente a dichos estados tensionales.

Una vez ya enunciados los objetivos perseguidos, se expone a continuación la metodología a seguir para garantizar el cumplimiento de los mismos y a describir brevemente el contenido de cada uno de los capítulos en que se fragmenta esta tesis.

El primer capítulo intenta aportar una panorámica general e ilustrativa sobre la problemática de los efectos térmicos ambientales en puentes de hormigón. Inicialmente se lleva a cabo una revisión de los conceptos básicos de la física del calor y de las diversas propiedades térmicas del material hormigón. A continuación, se exponen los métodos utilizados en ingeniería para resolver la ecuación diferencial de transferencia de calor y para obtener los estados tensionales asociados a las distribuciones del campo de temperaturas.

Seguidamente se revisan de forma crítica aquellos estudios analíticos y experimentales in situ, que se cree son los más sugerentes, relativos a la obtención de distribuciones térmicas y tensionales en puentes de hormigón y a la cuantificación de las acciones térmicas a considerar en el proceso de análisis y diseño de los puentes. Por último, se revisan y analizan los diferentes tratamientos propugnados por la normativa nacional y diferentes normativas interna-

cionales, las de un mayor ámbito de aplicación, en lo que se refiere a la definición de las acciones térmicas y estados tensionales de diseño en puentes de hormigón.

En el segundo capítulo, una vez ya presentado el estado actual del conocimiento sobre el comportamiento térmico y tensional de los puentes de hormigón frente a los efectos térmicos ambientales, se expone y describe el modelo numérico desarrollado por el autor de esta tesis de cara a la obtención de la respuesta térmica y tensional de los puentes de hormigón para cualquier tipología transversal de tablero adoptada. Los resultados derivados del presente estudio se contrastan con resultados experimentales y analíticos obtenidos por diversos autores para diferentes puentes de hormigón pudiendo apreciarse la bondad del modelo. En los anejos 1 y 2 se presentan respectivamente los listados correspondientes al programa numérico confeccionado y a las salidas de resultados de alguno de los ejemplos analizados y contrastados con otros estudios analíticos y/o experimentales.

A este respecto, es de interés señalar que uno de los estudios experimentales presentados en este capítulo es consecuencia de la experimentación llevada a cabo por el doctorando. Ello ha sido útil de cara a la contrastación propia del modelo numérico desarrollado y ha permitido conjugar, en este caso, la componente analítica o numérica con la experimental, componentes ambas necesarias, en mi opinión, en un estudio de investigación de este carácter. Algunas cuestiones relativas a la instrumentación del puente se presentan en el anejo 3 de esta tesis.

El tercer capítulo presenta los resultados relativos a múltiples estudios paramétricos de las variables que influyen en el fenómeno de la transmisión de calor y, por consiguiente, en la respuesta térmica y tensional de los puentes de hormigón. Las tipologías transversales contempladas

son las comúnmente adoptadas en el diseño de puentes, a saber: puentes losa, puentes cajón y puentes de vigas.

Los resultados presentados para cada uno de los parámetros analizados hacen referencia, en general, a las distribuciones de temperaturas y de tensiones correspondientes al instante de máxima curvatura térmica vertical impuesta, a las evoluciones diarias y estacionales de los gradientes térmicos y de la temperatura media de la sección transversal del puente, a la propia influencia del parámetro sobre los gradientes máximos y los rangos de variación de la temperatura media del puente y a las distribuciones tensionales correspondientes al instante en el que se genera la máxima tensión de tracción en el hormigón.

Los objetivos que persiguen tales estudios paramétricos, basados en el modelo numérico desarrollado, permitirán, por un lado, visualizar y cuantificar la influencia de cada uno de los parámetros físicos, estructurales, geométricos, ambientales y de emplazamiento contemplados sobre la respuesta térmica y sobre la respuesta tensional asociada y, por otro, obtener un conjunto de resultados que sean punto de partida de cara a la definición de los valores característicos de las acciones térmicas y de los estados tensionales a considerar en el diseño de los puentes de hormigón.

A continuación, el cuarto 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 en proyecto.

Dichas acciones térmicas, cuya definición se presenta en base a mapas, tablas y fórmulas de diseño, son las siguientes:

- Variaciones anuales de la temperatura media del puente e incrementos o decrementos uniformes de temperatura.
- Gradientes térmicos verticales: positivos (la fibra superior del tablero se encuentra a mayor temperatura que la fibra inferior) y negativos (la fibra superior del tablero se encuentra a menor temperatura que la fibra inferior).
- Gradientes térmicos horizontales, según el otro eje principal de inercia de la sección transversal del tablero del puente.
- Solicitaciones térmicas transversales, cuya influencia, como se verá con posterioridad, es notable en puentes cajón y puentes de tablero claramente nervado.

El conocimiento de tales acciones redundará en una disposición más adecuada de los aparatos de apoyo y de las posibles juntas de dilatación y en unos resultados derivados del análisis estructural más acordes con la realidad física del problema.

A continuación, se desarrollan algunos ejemplos representativos de puentes de hormigón ya construídos en la geografía peninsular en donde se muestra la metodología a seguir de cara a la definición de las acciones térmicas a considerar en diseño.

Cabe aquí incidir en el hecho de que una optimización de los modelos de análisis y diseño estructural siempre es conveniente; ahora bien, esta conveniencia puede verse algo desvirtuada si lo que se está imponiendo como acción, en este estudio la acción térmica, es una acción de cuyo valor no se tiene a priori un conocimiento más o menos preciso, basa-

do en las condiciones ambientales y climatológicas existentes en el lugar de emplazamiento y en otros condicionantes de índole físico, estructural y geométrico.

El quinto capítulo centra su objetivo en el conocimiento de los estados tensionales longitudinales y transversales inducidos por la acción térmica ambiental a considerar en el diseño de puentes de hormigón emplazados en la geografía española.

De acuerdo con lo expuesto con anterioridad en esta introducción, las distribuciones de tensiones térmicas a analizar se limitan al estudio tensional inducido, de forma intrínseca, por la propia acción térmica ambiental si bien se llevan a cabo comentarios puntuales sobre la influencia que pueden ejercer los estados tensionales térmicos existentes a nivel sección sobre la respuesta tensional global de la estructura del puente.

A continuación y dentro de este mismo capítulo, se visualizan, para cada una de las tipologías transversales comúnmente adoptadas en el proyecto de puentes de hormigón, las posibles zonas críticas de las mismas sometidas a máximas tracciones y se proponen recomendaciones de actuación relativas a la geometría de la sección transversal y a la disposición de armaduras para hacer frente a los estados tensionales longitudinales y transversales originados por la acción térmica ambiental.

En el sexto y último capítulo se presenta un breve resumen del trabajo desarrollado y se enumeran de forma concisa las conclusiones más relevantes extraídas de la presente investigación. Con posterioridad se exponen diversas recomendaciones de actuación de cara a la consideración de la acción térmica ambiental en el proceso de análisis y diseño de los puentes de hormigón y se mencionan futuras líneas de in-

vestigación en relación con la problemática de la influencia de la acción térmica ambiental sobre el comportamiento tenso-deformacional de los puentes de hormigón y con la problemática generalizada de los efectos térmicos sobre el comportamiento de las estructuras de hormigón.

C A P I T U L O 1

ESTADO ACTUAL DEL CONOCIMIENTO.

REVISION CRITICA

1.1.- INTRODUCCION

Este capítulo intenta aportar una panorámica general e ilustrativa sobre la problemática de los efectos térmicos ambientales en puentes de hormigón y su incidencia en la respuesta térmica y tensional de éstos.

En una primera fase se lleva a cabo una revisión de los conceptos básicos de la física del calor exponiendo, por una parte, los principales mecanismos de transferencia de calor que tienen lugar en puentes de hormigón y, por otra, la ecuación diferencial que rige el fenómeno físico de la conducción del calor en el seno de la masa del material hormigón.

Con el fin de centrar algo mejor el tema y su problemática en el ámbito de aplicación de la presente tesis -los puentes de hormigón- se cree oportuno el realizar una sucinta exposición de las diversas propiedades térmicas de cada uno de los componentes que constituyen el material hormigón y de éste, en concreto, y sus particularidades de cara a la obtención de la respuesta térmica y tensional a nivel sección.

A continuación, se lleva a cabo una exhaustiva revisión de los métodos utilizados en ingeniería para resolver la ecuación diferencial de transferencia de calor y conocer así las distribuciones de temperaturas existentes en cualquier sección transversal genérica de un puente de hormigón. En base a tales distribuciones del campo de temperaturas se plantean y desarrollan todos los posibles estados tensionales asociados -tensiones longitudinales y tensiones transversales-

Seguidamente se pasa revista a una serie de estudios analíticos y experimentales in situ llevados a cabo por diferentes autores que tienen por objetivo común, por un lado, el obtener distribuciones reales de temperaturas en puentes de hormigón y analizar la influencia de cada una de las numero-

sas variables y parámetros que entran en juego en el fenómeno de la transmisión de calor en puentes de hormigón y, por otro, poder llegar a cuantificar, de forma aproximada, las acciones térmicas a considerar en el proceso de análisis y diseño.

Por último, se revisan y analizan los tratamientos propugnados por algunas normativas internacionales, las de un mayor ámbito de aplicación, en lo relativo a la definición u obtención de las acciones térmicas de diseño en puentes de hormigón.

1.2.- VISION FISICA DEL PROBLEMA

1.2.1.- Mecanismos de transferencia de calor en puentes de hormigón

Siempre que en un sistema exista una diferencia de temperaturas se producirá un flujo de calor desde la zona sometida a mayor temperatura hacia la zona que se encuentra a menor temperatura. El flujo de calor es, pues, el resultado de un gradiente de temperaturas.

Las estructuras expuestas a la intemperie y, en particular, los puentes de hormigón se encuentran sometidos a un intercambio de energía calorífica a través de las superficies de su contorno, hacia o desde el entorno que los rodea.

Tal intercambio de energía calorífica entre ambos medios -puente de hormigón y ambiente- depende de numerosos factores, aunque el proceso mediante el cual tiene lugar la transferencia de calor puede atribuirse a tres mecanismos principalmente y que, con frecuencia, aparecen simultáneamente (White (94)):

- Radiación solar y re-radiación del entorno y de la estructura
- Convección calorífica
- Conducción calorífica

De entre éstos es, en general, el calor transferido por radiación el mecanismo de mayor importancia.

Transferencia de calor por radiación

Durante las horas diurnas existe una ganancia neta de energía calorífica en la estructura del puente. Ello es resultado de la radiación solar incidente sobre las superficies de

la estructura y que ha sido absorbida por ésta. Contrariamente, durante la noche, tiene lugar una pérdida de la energía calorífica almacenada por la estructura debido, en parte, a la re-radiación emitida por ésta hacia los alrededores.

La radiación incidente sobre las superficies de una estructura puede ser de dos tipos que son la radiación de onda corta y la radiación de onda larga (Zichner (97)).

La radiación de onda corta (longitud de onda comprendida entre 0.25 y 3 μm) es, en esencia, la radiación que incide sobre las superficies de la estructura del puente directamente del sol. No obstante, existe también alguna contribución debida a la radiación difusa emitida desde el cielo (a dicha cantidad se le denomina, con frecuencia, radiación solar indirecta) (White (94)).

La radiación de onda larga (longitud de onda comprendida entre 6 y 60 μm) se emite desde cualquier cuerpo como resultado de su propia energía calorífica almacenada. El intercambio de calor debido a la radiación de onda larga, aunque secundario al intercambio de calor generado por radiación de onda corta, es importante y explica satisfactoriamente los intercambios existentes de energía calorífica entre las superficies externas de las estructuras y, en concreto, de los puentes de hormigón y el entorno ambiental que los rodea, sobretudo en horas nocturnas. Lógicamente durante el día, dicha radiación también contribuye a la entrada de energía calorífica en la estructura.

Ambos tipos de radiación quedan englobados en un mecanismo general de transferencia de calor que es la radiación térmica, entendiendo ésta como la radiación electromagnética que emite la superficie de un cuerpo que ha sido excitado térmicamente. Todos los cuerpos emiten esta radiación a sus alrededores y, a su vez, absorben la radiación térmica procedente de los alrededores. Este intercambio de radiación da lugar al enfriamiento o calentamiento del cuerpo (Aguilar (4)).

La radiación térmica que corresponde a la emisión de energía en razón de su temperatura se sitúa entre 0.1 y 100 μm y, por lo tanto, incluye totalmente en su interior el rango de valores de longitud de onda correspondientes a la radiación solar y a la radiación de onda larga (figura 1.1).

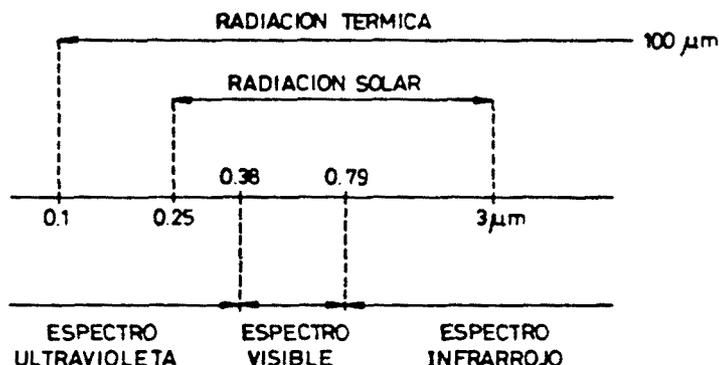


Fig. 1.1.- Espectro electromagnético y radiación térmica (Aguilar (2)).

Sea un haz de energía radiante que incide sobre una superficie genérica. Si la cantidad de energía incidente es la unidad, una parte de ésta es absorbida por el material, otra se refleja y el resto se transmite a través del cuerpo.

El balance de energía es

$$a+r+t=1 \quad |1.1|$$

donde a es el factor de absorción, r es el factor de reflexión y t es el factor de transmisión o transmisividad.

En el caso del hormigón, al ser éste un material opaco no se transmite radiación y por ello el factor de transmisión t es nulo. Así pues, las estructuras de hormigón y, en concreto, los puentes de hormigón se comportan como "cuerpos grises" ya que absorben parte de la radiación incidente de todas las longitudes de onda y reflejan, en sus superficies externas, el resto.

Como resumen, la figura 1.2 muestra los mecanismos de radiación existentes en un puente de hormigón.

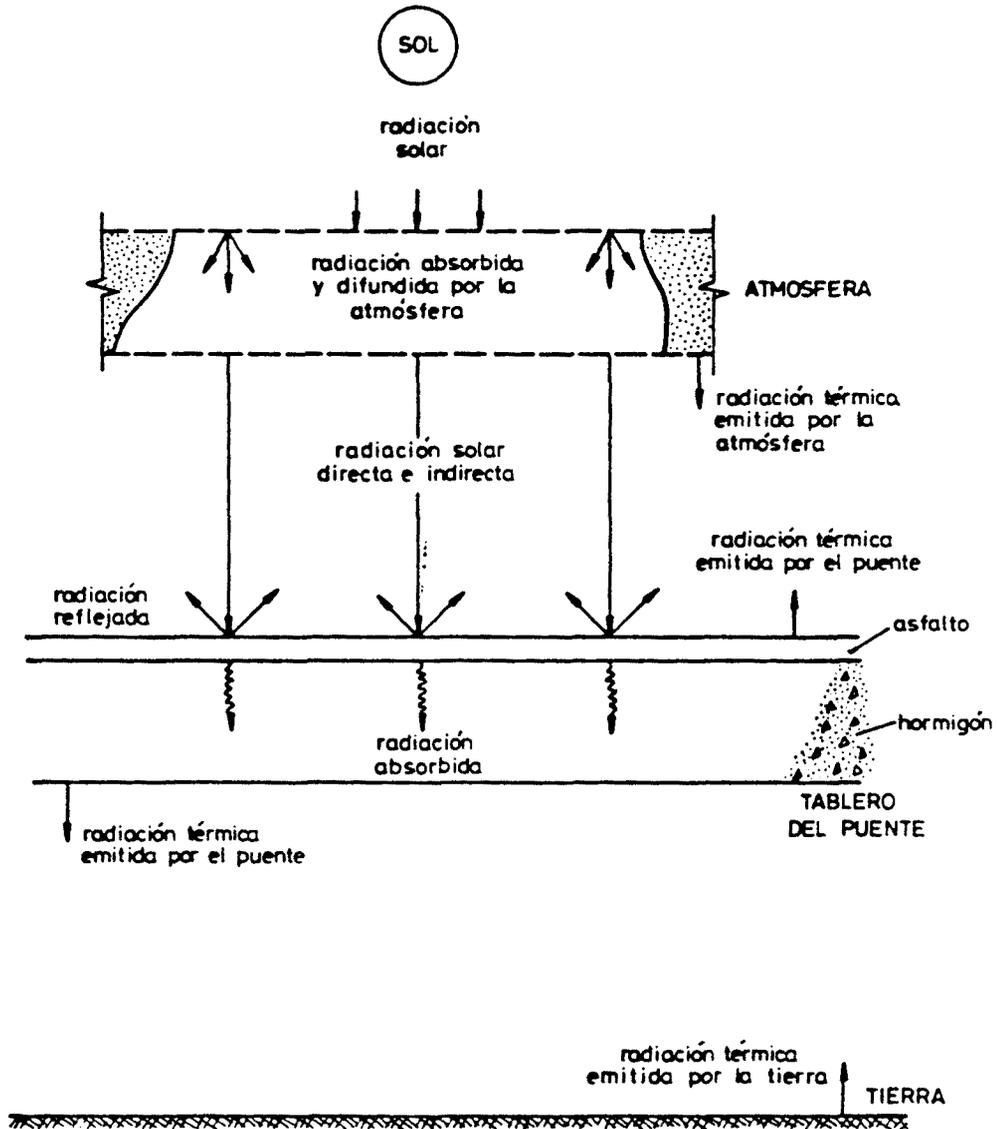


Fig. 1.2.- Mecanismos de transferencia de calor por radiación en un puente de hormigón.

La resolución del problema térmico en puentes de hormigón necesita, pues, del conocimiento de la radiación solar absorbida por ellos y del intercambio de energía calorífica existente entre el puente y el entorno ambiental que le rodea debido a la radiación térmica emitida por ambos medios.

Aunque la radiación solar incidente sobre puentes de hormigón o sobre cualquier otro cuerpo puede medirse experimentalmente (Priestley (81)), existen métodos analíticos que permiten obtener su valor con más o menos exactitud. Tales métodos, desarrollados en su gran mayoría por físicos para lle-

var a cabo estudios de aprovechamiento de energía solar (Coronas et al. (25)), han sido posteriormente utilizados por ingenieros en el estudio de los efectos térmicos ambientales en puentes de hormigón (Elbadry (33)). Otras aproximaciones al valor de la intensidad de la radiación solar incidente en puentes de hormigón han sido sugeridas por diversos investigadores (Emerson (34) (37), Hunt (43)).

En lo que se refiere al valor del factor de absorción de los puentes de hormigón ($0 < a < 1$) es evidente que el tipo de superficie y fundamentalmente su color tienen un efecto significativo sobre la cantidad de radiación absorbida por aquellos. Ello viene corroborado por estudios teóricos y análisis experimentales realizados por Emerson (37) y Priestley (84).

Por último, la radiación térmica emitida por un cuerpo como resultado de su propia temperatura se evalúa mediante la aplicación de la ley de la radiación de Stefan-Boltzmann: "La cantidad total de energía radiante por unidad de área que emite una superficie a la temperatura absoluta T_{abs} para todas las longitudes de onda es el poder emisor total". Dicha ley viene definida por la siguiente relación

$$E = e \cdot C_{SB} \cdot T_{abs}^4 \quad |1.2|$$

en la cual C_{SB} es la constante de Stefan-Boltzmann, cuyo valor es $C_{SB} = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$ y e es la emisividad total y su valor, función de la temperatura y del estado de superficie del cuerpo, está comprendido entre cero y la unidad.

Así pues, conociendo las emisividades y temperaturas de los diferentes medios que entran en juego en el fenómeno, se podrá evaluar el intercambio de energía calorífica existente entre ellos debido a radiación térmica.

La mayoría de los investigadores que han estudiado y analizado el fenómeno térmico en puentes de hormigón se han basado en la ley de Stefan-Boltzmann para obtener tal intercambio energético (Elbadry (33)(32), Dilger y Ghali (28)).

No obstante, debido a los pequeños valores que adoptan la constante de Stefan-Boltzmann, C_{SB} , y el poder emisivo total, e , a temperaturas no muy altas los efectos de tal radiación térmica no son muy significativos y pueden ser despreciados en la modelización del fenómeno físico. (Aguilar (4)).

Transferencia de calor por convección

La convección es el mecanismo de transferencia de calor que tiene lugar en un fluido en virtud de movimientos macroscópicos de la masa del propio fluido.

Las leyes de la transferencia de calor por convección son realmente complejas y el flujo calorífico que se origina entre un cuerpo cualquiera y el fluido en el que se encuentra sumergido depende de numerosas causas:

- Diferencia de temperaturas entre el fluido y el cuerpo
- Velocidad de desplazamiento del fluido
- Densidad, viscosidad, calor específico y conductividad térmica del fluido
- Naturaleza, forma, dimensiones y orientación del cuerpo.

Debido a que además las condiciones del fluido dependen de la temperatura y de la presión, el flujo de convección resulta difícil de evaluar analíticamente y hay que recurrir, en la mayoría de los casos, a métodos experimentales.

Sea una superficie plana, que podría representar la superficie superior de un tablero de puente de hormigón, a una temperatura superficial T_s . Dicha superficie se enfría o calienta al entrar en contacto con una corriente de aire (fluido).

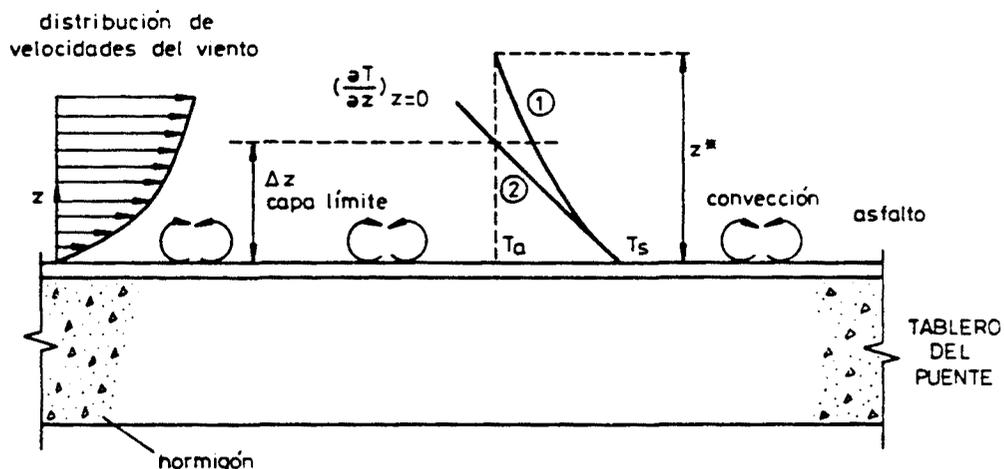


Fig. 1.3.- Fenómeno de convección. Enfriamiento de la superficie superior de un tablero de hormigón al encontrarse éste sumergido en una corriente de aire.

Según un plano normal a la superficie, la temperatura del aire varía desde T_s hasta T_a , temperatura ambiente, según una curva similar a la mostrada en la figura 1.3 (curva 1).

El intercambio de calor entre la superficie del tablero del puente y el aire se lleva a cabo en una película de espesor indefinido z^* ; no obstante, dicho intercambio puede suponerse concentrado en una capa de espesor Δz -capa límite- el cual puede aproximarse extrapolando la distribución prácticamente lineal de temperaturas junto al contorno hasta alcanzar la temperatura ambiente del aire T_a .

Así, aplicando la fórmula de Fourier, el flujo térmico o cantidad de calor que fluye por unidad de tiempo perpendicularmente a la superficie S , según el eje z , es

$$\phi_c = -k \cdot S \cdot \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)_{z=0} \quad |1.3|$$

En esta expresión la derivada parcial de la temperatura con respecto a la variable z puede sustituirse por el cociente entre la diferencia de temperaturas, $T_s - T_a$, y el espesor de la capa límite, Δz . A su vez, el cociente entre la conductividad, k , y el espesor de la capa límite, Δz , represen

ta el coeficiente de transferencia de calor por convección h_c y así, la ecuación anterior se transforma en una relación que da lugar a la ley de enfriamiento de Newton.

$$\Phi_c = h_c \cdot S (T_s - T_a) \quad |1.4|$$

El coeficiente de transferencia de calor por convección es función de muchas variables tales como la velocidad del viento, rugosidad de la superficie, ... y su valor se determina, en general, experimentalmente o mediante fórmulas empíricas. Radolli y Green (87) han obtenido valores de h_c para situaciones particulares en función de los promedios mensuales de la velocidad del viento y de la temperatura. Otra aproximación al valor de h_c ha sido realizada por Kehlbeck (53), el cual parte de la hipótesis de que la velocidad del viento se encuentra relacionada con la temperatura del aire. Por otro lado, algunas fórmulas empíricas para la obtención del coeficiente de transferencia de calor por convección han sido propuestas por varios autores en diversas publicaciones (Zichner (97), CEB (22)).

Transferencia de calor por conducción

Además de las transferencias de calor por radiación y convección existentes entre las superficies de los puentes de hormigón y el entorno en el que se encuentran sumergidos, tiene lugar también entre ambos medios una transferencia de calor por conducción. Mediante dicho mecanismo la energía calorífica se trasmite de las moléculas con mayor energía cinética de traslación (mayor temperatura) a las moléculas con menor energía cinética (menor temperatura) sin que se produzca transferencia de masa.

Sin embargo, y como indica White en (94), el calor transferido únicamente por conducción es muy pequeño y difícil de cuantificar. Es por ello por lo que es bastante usual el admitir que la transferencia de calor por convección y conducción sea evaluada conjuntamente asumiendo un coeficiente de transfe

rencia de calor combinado el cual dependerá, fundamentalmente, de las variables que intervienen en el fenómeno de la convección: velocidad del viento, temperatura en superficie y temperatura ambiente del aire.

Con el objeto de simplificar posteriores procesos analíticos o numéricos a desarrollar cara a la obtención de distribuciones de temperaturas en puentes de hormigón, algunos autores han planteado la posibilidad de trabajar con un único coeficiente conjunto de transferencia de calor h que engloba los tres mecanismos principales de transferencia de calor. Ello es factible debido a que la ley de Stefan-Boltzmann (ecuación |1.2|), la cual gobierna el fenómeno de la transferencia de calor debido a radiación de onda larga, da lugar a una condición de contorno no lineal que puede ser reescrita en una forma cuasi-lineal

$$\Phi_r = h_r \cdot S \cdot (T_s - T_a) \quad |1.5|$$

siendo h_r el coeficiente de transferencia de calor por radiación.

$$h_r = e \cdot C_{SB} \cdot [(T_{abs_s}^2 + T_{abs_a}^2)] (T_{abs_s} + T_{abs_a}) \quad |1.6|$$

De esta forma, dicho coeficiente puede tratarse de manera similar al coeficiente de convección y conducción y, por consiguiente, los diferentes mecanismos de transferencia de calor pueden aglutinarse asumiendo un coeficiente de transferencia de calor global h

$$h = h_c + h_r \quad |1.7|$$

Kehlbeck obtiene valores del coeficiente h para diferentes superficies de puentes de hormigón, manteniéndolos constantes para todo el ciclo diario (53).

Un punto de interés concerniente al coeficiente global h , y así lo indica White en (94), es la enorme dispersión existente en los valores que, para dicho coeficiente, adoptan

diversos investigadores. Así, por ejemplo, Kehlbeck adopta un valor de $13 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$ para la superficie superior de un tablero de hormigón mientras que Emerson (34) utiliza, para la misma superficie, un valor de $23 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$ el cual corresponde a una velocidad del viento de 2.2 a 3.0 m/seg. Kehlbeck, para velocidades de viento similares a éstas, adopta valores de h comprendidos entre 15 y $19 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$. Existen también diferencias en los valores de h para velocidad de viento nula. Así, Emerson (34) adopta un valor de $19 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$ y sin embargo Kehlbeck (53) establece para dicho coeficiente el valor de $7.8 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$. Por otra parte, Hunt y Cooke (43) adoptan el valor de $11.3 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$; no obstante, Priestley y Thurston (82) indican que el valor adoptado por Hunt y Cooke es sensiblemente bajo y sugieren la idea de que los valores que se adopten para el coeficiente global de transferencia de calor deben ser obtenidos a partir de datos meteorológicos locales.

Como puede observarse en base a lo expuesto en el párrafo anterior, existen diferencias claras en la forma de cuantificar la energía calorífica que se transfiere entre ambos medios así como una gran dispersión entre los valores que sugieren diversos autores para los diferentes coeficientes de transferencia de calor. Ello, en general, es debido a que la mayoría de los estudios de investigación que se han llevado a cabo se centran en zonas geográficas locales a las cuales corresponden unas determinadas condiciones ambientales y climatológicas. Obviamente es difícil aunar la forma de abordar la cuantificación del fenómeno de la transferencia de calor; no obstante, en mi opinión, podría ser interesante el evaluar experimentalmente los coeficientes de transferencia e intentar correlacionar éstos con las condiciones de clima y ambiente existentes en determinadas zonas geográficas.

1.2.2.- Ecuación diferencial que rige el fenómeno de la conducción de calor en puentes de hormigón

En el apartado anterior se han expuesto y comentado los conceptos básicos relativos a los principales mecanismos de transferencia de calor existentes en puentes de hormigón.

Una vez han sido evaluados los parámetros externos que gobiernan el intercambio de energía calorífica en las superficies del puente, pueden obtenerse las pertinentes condiciones de contorno de convección y radiación para cualquier instante. Como resultado de tales mecanismos el puente desprende o absorbe energía calorífica transmitiéndose ésta hacia el seno de la masa de hormigón mediante su propia conducción térmica.

Aplicando el teorema de conservación de la energía a una superficie cerrada S que encierra un volumen V, el flujo de calor que sale de la misma en un dt debe ser igual al calor generado en su interior menos el acumulado por unidad de tiempo debido a la elevación de la temperatura.

$$\iint_S \vec{q} \cdot \vec{n} \cdot dS = \iiint_V \dot{q} \cdot dv - \iiint_V \rho \cdot c \cdot \frac{\partial T}{\partial t} dv \quad |1.8|$$

Operando se obtiene

$$\text{div}(-\kappa \cdot \text{grad } T) - \dot{q} + \rho \cdot c \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = 0 \quad |1.9|$$

que es la ecuación general de conducción del calor en medio anisótropo y régimen no estacionario.

El analizar teóricamente el comportamiento de los puentes de hormigón frente a efectos térmicos ambientales y el estudiar el fenómeno de la conducción de calor a través de la masa de hormigón conlleva, en general, el adoptar un conjunto de hipótesis que el material verifica de forma más o menos precisa (González (39)):

- Hipótesis de medio continuo
- Hipótesis de isotropía térmica
- Hipótesis de homogeneidad térmica
- Hipótesis de permanencia térmica

Hipótesis de medio continuo

Se acepta que un elemento hormigonado genérico (rebana da de un puente de hormigón de espesor d_s) es un medio continuo tanto desde el punto de vista mecánico como térmico.

Densidad: $\rho(x,y,z,t)$

Calor específico: $c(x,y,z,t)$

Conductividad térmica: $\kappa(x,y,z,t)$

Dada la simetría del tensor de conductividades térmicas, éste puede expresarse como matriz diagonal

$$\kappa(x,y,z,t) = \begin{bmatrix} k_1(x,y,z,t) & 0 & 0 \\ 0 & k_2(x,y,z,t) & 0 \\ 0 & 0 & k_3(x,y,z,t) \end{bmatrix} \quad | 1.10 |$$

donde $k_1(x,y,z,t)$, $k_2(x,y,z,t)$ y $k_3(x,y,z,t)$ son las conductividades principales.

Hipótesis de isotropía térmica

El campo tensorial de conductividades térmicas es isotropo y por consiguiente las conductividades principales son idénticas.

$$\kappa(x,y,z,t) = \begin{bmatrix} k(x,y,z,t) & 0 & 0 \\ 0 & k(x,y,z,t) & 0 \\ 0 & 0 & k(x,y,z,t) \end{bmatrix} \quad | 1.11 |$$

Hipótesis de homogeneidad térmica

La densidad y las propiedades térmicas que entran en juego en la ecuación general de la conducción del calor -calor específico y conductividad térmica- son funciones de la temperatura para cualquier sólido. Dado que el campo térmico existente en un elemento hormigonado no es constante, es difícil aceptar que los valores de la densidad y de las propiedades térmicas sean independientes del punto considerado. No obstante, el rango de temperaturas al que se ven afectados los puentes de hormigón es pequeño ya que éstos no se ven sometidos súbitamente al efecto de altas o bajas temperaturas sino más bien a un régimen de temperaturas transitorio procedente de las variaciones suaves y no bruscas de las variables y parámetros climatológicos y ambientales del entorno en el que se encuentran ubicados. Por ello, la variación de las propiedades térmicas y de la densidad es pequeña y puede, en consecuencia, adoptarse la hipótesis de homogeneidad térmica.

Densidad: $\rho(t)$

Calor específico: $c(t)$

Conductividad térmica: $\kappa(t)$

$$\kappa(t) = \begin{bmatrix} k(t) & 0 & 0 \\ 0 & k(t) & 0 \\ 0 & 0 & k(t) \end{bmatrix} \quad |1.12|$$

Hipótesis de permanencia térmica

Esta hipótesis establece que las funciones que definen las propiedades térmicas y la densidad son independientes del tiempo.

En general, es posible adoptar tal hipótesis ya que los estudios y análisis térmicos en secciones de puentes de hormigón se concentran en períodos temporales relativamente pequeños, en los cuales pueden considerarse unos valores medios adecuados de dichas propiedades.

Por consiguiente, el conjunto de hipótesis establecidas para el estudio térmico de los puentes de hormigón conduce hacia la siguiente definición de la densidad y de las propiedades térmicas del material:

Densidad: ρ , campo escalar constante

Calor específico: c , campo escalar constante

Conductividad térmica: κ , campo tensorial de 2º orden isótropo y constante

$$\kappa = \begin{bmatrix} k & 0 & 0 \\ 0 & k & 0 \\ 0 & 0 & k \end{bmatrix} \quad |1.13|$$

Estas hipótesis, adoptadas por la mayoría de los investigadores que han estudiado y analizado el comportamiento de los puentes de hormigón frente a efectos térmicos ambientales (Elbadry (33), Emerson (34), Priestley (34), Zichner (97)), hacen que la ecuación general de conducción del calor se transforme en la ecuación general de Fourier

$$\nabla^2 T + \frac{\dot{q}}{k} = \frac{\rho \cdot c}{k} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \quad |1.14|$$

siendo \dot{q} la generación de calor interna que tiene lugar en el seno de la masa de hormigón. En el caso particular de los puentes de hormigón, dicha generación de calor es, únicamente, debida a la reacción exotérmica que ocurre en el interior de la masa de hormigón durante el proceso de fraguado.

Una vez finalizado éste (en hormigones ordinarios, a los siete días se ha desprendido aproximadamente el ochenta por ciento del calor total), no existe generación interna de calor y la ecuación general de Fourier se transforma entonces en

$$\nabla^2 T = \frac{\rho \cdot c}{k} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \quad |1.15|$$

ecuación diferencial ésta que gobierna el fenómeno de la conducción de calor en un medio continuo, homogéneo e isótropo

-puente de hormigón- en donde la variable temperatura T es función del punto considerado y del tiempo t .

1.2.3.- Propiedades térmicas del hormigón

Al ser el hormigón un compuesto dosificado formado por un conglomerante hidráulico, áridos y agua, y aditivos en algunos casos, serán las características térmicas de dichos constituyentes las que regirán, de alguna forma, el comportamiento térmico del material hormigón.

Un análisis ponderado de un hormigón corriente da como resultado el que el árido suponga alrededor de un 80% en peso; es lógico pensar, pues, que las características térmicas de los áridos configuren, en gran medida, las características térmicas del hormigón endurecido (Arredondo (8)).

Al provenir los áridos de la fragmentación de las rocas, y éstas tener una determinada composición mineralógica, las características térmicas de los áridos variarán con esa determinada composición.

Para estructuras de puentes de hormigón, más o menos convencionales, el criterio de elección de los áridos no debe basarse en criterios de origen térmico. No obstante, si la obra de hormigón es de un gran volumen, a causa de la reacción exotérmica de hidratación sí sería conveniente seleccionar el árido de tal forma que éste diera origen a un hormigón con alta difusividad (ello en mi opinión, es aplicable con mayor razón a estructuras de presas que no a puentes, en los que, con cantos importantes, los aligeramientos son de un volumen considerable).

En lo que respecta a este tema, las rocas que dan los valores más altos de difusividad y de conductividad térmica son las cuarcitas mientras que las que dan valores más bajos

de ambas propiedades son las rocas basálticas. Las calizas y granitos ocupan una posición intermedia (Arredondo (8), Neville (73)).

Otra cuestión a tener en cuenta, referente a los áridos, es la diferencia existente entre los valores de los coeficientes de dilatación de las diversas partículas minerales que constituyen las rocas de las que provienen los áridos. Ello, frente a cambios térmicos, genera tensiones internas que, en algún caso, podrían dañar la microestructura del hormigón. Un fenómeno similar podría tener lugar entre los propios áridos y la pasta de cemento que los rodea. No obstante, dicha variación en el valor de los coeficientes de dilatación de áridos y pasta de cemento no debe preocuparnos siempre que estemos en presencia de un rango normal de temperaturas del hormigón (4°C-60°C) (Neville (73)).

El coeficiente de dilatación térmica de los áridos varía con el tipo de roca-madre. A continuación, en la tabla 1.1 se muestran los valores de los coeficientes de dilatación correspondientes a diversos tipos de roca.

Tipo de roca	Coefficiente de dilatación térmica ($\times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$)
caliza	0.9 - 12.2
mármol	1.1 - 16.0
granito	1.8 - 11.9
basalto	3.6 - 9.7
diorita	4.1 - 10.3
dolomita	6.7 - 8.6

Tabla 1.1.- Valores del coeficiente de dilatación térmica para diversos tipos de roca (Rhoades y Mielenz (90)).

La mayoría de los áridos posee un coeficiente de dilatación que varía, aproximadamente, entre $5 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ y $13 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ mientras que la pasta de cemento Portland hidratado tiene un coeficiente que varía entre $11 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ y $16 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ (éste último puede alcanzar valores superiores a medida que aumenta el grado de saturación). Así pues, una diferencia relativamente importante entre los valores de los coeficientes de dilatación de áridos y pasta de cemento, la cual podría causar daños en la microestructura del material al someter éste a variaciones térmicas, sólo ocurriría cuando estuviésemos en presencia de áridos de baja expansión térmica (calizas, mármoles, granitos).

Los aditivos pueden ser el cuarto componente del material hormigón. Los tipos de aditivos relacionados con el comportamiento térmico del hormigón son los que actúan sobre éste modificando su velocidad de fraguado y de endurecimiento; de ahí que la influencia de los aditivos sobre las distribuciones de temperaturas en puentes de hormigón sea apreciable, fundamentalmente, en primeras edades.

Una vez expuestas las características térmicas más relevantes de los diferentes constituyentes del hormigón, se revisan, a continuación, las propiedades térmicas de dicho material que gobiernan el flujo de calor en puentes de hormigón y el comportamiento tenso-deformacional de éstos frente a la actuación de acciones térmicas ambientales.

Dichas propiedades son, básicamente, las siguientes:

- Conductividad térmica, k
- Calor específico, c
- Difusividad térmica, K
- Coeficiente de dilatación térmica, α

Conductividad térmica

Es la propiedad que mide la capacidad de conducción de calor del hormigón y viene definida por la relación existente entre un flujo de calor y el gradiente térmico necesario para que exista dicho flujo.

La conductividad de un hormigón ordinario depende de su composición y cuando el hormigón se encuentra saturado la conductividad varía entre 1.3 y 3.6 $J/m^2 \cdot seg. ^\circ C/m$ ($W/m \cdot ^\circ C$) (Neville (73)).

Ya se ha comentado con anterioridad que el carácter mineralógico de los áridos afecta considerablemente al valor que adopta la conductividad del hormigón, siendo las cuarcitas las que exhiben un valor más alto de ésta, el cual depende además de la relación existente entre la dirección del flujo calorífico y la orientación cristalina de los áridos.

Por otra parte, un factor primordial que influye en la conductividad del hormigón es el grado de saturación de éste ya que la conductividad del aire es más baja que la del agua. No obstante, una dificultad frecuente que se presenta en la práctica es la de conocer el verdadero contenido de humedad del hormigón. Loudon y Stacy (60), en un estudio llevado a cabo por ambos para analizar y evaluar las propiedades acústicas y térmicas de los hormigones ligeros y ordinarios, adoptan como valores típicos, para un hormigón corriente, unos contenidos volumétricos de humedad del 5% en el caso de que se encuentre expuesto a la intemperie y de un 2.5% en el caso de que se encuentre protegido de ésta (tales relaciones vienen definidas por el cociente entre el volumen de agua que ocupa la red porosa del hormigón y el volumen total de hormigón). En base a dichos porcentajes y en función de la densidad del hormigón, los autores sugieren la utilización de los valores de las conductividades térmicas que se muestran a continuación, en la tabla 1.2.

Peso unitario (kg/m ³)	Conductividad (W/m °C)	
	Hormigón no expuesto a la intemperie	Hormigón expuesto a la intemperie
1600	0.706	0.808
1760	0.838	0.952
1920	1.056	1.194
2080	1.315	1.488
2240	1.696	1.904
2400	2.267	2.561

Tabla 1.2.- Valores de la conductividad térmica para un hormigón con árido de peso normal (Loudon y Stacy (60)).

La conductividad del hormigón se ve muy poco afectada por el valor de la temperatura siempre que ésta varíe dentro del rango correspondiente a temperaturas ambientes. Es por ello por lo que todos los investigadores que han analizado el comportamiento de las estructuras de puentes de hormigón frente a solicitaciones térmicas ambientales han adoptado un valor constante de la conductividad para sus estudios a nivel sección (obtención de distribuciones de temperaturas y de estados tensionales).

En la tabla 1.3 se recogen valores de la conductividad térmica sugeridos y utilizados por diversos investigadores en el estudio de puentes de hormigón sometidos a efectos térmicos ambientales.

En dicha tabla se observa que, en general, todos los autores que han llevado a cabo estudios teóricos y prácticos sobre la influencia de los efectos térmicos ambientales en el comportamiento de puentes de hormigón adoptan valores que se mueven en torno a un valor promedio de 1.50 W/m °C.

Autores	Conductividad térmica (W/m °C)
Emerson (34), (37)	1.40
Polivka, Wilson (79)	1.70
Bresler, Iding (17)	1.70
Kalevras (52)	1.40
Zichner (97)	1.60
Dilger et alt (28)	1.50
Elbadry, Ghali (33), (32)	1.50

Tabla 1.3.- Valores de la conductividad térmica del hormigón adoptados por diversos autores en estudios paramétricos teóricos.

Calor específico

El calor específico, que representa la capacidad calorífica del material, se ve poco afectado por el carácter mineralógico del árido pero aumenta considerablemente con un incremento en el contenido de humedad en el hormigón. Por otra parte, el calor específico aumenta ligeramente a medida que aumenta la temperatura o disminuye la densidad del hormigón.

Debido al hecho de que el régimen de temperaturas al que se ve sometido el hormigón en este estudio es el correspondiente a un régimen de temperaturas ambiente normal, la variación del calor específico, para hormigones ordinarios, es relativamente pequeña. Neville (73) señala que el rango de dicha variación oscila entre 840 y 1170 J/Kg °C.

En la tabla 1.4 se muestran valores del calor específico adoptados por diversos autores en el estudio de puentes de hormigón sometidos a efectos térmicos ambientales.

Autores	Calor específico (J/Kg °C)
Emerson (34), (37)	960.0
Polivka, Wilson (79)	920.0
Bresler, Iding (17)	1135.0
Zichner (97)	920.0
Dilger et al (28)	960.0
Elbadry, Ghali (33), (32)	960.0

Tabla 1.4.- Valores del calor específico, para hormigones ordinarios, adoptados por diversos autores en estudios teóricos.

Difusividad térmica

Esta propiedad representa o da una idea de la velocidad a la cual tienen lugar cambios de temperatura en el seno de la masa de hormigón. Es, por consiguiente, un índice de la facilidad con la que el hormigón puede experimentar cambios de temperatura.

La difusividad, K , se encuentra relacionada con la conductividad, k , mediante la ecuación

$$K = \frac{k}{\rho \cdot c} \quad |1.17|$$

siendo ρ el peso específico y c el calor específico del hormigón.

Al tener el calor específico y el peso específico, en hormigones ordinarios, rangos de variación relativamente pequeños, el rango de variación de la difusividad térmica del hormigón viene determinado, fundamentalmente, por los valores que adopta la conductividad en función, primordialmente, del tipo de árido utilizado. Los basaltos muestran los valores más bajos de difusividad mientras que las cuarcitas evidencian los más altos; los granitos y las calizas ocupan una posición intermedia en la escala de valores de dicha propiedad.

La medida de la difusividad consiste, esencialmente, en determinar la relación entre el tiempo y la diferencia de temperaturas existente entre la superficie exterior y el interior de un espécimen de hormigón que, inicialmente, se encuentra a temperatura constante y, posteriormente, se somete a un cambio de temperatura en la superficie.

Como ya se ha comentado con anterioridad, uno de los factores que influye de forma determinante en el valor que adopta la conductividad térmica y, por lo tanto, también en el que adopta la difusividad térmica del hormigón es el contenido de humedad de éste. Debido a ello, en el caso de llevar a cabo medidas experimentales de difusividad éstas deben realizarse sobre especímenes de hormigón con un contenido de humedad igual al que existirá en la estructura real.

El rango de valores típicos de la difusividad térmica para hormigones ordinarios, señala Neville en (73), se encuentra entre 0.002 y 0.006 m²/hora, dependiendo del tipo de árido utilizado.

De los valores adoptados por esta propiedad térmica se desprende que el hormigón es un material que posee una gran inercia térmica y ello hace que, en consecuencia, las distribuciones de temperaturas generadas a causa de la actuación de acciones térmicas ambientales en el interior de cualquier elemento estructural y en concreto, en los puentes de hormigón, sean distribuciones no lineales. Lógicamente, cuanto mayor sea el valor de la difusividad térmica del hormigón, mayor será el flujo térmico en el interior del elemento y, por consiguiente, las distribuciones de temperaturas se aproximarán más a distribuciones de tipo lineal.

Para dar una mejor idea de la elevada inercia térmica del material hormigón, baste decir que, mientras el acero (0.1% C) y el hierro presentan una difusividad de 0.12 m²/hora y el aire una de 0.187 m²/hora, el hormigón posee, en término

medio y dependiendo de su composición, una difusividad térmica de $0.0042 \text{ m}^2/\text{hora}$ (es decir, unas cincuenta veces más baja que la del aire aproximadamente). De las sustancias que se presentan con mayor frecuencia en la naturaleza solamente el agua y algunos tipos de terreno poseen difusividades más bajas que la del hormigón (Carslaw y Jaeger (19)).

Hasta este punto se han expuesto algunas ideas básicas sobre los valores que adoptan las propiedades térmicas del hormigón que influyen en el fenómeno de la conducción de calor en puentes de hormigón. Así, bajo unas determinadas condiciones iniciales y de contorno y conocidas las magnitudes de dichas propiedades térmicas y de la densidad del material es posible resolver la ecuación diferencial de transmisión de calor y obtener las distribuciones de temperaturas que aparecen en secciones transversales de puentes de hormigón a lo largo del tiempo.

A partir de este punto y obtenidas tales distribuciones, es necesario evaluar su influencia sobre el comportamiento tenso-deformacional de los elementos estructurales que conforman la tipología global de un puente genérico de hormigón armado u hormigón pretensado.

Coefficiente de dilatación térmica

Es precisamente esta propiedad la que relaciona los cambios de temperatura que tienen lugar en el seno de la masa de los puentes de hormigón con los efectos tensionales y deformacionales que aparecen en ellos.

El hormigón posee un coeficiente positivo de dilatación térmica, como la mayoría de los materiales utilizados en ingeniería y construcción, pero su valor depende fundamentalmente de la composición de la mezcla y de su estado higrométrico en el instante en el que la temperatura cambia.

La influencia de las proporciones de la mezcla surge del hecho de que los dos principales constituyentes del hormigón, la pasta de cemento y los áridos, tienen diferentes coeficientes de expansión y así, el coeficiente de dilatación térmica para el hormigón, se obtiene como una resultante de ambos valores. Como ya se ha comentado con anterioridad el coeficiente de dilatación térmica de la pasta de cemento varía, aproximadamente, entre 11×10^{-6} y $16 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ y es más alto que el coeficiente de los áridos. Así, en términos generales, el coeficiente de dilatación térmica del hormigón es función de la cantidad de árido existente en la mezcla (tabla 1.5) y del propio coeficiente del árido.

Relación cemento/árido	Coeficiente de dilatación térmica a la edad de 2 años ($^\circ\text{C}^{-1}$)
cemento neto	18.5×10^{-6}
1:1	13.5×10^{-6}
1:3	11.2×10^{-6}
1:6	10.1×10^{-6}

Tabla 1.5.- Influencia del contenido de áridos en el coeficiente de dilatación térmica (Meyers (66)).

La influencia del coeficiente del árido se aprecia en la figura 1.4, en la cual pueden observarse las gráficas que, aproximadamente, proporcionan el valor del coeficiente de dilatación térmica del hormigón en función del coeficiente del propio árido y del tipo de curado.

La importancia de la diferencia existente entre los valores de los coeficientes de dilatación de los áridos y de la pasta de cemento ha sido ya discutida anteriormente. En lo que se refiere al contenido de humedad, éste únicamente concierne a la pasta de cemento y es debido al hecho de que el coeficiente de dilatación térmica viene definido por dos mecanismos:

el verdadero coeficiente térmico cinético y la presión de hinchamiento. Este último efecto viene originado por un decremento en la tensión capilar del agua sostenida por la pasta cuando aparece un incremento de temperatura. Así pues, el hinchamiento no es posible cuando el espécimen no contiene agua o está totalmente saturado y, por lo tanto, para estas dos situaciones determinadas, el coeficiente de dilatación térmica es más bajo que cuando la pasta se encuentra en un estado parcialmente saturado.

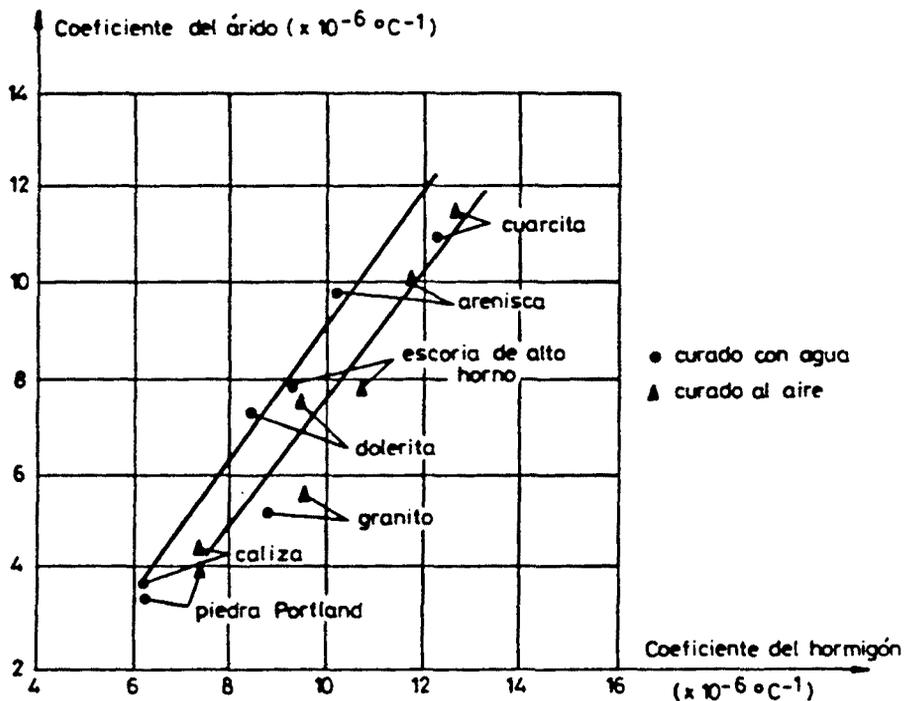


Fig. 1.4.- Influencia del coeficiente de dilatación térmica del árido sobre el coeficiente de dilatación térmica de un hormigón con relación cemento/áridos 1:6 (Bonnell y Harper (14)).

A pesar de la existencia de un cierto rango de variación en los valores que adopta el coeficiente de dilatación térmica del hormigón en función de diversos factores, dicho rango no es amplio y la normativa vigente, tanto de ámbito nacional como internacional, utiliza, para dicha propiedad valores muy similares. La tabla 1.8 muestra algunos de ellos así como los adoptados por diversos autores en estudios experimentales y teóricos.

Normativa y autores	Coef. dilatación térmica ($^{\circ}\text{C}^{-1}$)
CEB-FIP (21)	10×10^{-6}
ACI 343R-77 (2)	10.8×10^{-6}
EH-82, EP-80 (31), (38)	10×10^{-6}
BAEL 83, BPEL 83 (11), (16)	10×10^{-6}
AASHTO (1)	10.8×10^{-6}
Martin (63)	10×10^{-6}
Elbadry, Ghali (33), (32)	8×10^{-6}
Hoffman et alt (42)	10×10^{-6}
Pajuhesh (75)	9×10^{-6}
Thurston, Priestley (93)	10×10^{-6}
Dilger et alt (28)	8×10^{-6}
Zichner (97)	10×10^{-6}

Tabla 1.6.- Valores del coeficiente de dilatación térmica del hormigón que adoptan diversas normativas y autores.

Como puede observarse en dicha tabla, la dispersión de valores del coeficiente de dilatación térmica es prácticamente insignificante. Así, para unas condiciones "normales" de dosificación e higrometría del material y de medio ambiente -temperatura y humedad, primordialmente- parece lógico adoptar para tal coeficiente un valor promedio en dimensionamiento que, como indican la mayoría de las normativas vigentes, es $10 \times 10^{-6} \text{ } ^{\circ}\text{C}^{-1}$ ((21), (31), (11)).

1.3.- ESTUDIO A NIVEL SECCIONAL. DISTRIBUCIONES DE TEMPERATURAS Y ESTADOS TENSIONALES ASOCIADOS

1.3.1.- Determinación de la distribución de temperaturas en puentes de hormigón

Conocidos los mecanismos de transferencia de calor que gobiernan el intercambio de energía calorífica existente en los contornos y superficies externas de los puentes de hormigón y las propiedades térmicas de éste, las cuales rigen, en cierta medida, la conducción del calor a través de su masa, es posible afrontar la resolución de la ecuación diferencial |1.15|. Para ello deben imponerse, previamente, las oportunas condiciones de contorno del problema.

1.3.1.1.- Condiciones inicial y de contorno

Como se ha visto con anterioridad en el apartado 1.2.2, la ecuación de conducción del calor es una ecuación en derivadas parciales que, en general, depende de tres variables espaciales y una variable temporal. Se supondrá, en cualquier caso, que la ecuación es continua respecto a las cuatro variables y diferenciable de segundo orden respecto a las variables espaciales y de primer orden respecto a la variable temporal.

Condición inicial

Tal condición viene definida por el conocimiento de la temperatura en todo el dominio de integración de la ecuación diferencial para un instante determinado, instante éste que se adoptará como origen de tiempos.

$$T(x,y,z,0)=f(x,y,z) \quad |1.18|$$

Si la función dada es conocida, la solución del problema tenderá al valor dado cuando t tienda a cero.

$$\lim_{t \rightarrow 0} T(x, y, z, t) = f(x, y, z) \quad |1.19|$$

Condiciones de contorno

Estas condiciones representan los diferentes mecanismos básicos de transferencia de calor entre un sólido y el medio que le rodea (vacío, fluidos, ...).

Desde un punto de vista matemático, tales condiciones se suelen concretar en tres tipos fundamentales, las cuales se describen a continuación (Cruces (26)):

- Condición de Dirichlet: Se supone conocida para todo instante t la temperatura T en cualquier punto P de la superficie.

$$\forall t, T(x, y, z, t) = f(x, y, z, t) \quad \forall P \in S \quad |1.20|$$

- Condición de Neumann: El flujo de calor a través de la superficie exterior S del dominio es conocido para todo punto P y para cualquier instante t . Ello implica, matemáticamente, la obtención de la derivada de la función de temperaturas con respecto a la normal al sólido.

$$d\phi = \vec{q} \cdot d\vec{S} = \vec{q} \cdot \vec{n} \cdot dS = -\text{grad } T \cdot \vec{n} \cdot dS = -\frac{\partial T}{\partial n} dS \quad |1.21|$$

$$\forall t, -\frac{\partial T}{\partial n} = f(x, y, z, t) \quad \forall P \in S \quad |1.22|$$

Un caso particular de dicha condición es la de imponer que dicho flujo es nulo en todo instante (superficie adiabática o aislada térmicamente).

- Condición de Fourier: Es una condición mixta de las dos anteriores. No se fija ni la temperatura ni el flujo en la superficie que limita el dominio sino que se establece una relación entre ambos que verifica la siguiente condición:

$$\forall t, \quad \frac{\partial T}{\partial n} + a \cdot T = b \quad \forall P \in S \quad |1.23|$$

En dicha relación a es una función arbitraria del punto P no negativa ni idénticamente nula (Cruces (26)).

En el estudio de los puentes de hormigón sometidos a la actuación de acciones térmicas ambientales las condiciones de contorno pueden explicitarse algo más. Así, en un principio, las condiciones de Dirichlet y de Fourier no suelen aparecer en este tipo de problemas y sí debe imponerse la condición de Neumann |1.22| de flujo prescrito en la superficie del dominio. Dicho flujo viene definido por la existencia simultánea de los principales mecanismos de transferencia de calor en puentes de hormigón que son la radiación y la convección.

Así, resulta que la condición de contorno asociada a la ecuación diferencial |1.15| puede expresarse matemáticamente mediante la siguiente relación:

$$k \left(\frac{\partial T(x,y,z,t)}{\partial x} n_x + \frac{\partial T(x,y,z,t)}{\partial y} n_y + \frac{\partial T(x,y,z,t)}{\partial z} n_z \right) + q(x,y,z,t) = 0 \quad |1.24|$$

En esta última ecuación n_x , n_y y n_z son los cosenos directores del vector normal unitario exterior a la superficie de contorno y q es el calor ganado o perdido por unidad de área en el contorno.

El valor de la energía calorífica transferida q en las superficies externas de un puente de hormigón es, en general, suma de las energías debidas a radiación solar, convección y re-radiación.

$$q(x,y,z,t) = q_s(x,y,z,t) + q_c(x,y,z,t) + q_r(x,y,z,t) \quad |1.25|$$

El calor ganado debido a radiación solar (radiación de onda corta) puede expresarse mediante la relación

$$q_s(x,y,z,t) = a \cdot I(x,y,z,t) \quad |1.26|$$

en la cual $I(x,y,z,t)$ es la radiación solar total incidente sobre cualquier punto de la superficie en el instante t , la cual depende del ángulo de incidencia de los rayos solares y el coeficiente a , adimensional, es el factor de absorción de radiación solar. Lógicamente, en superficies en sombra debe imponerse que la intensidad de radiación solar incidente sea nula.

El calor perdido o ganado en la superficie por convección como resultado de la diferencia de temperaturas existente entre la superficie expuesta y el aire viene determinado por la ley de enfriamiento de Newton |1.4|.

$$q_c(x,y,z,t) = h_c(T(x,y,z,t) - T_a(t)) \quad |1.27|$$

En dicha relación h_c es el coeficiente de transferencia de calor por convección, $T(x,y,z,t)$ es la temperatura en el instante t del punto cuyas coordenadas espaciales son x , y y z y $T_a(t)$ es la temperatura ambiente en ese mismo instante.

El calor transferido entre la superficie expuesta del puente de hormigón y el entorno que le rodea debido a re-radiación térmica (radiación de onda larga) puede modelizarse a través de la ley de Stefan-Boltzmann |1.2|.

Escrita ésta en forma cuasi-lineal se obtiene

$$q_r(x,y,z,t) = h_r(x,y,z,t) \cdot (T(x,y,z,t) - T_a(t)) \quad |1.28|$$

en la cual h_r , coeficiente de transferencia de calor por radiación, depende de la temperatura existente en la superficie y viene definido por la siguiente relación

$$h_r(x,y,z,t) = C_{SB} \cdot e \cdot [(T(x,y,z,t) + T^*)^2 + (T_a(t) + T^*)^2] \cdot (T(x,y,z,t) + T_a(t) + 2T^*) \quad |1.29|$$

En ella C_{SB} es la constante de Stefan-Boltzmann, e es el factor de emisividad de la superficie y T^* es una constante que permite pasar de grados Celsius a grados Kelvin.

En resumen, la condición de contorno a imponer en superficies de puentes de hormigón puede expresarse mediante la siguiente ecuación

$$k \left(\frac{\partial T(x,y,z,t)}{\partial x} n_x + \frac{\partial T(x,y,z,t)}{\partial y} n_y + \frac{\partial T(x,y,z,t)}{\partial z} n_z \right) + a \cdot I(x,y,z,t) + h_c(T(x,y,z,t) - T_a(t)) + h_r(T(x,y,z,t) - T_a(t)) = 0 \quad |1.30|$$

Por consiguiente, conocidas ya las condiciones inicial y de contorno, es posible afrontar la resolución de la ecuación diferencial que gobierna el fenómeno de la transmisión de calor en puentes de hormigón.

1.3.1.2.- Revisión de los métodos utilizados para la resolución de la ecuación de flujo del calor

La ecuación diferencial |1.15| es susceptible de ser resuelta mediante la utilización de técnicas matemáticas que proporcionen soluciones exactas o mediante la utilización de técnicas analíticas o numéricas que proporcionen soluciones aproximadas a la solución verdadera. En cualquier caso, la obtención de dichas soluciones permitirá conocer la temperatura en cualquier punto del dominio analizado y para cualquier instante determinado.

1.3.1.2.1.- Métodos exactos

El desarrollo de las soluciones de la ecuación del flujo de calor se inició con Fourier quien resolvió algunos problemas concretos e introdujo un método de análisis posteriormente conocido como desarrollo en series de Fourier.

Desde entonces se han obtenido soluciones para diferentes dominios unidimensionales, bidimensionales y tridimensionales sometidos a una gran variedad de condiciones de contorno. Una referencia clásica y obligada en lo que se refiere a la física del calor y, en la que se recogen soluciones exactas a numerosos problemas de conducción de calor en sólidos (rectángulos, cilindros, esferas, sólidos infinitos y semiinfinitos limitados por planos paralelos) es la de Carslaw y Jaeger (19). Estos utilizan métodos que varían desde técnicas simples como la separación de variables, a técnicas más complejas como son la transformada de Laplace, la función de Green o la transformación integral de Fourier.

No obstante, es obvio, y así lo indican los mismos autores que las soluciones exactas disponibles de la ecuación diferencial del calor se encuentran limitadas a la resolución de problemas lineales sobre dominios de formas muy simples. Es por ello por lo que los métodos que proporcionan soluciones exactas no han sido utilizados para la resolución del problema de la transmisión de calor en puentes de hormigón.

1.3.1.2.2.- Métodos aproximados

La complejidad del contorno de algunas secciones transversales de puentes de hormigón, el hecho -ciertamente posible- de que los coeficientes de la ecuación del calor dependan de la propia temperatura, lo que conduciría a una ecuación de tipo no lineal, la dificultad de manejar analíticamente condiciones de contorno debidas a fenómenos físicos comple

jos como son la convección y la radiación y su variabilidad en el tiempo hacen que la forma idónea de abordar el problema sea la de emplear técnicas que conduzcan a soluciones aproximadas con un suficiente grado de precisión.

Aunque algunas técnicas analíticas, como el método variacional de Laplace (Loretan (59)) o el método integral (Goodman (40)), han sido utilizadas para la obtención de soluciones aproximadas al problema de la conducción de calor, son los métodos numéricos los que, actualmente, se emplean con mayor frecuencia. Tales métodos se han desarrollado con amplitud en las últimas décadas y permiten resolver una gran variedad de problemas de transferencia de calor y, en concreto, el de la transferencia y transmisión de energía calorífica en puentes de hormigón. De entre ellos, cabe destacar el método de los elementos finitos y el método de las diferencias finitas.

A continuación se da una visión muy sucinta y comparativa de los esquemas generales de resolución de la ecuación diferencial [1.15] que utilizan ambas técnicas.

El método de los elementos finitos

El inicio del desarrollo del método de los elementos finitos y su posterior aplicación a la resolución de problemas de la ingeniería civil acaece en la década de los sesenta. Fueron Zienkiewicz y Cheung (99) y Wilson (95) los que primeramente aplicaron dicho método a la resolución de problemas de transmisión de calor en sólidos. En ambas referencias se obtienen soluciones a problemas lineales en régimen estacionario. Posteriormente, Wilson y Nickell (96) extienden la solución a problemas lineales no estacionarios y ya en la década de los setenta son varias las referencias en las que se recogen soluciones aproximadas a problemas no lineales en régimen transitorio (Zienkiewicz (100), Polivka y Wilson (79)).

A continuación, se expone la metodología a seguir en la técnica de los elementos finitos cara a la obtención de una solución numérica aproximada del problema de la transmisión de calor en puentes de hormigón (dominio tridimensional)

El problema a resolver viene definido por las siguientes ecuaciones:

$$k \cdot \nabla^2 T - \rho c \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = 0 \quad \text{en } V \quad |1.31|$$

$$k \left(\frac{\partial T}{\partial n} \right) + q + h(T - T_a) = 0 \quad \text{en } S \quad |1.32|$$

Suponiendo que T sea la función aproximada a la verdadera función de temperaturas podemos expresar los residuos en la forma

$$r_v = k \cdot \nabla^2 T - \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad \text{en } V \quad |1.33|$$

$$r_s = k \left(\frac{\partial T}{\partial n} \right) + q + h(T - T_a) \quad \text{en } S \quad |1.34|$$

Aplicando el método de los residuos ponderados debe verificarse que

$$\int_V r_v \cdot v \cdot dV = 0 \quad |1.35|$$

$$\int_S r_s \cdot s \cdot dS = 0 \quad |1.36|$$

donde v y s son funciones arbitrarias escalares.

Sustituyendo las ecuaciones |1.33| y |1.34| en |1.35| y |1.36| respectivamente y sumando ambas integrales se obtiene que

$$\int_V v \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) \right] dV - \int_V v \left[\rho c \frac{\partial T}{\partial t} \right] dV + \int_S s \left[k \frac{\partial T}{\partial n} + q + h(T - T_a) \right] dS = 0 \quad |1.37|$$

Haciendo uso de la fórmula de Green que, en general, toma la forma

$$\int_V \phi \cdot \frac{\partial \psi}{\partial x_i} dV = - \int_V \frac{\partial \psi}{\partial x_i} \psi \cdot dV + \int_S \phi \cdot \psi \cdot \frac{\partial n}{\partial x_i} dS \quad \text{para } i=1\dots n \quad |1.38|$$

se obtiene, sustituyendo en la ecuación |1.37|, la siguiente expresión:

$$\begin{aligned} & - \int_V \left(\frac{\partial v}{\partial x} \cdot k \cdot \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \cdot k \cdot \frac{\partial T}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \cdot k \cdot \frac{\partial T}{\partial z} \right) dV + \\ & + \int_S v \left(k \cdot \frac{\partial T}{\partial x} n_x + k \cdot \frac{\partial T}{\partial y} n_y + k \cdot \frac{\partial T}{\partial z} n_z \right) dS - \\ & - \int_V v \left(\rho c \frac{\partial T}{\partial t} \right) dV + \int_S s \left[k \cdot \frac{\partial T}{\partial n} + q + h(T - T_a) \right] dS = 0 \quad |1.39| \end{aligned}$$

Teniendo en cuenta que la derivada de la función T con respecto a la normal viene definida por

$$\frac{\partial T}{\partial n} = \frac{\partial T}{\partial x} n_x + \frac{\partial T}{\partial y} n_y + \frac{\partial T}{\partial z} n_z \quad |1.40|$$

y haciendo

$$v = -s \quad |1.41|$$

sin pérdida de generalidad ya que ambas funciones son arbitrarias se obtiene

$$\int_V \left(\frac{\partial v}{\partial x} k \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} k \frac{\partial T}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} k \frac{\partial T}{\partial z} \right) dV + \int_V v \left(\rho c \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \right) dV + \int_S v \left[q + h(T - T_a) \right] dS = 0 \quad |1.42|$$

o lo que es lo mismo

$$\int_V \nabla^T v \cdot k \cdot \nabla T \cdot dV + \int_V v \left(\rho c \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \right) dV + \int_S v \left[q + h(T - T_a) \right] dS = 0 \quad |1.43|$$

En esta última ecuación el operador ∇ es

$$\nabla = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} \\ \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial z} \end{bmatrix}$$

La expresión |1.43| será la que se utilizará para la aplicación del método de los elementos finitos. Para ello el dominio total de integración se subdivide en una serie de subdominios definidos por n puntos y, a su vez, se definen las funciones de forma o de aproximación $N_i(x,y,z)$ las cuales permitirán obtener la temperatura en cualquier punto del subdominio en función de las temperaturas de los nodos que conforman tal subdominio (incógnitas nodales).

Así pues, aproximando la función T mediante la expresión

$$T = \sum_{i=1}^n N_i(x,y,z) \cdot T_i(t) \quad |1.44|$$

y aplicando el método de Galerkin

$$v = N_i(x,y,z) \quad |1.45|$$

se obtiene, sustituyendo en la expresión |1.43|, la siguiente relación:

$$\int_V \left[k \cdot \frac{\partial N_j}{\partial x} \left(\sum T_i \cdot \frac{\partial N_i}{\partial x} \right) + k \cdot \frac{\partial N_j}{\partial y} \left(\sum T_i \frac{\partial N_i}{\partial y} \right) + k \cdot \frac{\partial N_j}{\partial z} \left(\sum T_i \cdot \frac{\partial N_i}{\partial z} \right) \right] dV +$$

$$+ \int_V \left[\rho c \cdot N_j \left(\sum N_i \cdot \frac{\partial T_i}{\partial t} \right) \right] dV + \int_S \left[h \cdot N_j \left(\sum N_i \cdot T_i \right) \right] dS = - \int_S N_j (q - hT_a) dS \quad |1.46|$$

Esta puede expresarse en forma matricial mediante la siguiente ecuación

$$[C]^e \cdot \{\dot{T}\}^e + [K]^e \cdot \{T\}^e = \{f\}^e \quad |1.47|$$

en donde $[C]^e$ y $[K]^e$ representan respectivamente las matrices de capacidades caloríficas y de conductividades del subdominio

$$[C]^e = C_{ij}^e = \int_V \rho c N_i N_j dV \quad |1.48|$$

$$[K]^e = K_{ij}^e = \int_V k \left(\frac{\partial N_i}{\partial x} \cdot \frac{\partial N_j}{\partial x} + \frac{\partial N_i}{\partial y} \cdot \frac{\partial N_j}{\partial y} + \frac{\partial N_i}{\partial z} \cdot \frac{\partial N_j}{\partial z} \right) dV + \int_S h \cdot N_i N_j dS \quad |1.49|$$

Asimismo, los componentes del vector $\{T\}^e$ representan los valores de la temperatura en los nodos que definen el subdominio y las del vector $\{\dot{T}\}^e$ representan las derivadas temporales de la función temperatura en dichos nodos y el vector $\{f\}^e$ es el vector de cargas térmicas del subdominio considerado y que viene definido por la siguiente expresión

$$\{f\}^e = f_j^e = - \int_S N_j (q - hT_a) dS \quad |1.50|$$

La ecuación matricial |1.47| se aplica a todos los subdominios en los que hemos dividido el dominio V procediéndose posteriormente al ensamblaje de todas ellas con lo cual se obtiene

$$[C] \cdot \{\dot{T}\} + [K] \cdot \{T\} = \{f\} \quad |1.51|$$

ecuación que se extiende a la totalidad del dominio de integración V.

La ecuación |1.51| representa un sistema de ecuaciones diferenciales lineales que, en el problema de la transmisión de calor, posee un significado físico muy claro y es el de un balance calorífico para todos los nodos de todos los subdominios en que se ha discretizado el dominio V: el calor almacenado en elementos adyacentes a un nodo en cuestión más el calor que fluye de dichos elementos debe ser igual al calor externo que entra en dicho nodo.

La aplicación del método de los elementos finitos necesita la elección previa de los subdominios en los que se va a discretizar el continuo y de las funciones de aproximación. Aunque desde un punto de vista teórico pueden utilizarse una gran variedad de subdominios de tamaños y formas muy diversas, son los elementos triangulares y rectangulares los que se han utilizado con mayor frecuencia en aplicaciones prácticas para

estudios bidimensionales (Zienkiewicz (100)); existen, no obstante, estudios en los que los subdominios utilizados han sido elementos isoparamétricos (Polivka y Wilson (79)) o elementos paralelepípedicos, ampliación de los elementos bidimensionales cuadráticos de ocho nodos, para análisis tridimensionales (Albareda (5)). Sobre dicho tema no se va a incidir más remitiendo al lector a la diversa bibliografía existente.

Por último, cabe hablar ahora brevemente de la integración en el dominio tiempo. Como ya se ha expuesto con anterioridad, la expresión |1.51| representa un sistema de ecuaciones diferenciales lineales de primer orden. Dicho sistema es susceptible de ser resuelto mediante métodos matemáticos de cálculo diferencial; no obstante, cuando el número de ecuaciones es elevado, es conveniente discretizar el dominio tiempo mediante elementos finitos y prefijar unas ciertas funciones de interpolación o aproximación que indican, a priori, cómo evoluciona la función de temperaturas con la variable temporal.

Discretizando de la manera usual con respecto a dicha variable t puede escribirse

$$T = \sum_{i=1}^n N_i T_i \quad |1.52|$$

en donde T_i representa el conjunto de variables nodales, en este caso temperaturas, en el instante i y N_i son las funciones de forma que interpolan la variable temperatura en el tiempo. Dichas funciones serán como mínimo de primer grado puesto que en la ecuación |1.51| aparecen únicamente derivadas de primer orden.

Sea un elemento finito de tiempo de longitud Δt y sean T_n y T_{n+1} los valores de las temperaturas en todos los nodos del sistema en los instantes n y $n+1$ respectivamente y supóngase una distribución lineal de temperaturas en el tiempo (dicha hipótesis es la utilizada con mayor frecuencia en la resolución de problemas de transmisión de calor).

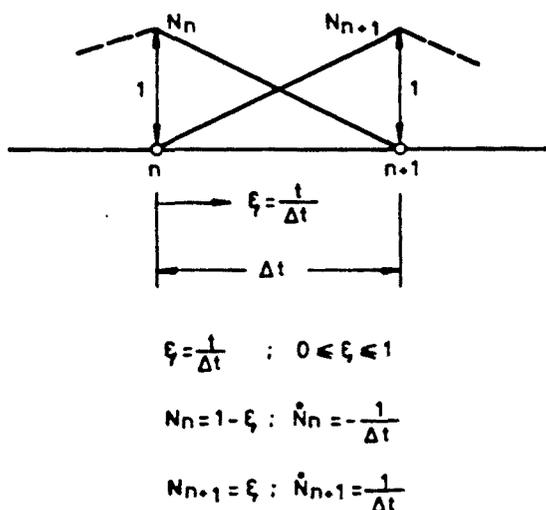


Fig. 1.5.- Funciones de forma lineales utilizadas para la integración en el dominio tiempo.

Aplicando el método de los residuos ponderados al elemento finito de tiempo de longitud Δt se tiene que

$$\int_0^1 w_j \left[[C] (\{T\}_n \dot{N}_n + \{T\}_{n+1} \dot{N}_{n+1}) + [K] (\{T\}_n N_n + \{T\}_{n+1} N_{n+1}) + \{f\} \right] d\xi = 0$$

(siendo $j=1$) | 1.53 |

Así, introduciendo las funciones de forma de la figura 1.5 en la ecuación | 1.53 |, se obtiene la fórmula de recurrencia que permite obtener los valores de $\{T\}_{n+1}$ a partir de los valores conocidos de $\{T\}_n$.

$$\left(\frac{1}{\Delta t} [C] + [K] \theta \right) \{T\}_{n+1} + \left(-\frac{1}{\Delta t} [C] + [K] (1-\theta) \right) \{T\}_n + \{f\}_{n+1} \theta + \{f\}_n (1-\theta) = 0$$

| 1.54 |

En ella $\theta = \frac{\int_0^1 w_j \cdot \xi \cdot d\xi}{\int_0^1 w_j \cdot d\xi}$

aplicándose al vector de cargas térmicas $\{f\}$ la misma interpolación que al vector de incógnitas nodales $\{T\}$.

A continuación, en la figura 1.6 se muestran diversas funciones de ponderación dependientes del valor del parámetro θ y que dan lugar a diversos esquemas recurrentes de integración en el tiempo.

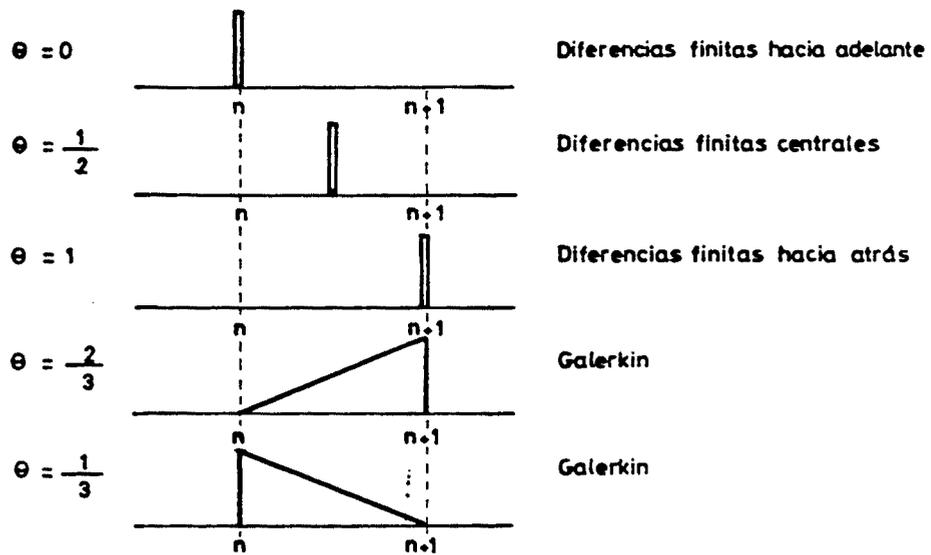


Fig. 1.6.- Funciones de ponderación para diversos esquemas recurrentes entre dos puntos.

En lo que precede se ha supuesto que el dominio de la aproximación corresponde a un tiempo Δt estableciéndose así fórmulas recurrentes entre dos vectores de incógnitas nodales consecutivos. No obstante, existen otros esquemas de integración en el tiempo dependiendo de la forma de aproximación de la función y del número de puntos (instantes de tiempo) utilizados en la interpolación (diferencias, Galerkin, Houbolt,...); algunos de ellos pueden encontrarse en Zienkiewicz (100).

Por otra parte, la integración paso a paso en el tiempo conduce inevitablemente a la necesidad de asegurar la estabilidad de la solución. Centrándonos en los esquemas recurrentes de dos puntos se observa que, si $\theta=0$ y $[C]$ es una matriz diagonal, cada componente del vector $\{T\}_{n+1}$ puede obtenerse directamente a partir del valor que adopta dicha componente en el instante anterior; de ahí que a dichos esquemas se les conozca con el nombre de explícitos mientras que aquéllos en los que se tiene que $\theta \neq 0$, los cuales necesitan de la resolución de un sistema de ecuaciones, se les conoce

con el nombre de esquemas implícitos. La ventaja de cálculo que posee a priori el esquema explícito puede verse disminuída ya que el incremento de tiempo a adoptar, cara a la obtención de una solución convergente y numéricamente estable, no debe superar un cierto valor, función éste del valor de θ y del valor propio máximo (esquemas condicionalmente estables).

Ello puede limitar, en algunos casos, el uso de esquemas explícitos; sin embargo, tal como indica Zienkiewicz en (100), la economía de cálculo que se obtiene al no tener que invertir la matriz compensa frecuentemente la necesidad de emplear muchos intervalos de tiempo pequeños. En mi opinión, este tipo de discretización es, por otra parte, de casi obligado cumplimiento en el estudio de los efectos térmicos ambientales en puentes de hormigón puesto que es de sumo interés el conocer cómo evolucionan las distribuciones de temperaturas a lo largo de cualquier día del año para, así, poder obtener posibles fórmulas de diseño de la acción térmica ambiental.

El método de las diferencias finitas

Aunque el método de los elementos finitos ha sido utilizado por diversos autores en el estudio de los efectos térmicos ambientales en puentes de hormigón (Elbadry, Ghali (33), Berwanger (13)), el método comúnmente empleado en tal estudio ha sido el de las diferencias finitas (Emerson (34) (37), Priestley (84), Hunt y Cooke (43), Dilger, Ghali et al (28), Kalevras (52), Zichner (97), CEB (22)).

A continuación, y de forma breve, se expone la metodología a seguir cara a la resolución de la ecuación diferencial de transmisión del calor en puentes de hormigón mediante el uso de esquemas en diferencias finitas.

Inicialmente el dominio de integración se discretiza mediante una malla paralelepípedica (caso tridimensional) en

cuyos nodos se evalúa la solución a la ecuación diferencial [1.15] que gobierna el fenómeno de la transmisión de calor en puentes de hormigón procediéndose, a continuación, a la aproximación de las derivadas parciales que aparecen en dicha ecuación mediante su respectiva expresión en diferencias finitas. Ello da lugar a un sistema de ecuaciones (o una ecuación) algebraicas y lineales si la ecuación diferencial es lineal.

Con el objeto de simplificar el posterior desarrollo matemático se adopta la hipótesis de que la función de temperaturas es bidimensional $T(x,y)$, sin que ello suponga pérdida de generalidad.

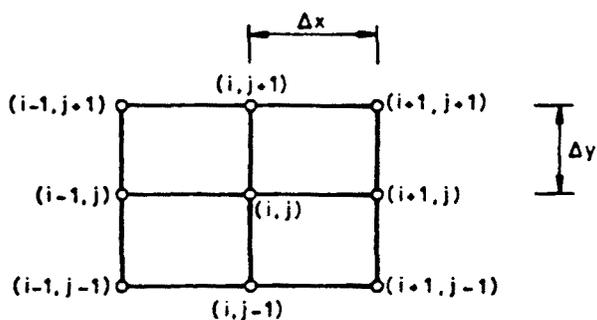


Fig. 1.7.- Malla de discretización de un elemento bidimensional.

La derivada espacial de la función de temperaturas en el nodo (i,j) (figura 1.7) con respecto a la variable x puede expresarse en función de los valores funcionales de los nodos $(i-1,j)$, (i,j) e $(i+1,j)$ mediante la siguiente relación

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \Big|_{i,j} &= \alpha T_{i,j} + \beta T_{i+1,j} + \gamma T_{i-1,j} = \alpha T_{i,j} + \beta \left[T_{i,j} + \Delta x \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{i,j} + \right. \\ &+ \frac{(\Delta x)^2}{2} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \Big|_{i,j} + O((\Delta x)^3) \left. \right] + \gamma \left[T_{i,j} - \Delta x \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{i,j} + \right. \\ &+ \frac{(\Delta x)^2}{2} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \Big|_{i,j} + O((\Delta x)^3) \left. \right] \quad [1.55] \end{aligned}$$

Igualando coeficientes

$$\begin{aligned} \alpha + \beta + \gamma &= 0 \\ (\Delta x) \beta - (\Delta x) \gamma &= 0 \\ \frac{(\Delta x)^2}{2} \beta + \frac{(\Delta x)^2}{2} \gamma &= 1 \end{aligned} \quad |1.56|$$

y resolviendo el sistema se obtienen los siguientes valores de α , β , γ

$$\alpha = -\frac{2}{(\Delta x)^2} \quad \beta = \frac{1}{(\Delta x)^2} \quad \gamma = \frac{1}{(\Delta x)^2} \quad |1.57|$$

Así resulta que

$$\left. \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right|_{i,j} = \frac{T_{i+1,j} - 2T_{i,j} + T_{i-1,j}}{(\Delta x)^2} \quad |1.58|$$

Igual desarrollo se lleva a cabo para la variable y , ob-
teniéndose que

$$\left. \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right|_{i,j} = \frac{T_{i,j+1} - 2T_{i,j} + T_{i,j-1}}{(\Delta y)^2} \quad |1.59|$$

Discretizando ahora con respecto a la variable tempo-
ral t la primera derivada resulta que

$$\left. \frac{\partial T}{\partial t} \right|_{i,j} = \frac{T_{i,j,\Delta t} - T_{i,j}}{\Delta t} \quad |1.60|$$

y sustituyendo |1.58|, |1.59| y |1.60| en la ecuación diferen-
cial de partida |1.15| se llega a la siguiente ecuación en di-
ferencias finitas

$$T_{i,j,\Delta t} = T_{i,j} + \frac{k}{\rho c} \frac{\Delta t}{(\Delta x)^2} \left[T_{i+1,j} - 2T_{i,j} + T_{i-1,j} + \frac{(\Delta x)^2}{(\Delta y)^2} (T_{i,j+1} - 2T_{i,j} + T_{i,j-1}) \right] \quad |1.61|$$

la cual permite obtener el valor de la temperatura en el nodo

(i,j) en el instante (t+Δt) en función de las temperaturas del nodo en cuestión y de sus adyacentes en el instante t.

Este esquema en diferencias finitas, correspondiente al método explícito de solución de ecuaciones diferenciales en derivadas parciales es una técnica sencilla de cálculo en la que los valores funcionales en el tiempo (t+Δt) se deducen de los valores funcionales en el tiempo t mediante operaciones aritméticas muy simples.

Como ya se ha comentado con anterioridad dicho método arrastra consigo una limitación cara a su utilidad práctica y es que la elección del incremento de tiempo a adoptar para llevar a cabo la integración en el dominio tiempo debe ser tal que se verifiquen las condiciones necesarias para asegurar la convergencia y estabilidad del método numérico.

Un método en diferencias finitas se dice que es estable cuando la solución de la ecuación en diferencias está acotada en cualquier tiempo t, al tender Δt a cero (Casteleiro (20)). Supongamos que en el instante inicial t=0 desarrollamos en serie de Fourier una cierta función inicial f(x,y). Un término típico del desarrollo será $e^{\phi(\beta x + \gamma y)}$ donde β y γ son constantes positivas y $\phi = \sqrt{-1}$. Al ir avanzando en el tiempo y suponiendo que pueda realizarse una separación de variables, dicho término se convertirá en $\psi(t) \cdot e^{\phi(\beta x + \gamma y)}$.

Llamando η al valor absoluto del cociente entre dos valores consecutivos de la función ψ(t)

$$\eta = \left| \frac{\psi(t+\Delta t)}{\psi(t)} \right| \quad |1.62|$$

es obvio que si $\eta \leq 1$, para todo β, γ y t, la amplificación del término del desarrollo de Fourier está acotada; se dirá entonces que el método es estable.

Así pues, sustituyendo $T_{i,j} = \psi(t) e^{\phi(\beta x + \gamma y)}$ y $T_{i,j,\Delta t} = \psi(t + \Delta t) e^{\phi(\beta x + \gamma y)}$ en la ecuación en diferencias |1.61| del método explícito se obtiene que

$$\begin{aligned} \psi(t + \Delta t) e^{\phi(\beta x + \gamma y)} = & \psi(t) e^{\phi(\beta x + \gamma y)} + \frac{k}{\rho c} \frac{\Delta t}{(\Delta x)^2} \psi(t) [e^{\phi(\beta(x + \Delta x) + \gamma y)} - \\ & - 2e^{\phi(\beta x + \gamma y)} + e^{\phi(\beta(x - \Delta x) + \gamma y)}] + \frac{k}{\rho c} \frac{\Delta t}{(\Delta y)^2} \psi(t) [e^{\phi(\beta x + \gamma(y + \Delta y))} - \\ & - 2e^{\phi(\beta x + \gamma y)} + e^{\phi(\beta x + \gamma(y - \Delta y))}] \end{aligned}$$

Dividiendo por $\psi(t) e^{\phi(\beta x + \gamma y)}$ y llamando a $\lambda_1 = \frac{k}{\rho c} \frac{\Delta t}{(\Delta x)^2}$ y a $\lambda_2 = \frac{k}{\rho c} \frac{\Delta t}{(\Delta y)^2}$ resulta que

$$\frac{\psi(t + \Delta t)}{\psi(t)} = 1 + \lambda_1 [e^{\phi \beta \Delta x} - 2 + e^{-\phi \beta \Delta x}] + \lambda_2 [e^{\phi \gamma \Delta y} - 2 + e^{-\phi \gamma \Delta y}]$$

Desarrollando las exponenciales en formas de cosenos y senos se llega a que

$$\begin{aligned} \frac{\psi(t + \Delta t)}{\psi(t)} = & 1 + \lambda_1 [\cos \beta \Delta x + i \operatorname{sen} \beta \Delta x - 2 + \cos \beta \Delta x - i \operatorname{sen} \beta \Delta x] + \\ & + \lambda_2 [\cos \gamma \Delta y + i \operatorname{sen} \gamma \Delta y - 2 + \cos \gamma \Delta y - i \operatorname{sen} \gamma \Delta y] \\ = & 1 + \lambda_1 [2 \cos \beta \Delta x - 2] + \lambda_2 [2 \cos \gamma \Delta y - 2] = \\ = & 1 + 2\lambda_1 [\cos \beta \Delta x - 1] + 2\lambda_2 [\cos \gamma \Delta y - 1] = \\ = & 1 + 2\lambda_1 [\cos^2 \frac{\beta \Delta x}{2} - \operatorname{sen}^2 \frac{\beta \Delta x}{2} - 1] + 2\lambda_2 [\cos^2 \frac{\gamma \Delta y}{2} - \operatorname{sen}^2 \frac{\gamma \Delta y}{2} - 1] \\ = & 1 - (4\lambda_1 \operatorname{sen}^2 \frac{\beta \Delta x}{2} + 4\lambda_2 \operatorname{sen}^2 \frac{\gamma \Delta y}{2}) \end{aligned}$$

Por consiguiente, el factor de amplificación es

$$\eta = |1 - (4\lambda_1 \cdot \operatorname{sen}^2 \frac{\beta \Delta x}{2} + 4\lambda_2 \cdot \operatorname{sen}^2 \frac{\gamma \Delta y}{2})| \quad |1.63|$$

Al ser β y γ constantes positivas cualesquiera los máximos valores que pueden adoptar los términos $\text{sen}^2 \frac{\beta \Delta x}{2}$ y $\text{sen}^2 \frac{\gamma \Delta y}{2}$ son la unidad.

Así, la condición necesaria y suficiente para que el módulo del factor de amplificación sea menor o igual que la unidad es la siguiente

$$\lambda_1 + \lambda_2 \leq \frac{1}{2}$$

Sustituyendo los valores de λ_1 y λ_2 se obtiene

$$K \cdot \frac{\Delta t}{\frac{(\Delta x)^2 \cdot (\Delta y)^2}{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2}} \leq \frac{1}{2} \quad |1.64|$$

siendo

$$K = \frac{k}{\rho c}$$

Dicha condición resulta ser la misma que la condición necesaria y suficiente para que la solución sea convergente; su obtención no se desarrollará aquí pudiéndose encontrar ésta en la bibliografía (Isaacson y Keller (49)).

La desigualdad |1.64| impone, en consecuencia, una restricción al valor del incremento de tiempo a adoptar siendo éste, en muchos casos, excesivamente pequeño por lo que el proceso de solución se hace algo lento.

Ello puede obviarse mediante la utilización de métodos implícitos incondicionalmente convergentes y estables. No obstante, tales métodos requieren de la solución de un sistema de tantas ecuaciones como nodos aparecen en la discretización del dominio considerado. En el caso particular de los puentes de hormigón dicha discretización debe contemplar un número elevado de nodos para poder reflejar de forma adecuada el fenómeno de la transmisión de calor, haciéndose necesario el in

vertir una matriz de orden relativamente elevado para cada es calón de tiempo. Ello lleva consigo un aumento excesivo de las operaciones de cálculo de ordenador y de ahí que, en algunos casos, se opte por el empleo de métodos explícitos (Zienkiewicz (100)).

A mi entender, existen otras razones por las que puede ser conveniente el utilizar tales métodos en el estudio particular de puentes de hormigón sometidos a acciones térmicas ambientales.

En primer lugar, es casi obligado el utilizar incrementos de tiempo pequeños para poder seguir con detalle la evolución de las distribuciones de temperaturas y de las acciones térmicas de diseño: gradientes e incrementos medios de temperatura (obtención de máximos y mínimos, instantes más desfavorables,...).

Por otra parte cabe preguntarse si una mejora en la precisión de la solución, en algunos casos muy leve, justifica el aumento de tiempo de cálculo que requiere el ordenador, particularmente en el caso de que se considere la validez o no validez de los datos introducidos en el análisis (factor de turbidez, índice de nubosidad, variabilidad de algunos parámetros climatológicos y ambientales durante el día,...).

Ello, en mi opinión, sí puede ser necesario en el estudio del campo térmico en estructuras de hormigón cuando és tas se ven sometidas a acciones de tipo impacto térmico (torres de refrigeración de reactores nucleares, depósitos de gas natural licuado,...). En estos casos las condiciones de contorno que influyen de forma decisiva en el fenómeno se en encuentran perfectamente definidas a lo largo de toda la etapa transitoria alcanzándose, transcurrido un cierto tiempo, un perfecto régimen estacionario.

No ocurre así en el caso de que la acción térmica pro venga del entorno ambiental en el que se encuentra inmersa

la estructura. Aquí, las diferentes distribuciones de temperaturas obtenidas a lo largo del tiempo, a las cuales se ven sometidos los puentes de hormigón, son función directa de las fluctuaciones aleatorias de las variables climatológicas y ambientales que influyen en el fenómeno de la transmisión de calor.

Por último puede aducirse una razón de tipo funcional cara al desarrollo de la presente tesis doctoral. Es evidente que en base a todo lo expuesto hasta este punto, existe un amplio número de variables climatológicas y ambientales y parámetros estructurales que influyen, de forma determinante, en el fenómeno de la transmisión de calor en puentes de hormigón. Analizar cada uno de ellos e intentar extraer criterios de diseño relativos a la acción térmica ambiental requiere un exhaustivo y amplio estudio paramétrico. De ahí que la mayoría de los investigadores que han analizado la respuesta térmica de los puentes de hormigón de forma paramétrica hayan basado su análisis en esquemas explícitos con el objeto de obtener un importante ahorro en el tiempo de cálculo requerido por el ordenador (Emerson (37), Hunt y Cooke (43), Priestley y Buckle (85)).

Hasta este punto se ha considerado la ecuación diferencial de transmisión de calor en su forma más general suponiendo la existencia de flujo calorífico en tres direcciones, lo cual implica la necesidad de trabajar en tres dimensiones.

Sin embargo, en el estudio del flujo térmico en puentes de hormigón, parece obvio el extender la resolución de la ecuación diferencial de transmisión de calor a dominios bidimensionales -secciones transversales- asumiendo que existe equilibrio térmico a lo largo del eje longitudinal del puente (Priestley (84), Emerson (34), Zichner (97), Elbadry y Ghali (32))

Esta hipótesis se aproxima a la realidad ya que, por

una parte, la sección transversal de un puente de hormigón va
ría, en general, de forma muy leve según la directriz de la
estructura y, por otra, se suponen constantes las condiciones
de contorno a lo largo de la longitud del puente.

Incluso algunos autores indican que en la mayoría de
las secciones utilizadas en puentes de hormigón el flujo de
calor en la dirección vertical a través de la sección es mu-
cho más significativo que el flujo existente en dirección
transversal (White (94)). Ello permite reducir la ecuación di-
ferencial de transmisión de calor a una dimensión con el con-
secuente ahorro de tiempo de cálculo de ordenador. No obstan-
te, aunque dicha hipótesis es tentadora, no siempre es conve-
niente adoptarla sin tener en cuenta previamente la tipolo-
gía transversal de la sección del puente a analizar. En efec-
to, en el caso de secciones transversales en cajón (secciones
celulares o multicelulares) pueden existir, debido a la dife-
rencia de temperaturas entre el interior de la célula y el
exterior, gradientes térmicos transversales significativos a
través del alma que pueden originar tensiones de tracción re-
lativamente elevadas.

Por ello, en mi opinión, si lo que se pretende es ob-
tener distribuciones de temperaturas acordes con las existen-
tes en la realidad, el adoptar la hipótesis de que exista
únicamente flujo calorífico según el eje vertical de la sec-
ción transversal es sólo aplicable al caso de secciones tipo
losa maciza en las cuales la intensidad de radiación solar
incidente sobre los costales sea prácticamente despreciable.

1.3.2.- Estado tensional asociado a la distribución de tempe- raturas

En general, las distribuciones de temperatura que se
presentan en secciones transversales de puentes de hormigón
son no lineales debido a la variabilidad de las condiciones
ambientales y climatológicas del lugar en el que se emplaza

el puente y a la gran inercia térmica que posee el hormigón. Dichas distribuciones originan un cierto estado de tensiones las cuales en algunos casos, alcanzan valores elevados con respecto al valor de la tensión que produce fisuración en el hormigón.

Cara a su obtención es necesario adoptar unas hipótesis de partida las cuales son asumidas por la mayoría de los investigadores que han analizado esta problemática (Priestley y Buckle (85), Elbadry y Ghali (33), Dilger et al. (28), Hoffman et al. (42)). Estas hipótesis son:

- Hipótesis de Navier-Bernouilli: secciones planas permanecen planas después de deformarse.
- Las tensiones de origen térmico pueden considerarse independientes de las tensiones o deformaciones impuestas originadas por otro tipo de acción. Asimismo, las respuestas térmicas longitudinal y transversal de la superestructura del puente pueden analizarse separadamente, superponiendo los resultados; es decir, los campos longitudinal y transversal de tensiones térmicas se suponen uniaxiales, sin considerar la interacción entre ambos.

1.3.2.1.- Tensiones longitudinales

Sea una sección genérica sometida a un campo de temperaturas no plano (figura 1.8). Cada una de las fibras longitudinales (filamentos diferenciales) en las que podríamos discretizar idealmente dicha sección se deformaría proporcionalmente al cambio de temperatura experimentado por cada fibra en cuestión (figura 1.8).

Es evidente que el estado de deformaciones presentado en la figura 1.8 no cumple la hipótesis de deformación plana; el hecho de que deba verificarse esta hipótesis implica la

existencia de una interacción física entre cada una de las fibras longitudinales que impedirán o facilitarán la deformación térmica impuesta a nivel fibra.

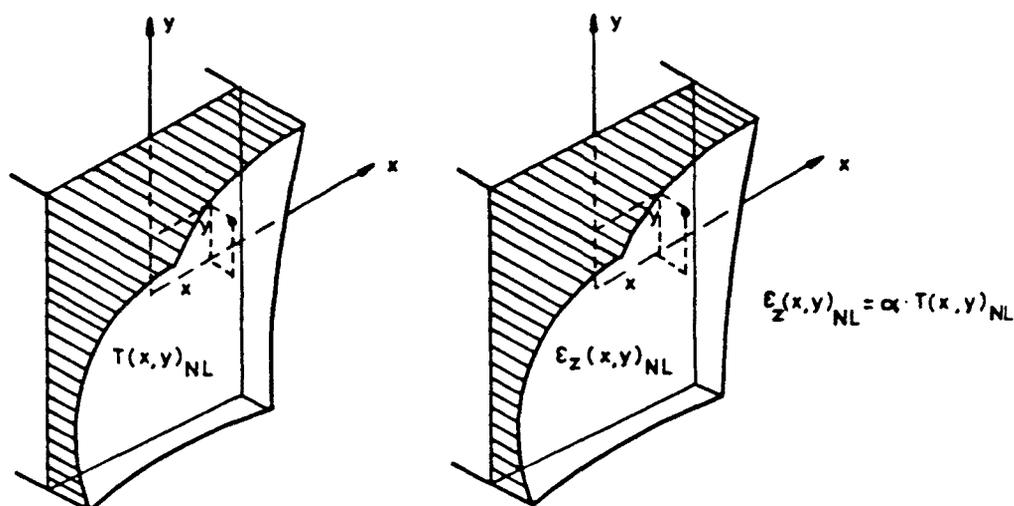


Fig. 1.8.- Distribución genérica de temperaturas y estado de deformaciones.

Por ello únicamente una parte de este campo de temperaturas puede ser responsable de la deformación térmica impuesta de la sección y debe ser plano (figura 1.9). La diferencia entre las deformaciones originadas por temperatura al no tener en cuenta la interacción existente entre filamentos y las deformaciones térmicas impuestas debidas al campo de temperaturas plano da lugar a un estado tensional (en la bibliografía a dichas tensiones se las conoce con el nombre de tensiones primarias o tensiones autoequilibradas).

Así pues, el valor de dichas tensiones primarias se obtiene mediante la siguiente expresión

$$\sigma_{t_z}(x,y) = E(\epsilon_z(x,y)_L - \alpha \cdot T(x,y)_{NL}) \quad |1.65|$$

En ella E es el módulo de elasticidad del hormigón y $\epsilon_z(x,y)_L$ es la deformación térmica impuesta a nivel fibra, aún desconocida (plano impuesto de deformaciones).

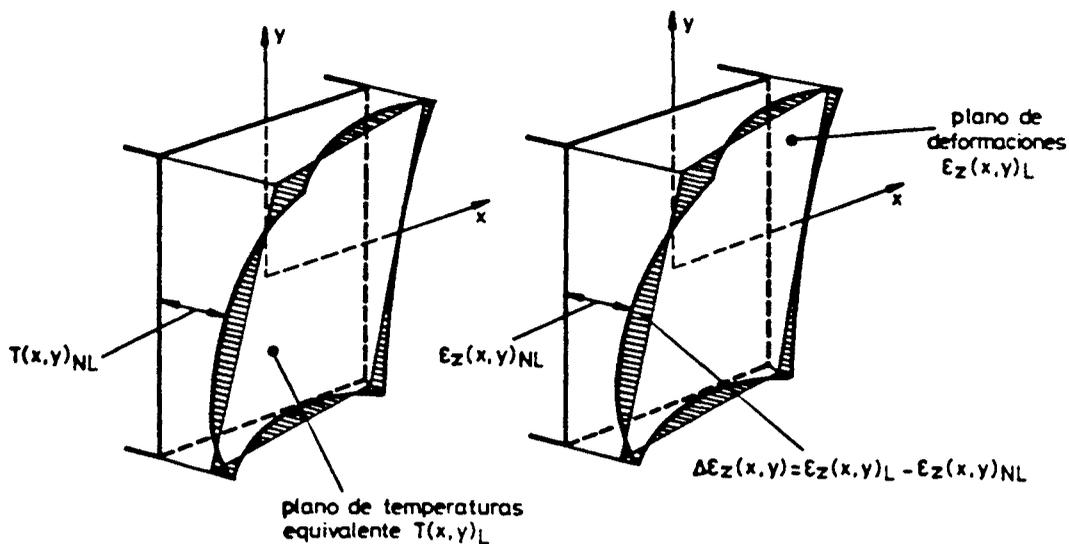


Fig. 1.9.- Plano de temperaturas equivalente $T(x,y)_L$ y deformación térmica impuesta $\epsilon_z(x,y)_L$

Integrando estas tensiones y los momentos que producen éstas con respecto a los ejes x e y a lo largo y ancho de toda la sección genérica analizada se obtiene que

$$\begin{aligned}
 N &= E \iint_S (\epsilon_z(x,y)_L - \alpha \cdot T(x,y)_{NL}) dx dy \\
 M_x &= E \iint_S (\epsilon_z(x,y)_L - \alpha \cdot T(x,y)_{NL}) y dx dy \quad |1.66| \\
 M_y &= E \iint_S (\epsilon_z(x,y)_L - \alpha \cdot T(x,y)_{NL}) x dx dy
 \end{aligned}$$

Por otra parte, el plano de deformaciones térmicas impuestas puede expresarse como

$$\epsilon_z(x,y)_L = \epsilon_0 + \psi_x \cdot y + \psi_y \cdot x \quad |1.67|$$

en donde ϵ_0 es la deformación térmica impuesta a nivel de la fibra baricéntrica y ψ_x y ψ_y son las curvaturas térmicas impuestas alrededor de los ejes principales de inercia x e y respectivamente.

Sustituyendo la expresión |1.67| en las ecuaciones |1.66| y suponiendo que estamos en el caso de viga simplemente

te apoyada -se debe verificar que $N=M_x=M_y=0$ - se obtienen las siguientes ecuaciones para ϵ_0 , Ψ_x y Ψ_y

$$\begin{aligned} \epsilon_0 &= \frac{\alpha}{A} \iint_S T(x,y)_{NL} dx dy \\ \Psi_x &= \frac{\alpha}{I_x} \iint_S T(x,y)_{NL} \cdot y \cdot dx dy \\ \Psi_y &= \frac{\alpha}{I_y} \iint_S T(x,y)_{NL} \cdot x \cdot dx dy \end{aligned} \quad |1.68|$$

en donde A, I_x e I_y son el área y los momentos de inercia principales de la sección.

Así, el valor de las tensiones primarias o autoequilibradas puede obtenerse mediante la siguiente ecuación

$$\sigma_{t_z}(x,y) = E [\epsilon_0 + \Psi_x \cdot y + \Psi_y \cdot x - \alpha \cdot T(x,y)_{NL}] \quad |1.69|$$

A idéntico resultado se llega aplicando el principio de superposición de estados -estado restringido y estado libre- a un elemento diferencial isostático sometido a una distribución no lineal de temperaturas (Mirambell (67)).

Es interesante señalar que dicho estado tensional autoequilibrado es independiente de las condiciones de apoyo y vinculación de la estructura del puente y que, por consiguiente, aparecerá siempre que la distribución de temperaturas sea no lineal.

En el caso de que la tipología longitudinal del puente no pueda aproximarse a elementos tipo viga (ello puede ocurrir en losas bidireccionales) la relación tensión-deformación debe ser otra de tal forma que se aproxime de forma más adecuada al verdadero comportamiento biaxial.

Sea la losa bidireccional de la figura 1.10. En ella se supone que las condiciones de vinculación no impiden, en

ningún momento, la deformación debida a la curvatura térmica impuesta (estructura estáticamente determinada).

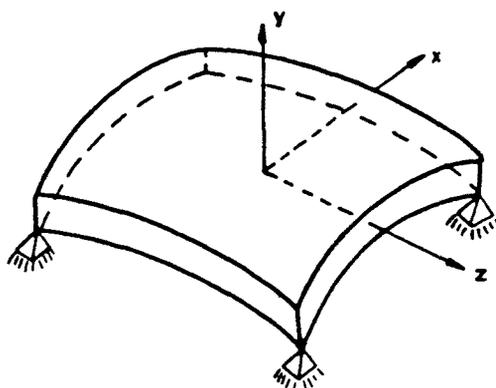


Fig. 1.10.- Losa bidireccional estática sometida a curvatura térmica.

Para un campo biaxial de deformaciones pueden utilizarse las relaciones σ - ϵ correspondientes a tensión plana (Elbaidry y Ghali (32)).

$$\begin{bmatrix} \sigma_z(\text{long}) \\ \sigma_x(\text{trans}) \end{bmatrix} = \frac{E}{1-\nu^2} \begin{bmatrix} 1 & \nu \\ \nu & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon_z(\text{long}) \\ \epsilon_x(\text{trans}) \end{bmatrix} \quad |1.70|$$

En estas relaciones E y ν representan respectivamente el módulo de elasticidad y el coeficiente de Poisson del hormigón.

Suponiendo que la temperatura es únicamente función de la coordenada y, las deformaciones longitudinales y transversales pueden expresarse de la siguiente forma:

$$\epsilon_z(\text{long}) = \epsilon_x(\text{trans}) = \epsilon_0 + \psi \cdot y - \alpha \cdot T(y) \quad |1.71|$$

Sustituyendo esta última relación en la ecuación constitutiva biaxial |1.70| se obtiene la siguiente expresión para las tensiones internas autoequilibradas.

$$\sigma_z(\text{long}) = \sigma_x(\text{trans}) = \frac{E}{1-\nu} (\epsilon_0 + \psi \cdot y - \alpha \cdot T(y)) \quad |1.72|$$

Así, se puede observar que el valor de las tensiones primarias o autoequilibradas, suponiendo un estado biaxial, aumenta con respecto el valor que tales tensiones adoptarían suponiendo un estado tensional uniaxial; dicho aumento, para un valor de $\nu=0.20$, es del orden del 25%.

Para puentes continuos y, en general, para toda estructura de puente de hormigón estáticamente indeterminada, los movimientos originados por la acción térmica pueden verse total o parcialmente impedidos debido a la existencia de vinculaciones tanto internas como externas (apoyos fijos, apoyos móviles, apoyos elásticos, pilas empotradas en tablero,...). El hecho de que deban verificarse las condiciones de compatibilidad induce reacciones y esfuerzos en la estructura, traduciendo ello en un nuevo estado de tensiones longitudinales térmicas. A dichas tensiones se les conoce con el nombre de tensiones secundarias o tensiones de continuidad.

En resumen, las tensiones térmicas longitudinales asociadas a una distribución no lineal de temperaturas pueden obtenerse superponiendo los valores de las tensiones primarias (autoequilibradas), debidas a la mencionada no linealidad de la distribución, y los valores de las tensiones secundarias (de continuidad), debidas éstas a la posible hiperestaticidad de la estructura del puente (figura 1.11).

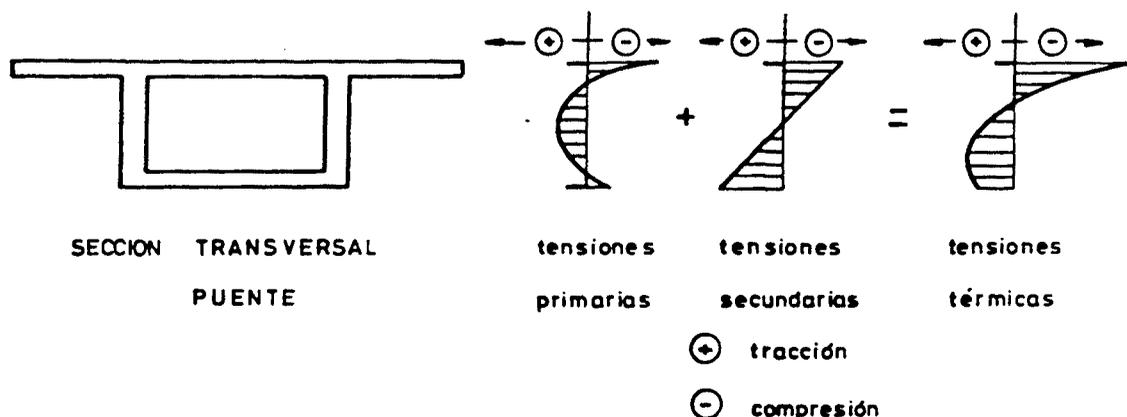


Fig. 1.11.- Distribución de tensiones térmicas longitudinales.

1.3.2.2.- Tensiones transversales

En el apartado anterior se ha comentado el caso de losa bidireccional obteniéndose las tensiones transversales primarias como parte integral de la solución global.

Evidentemente, en el análisis transversal de tensiones tienen lugar los mismos estados tensionales (primario y secundario). Las tensiones primarias se obtienen de forma idéntica a la ya expuesta para la obtención de tensiones longitudinales.

En cuanto a las tensiones secundarias éstas pueden obtenerse considerando una estructura tipo marco sometida a la acción térmica.

Sea, por ejemplo, una sección en cajón convencional sometida a una distribución lineal de temperaturas, función ésta de la abscisa curvilínea s que sigue la directriz del núcleo de hormigón que envuelve a la célula interior (figura 1.12).

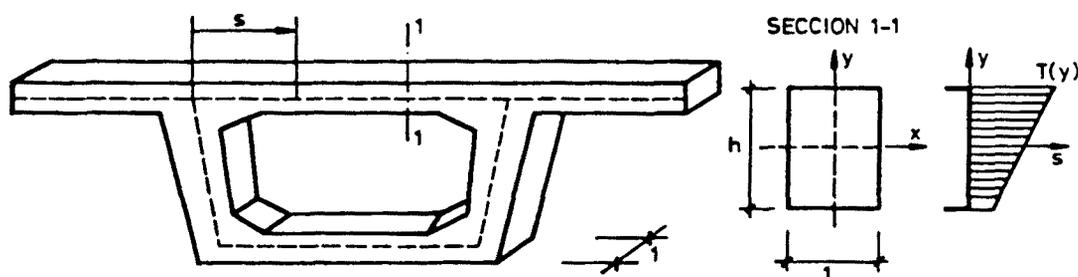


Fig. 1.12.- Sección en cajón sometida a distribución lineal de temperaturas.

La resolución de la estructura marco presentada en la figura anterior puede llevarse a cabo mediante la aplicación de los clásicos métodos matriciales de cálculo de estructuras. Para ello únicamente es necesario conocer los esfuerzos de empujamiento perfecto que se generan en un elemento de inercia

variable sometido a una distribución lineal de temperaturas, función de la abscisa curvilínea s (figura 1.13).

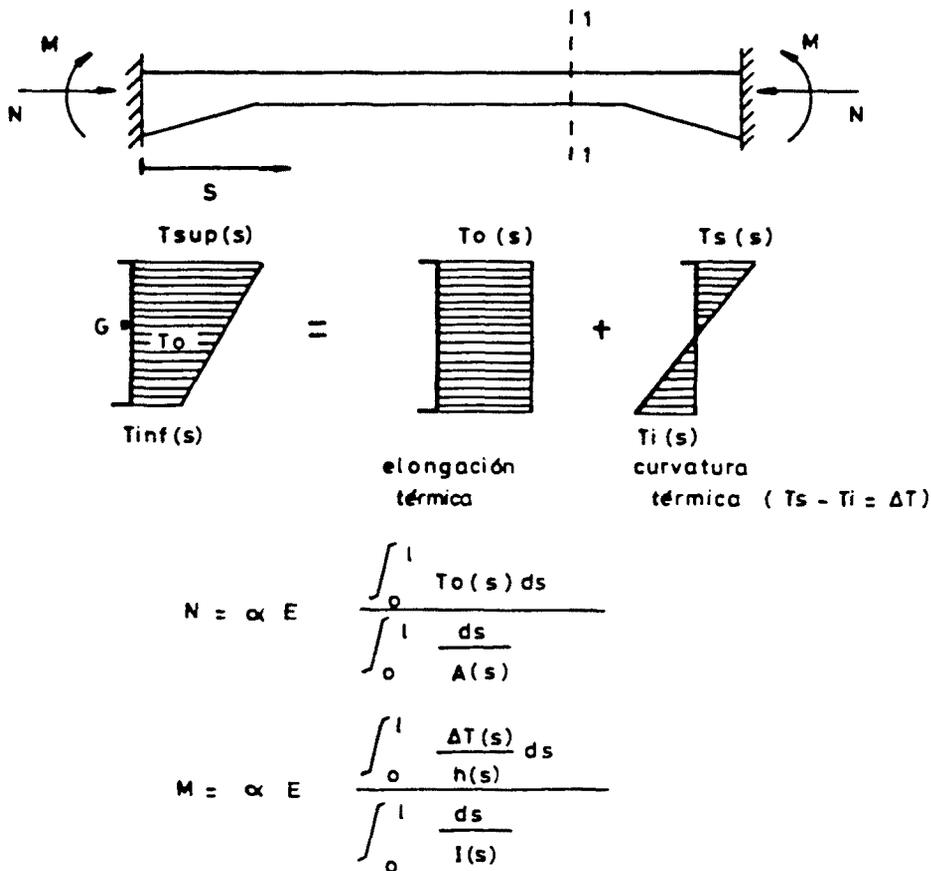


Fig. 1.13.- Esfuerzos de empotramiento perfecto en pieza de inercia variable sometida a distribución lineal de temperaturas.

Así pues, se está ya en condiciones de obtener las tensiones secundarias en sentido transversal; éstas, junto con las tensiones primarias que aparecen debido a la posible no linealidad de la función de temperatura, conforman el estado tensional térmico transversal.

Sin embargo, en el caso de secciones en cajón, la distribución de temperaturas puede suponerse prácticamente lineal a lo largo del núcleo de hormigón que envuelve a la célula y, por otra parte, en condiciones normales, el elemento que se ve más expuesto a la acción térmica es la losa superior del ta

blero (ello no será cierto en el caso de que existan diferencias apreciables entre la temperatura exterior y la temperatura interior de la célula ya que, entonces, las almas pueden verse sometidas a gradientes considerables en espesores relativamente pequeños). De ahí que la mayoría de los estudios relativos a la obtención de tensiones transversales térmicas en secciones cajón de puentes de hormigón se haya centrado en la resolución de estructuras marco en las que la losa superior se ve sometida a una elongación térmica y a una curvatura térmica impuesta (Priestley y Buckle (85)).

Los mismos autores analizan la respuesta transversal de los puentes de sección en doble T sometidos a la acción térmica ambiental.

En este caso la respuesta transversal a dicha acción difiere cualitativamente de la respuesta de vigas en cajón ya que la deformación que podría experimentar la losa del tablero debida a la acción de una curvatura térmica impuesta se ve impedida, en cierta manera, por los núcleos de las vigas en T, originándose en éstas momentos torsores.

Priestley y Buckle (85) evalúan estos esfuerzos y los momentos flectores que solicitan la losa del tablero en sentido transversal modelizando la estructura mediante un emparillado.

La figura 1.14 muestra la ley de flectores que solicita la losa del tablero transversalmente y la ley de torsores existente a lo largo del núcleo de las vigas en un vano interior de 30 metros de luz de un puente continuo de hormigón, suponiendo que se diseñan en ambos apoyos extremos, sendos diafragmas.

Estos momentos flectores generan en la losa tensiones de tracción que, en algún caso, pueden ser significativas (en el ejemplo mostrado con anterioridad $\sigma_t \approx 23.0 \text{ Kp/cm}^2$); no obstante, el valor de éstas puede verse reducido debido a la exis

tencia de compresiones originadas por la coacción que ejercen las propias vigas en T a la deformación que experimentaría la losa debido a la elongación térmica.

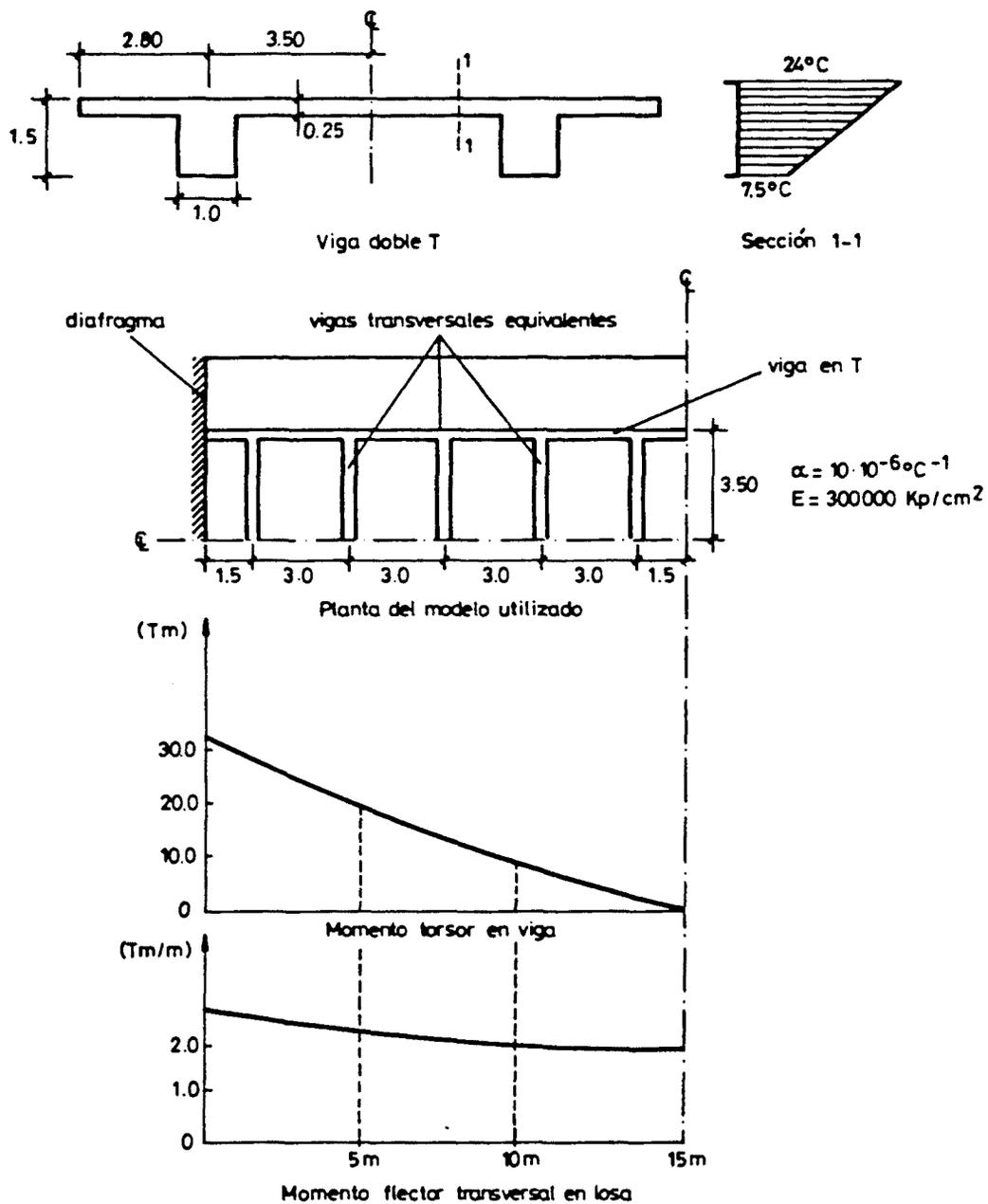


Fig. 1.14.- Análisis transversal sección viga en doble T (cotas en m). Resultados del análisis (según Priestley y Buckle en (85)).

En lo relativo a los momentos torsores puede decirse que éstos, en la zona cercana a los diafragmas, generan en las vigas tensiones tangenciales, si bien sus valores no son

significativos; sin embargo, hay que señalar que dichas tensiones se localizan en la zona en donde las tensiones tangenciales debidas a cortante (carga permanente y sobrecarga) son máximas.

Hasta aquí se han expuesto los diferentes estados tensionales longitudinales y transversales a los que puede verse sometido un puente de hormigón, debidos a la actuación de la acción térmica ambiental. No obstante, en general, la principal preocupación de los proyectistas de puentes de hormigón, relativa a la sollicitación térmica, se ha centrado, hasta la fecha, en la respuesta longitudinal de las estructuras de los puentes, tanto a nivel sección como a nivel estructura y así lo muestra la mayoría de los estudios realizados por diversos investigadores que han analizado la acción térmica ambiental y sus efectos sobre el comportamiento estructural de los puentes de hormigón (disposición de juntas de dilatación y de aparatos de apoyo, estados tensionales longitudinales, grado de pretensado, disposiciones y cuantías mínimas de armadura pasiva en puentes, deformación longitudinal durante el proceso constructivo,...).

A continuación se pasa revista a una serie de estudios analíticos llevados a cabo por diferentes autores que tienen por objetivo común el obtener distribuciones reales de temperaturas y de tensiones longitudinales primarias en puentes de hormigón y poder llegar a cuantificar, de forma aproximada, las acciones térmicas a considerar en el proceso de diseño.

1.3.3.- Estudios analíticos de determinación de distribuciones de temperaturas y de tensiones autoequilibradas en puentes de hormigón

Recientemente, se ha observado un aumento notable en el número de artículos de investigación y en la bibliografía, en general, que versan sobre la incidencia de la acción térmica ambiental en estructuras de hormigón y, en concreto, en la tipología estructural de puentes. Cabe aquí comentar que, de toda la bibliografía de que se dispone, se expondrán y analizarán únicamente aquellos trabajos o estudios que el autor de esta tesis considera ilustran de forma óptima la problemática abordada y ponen de manifiesto la situación del conocimiento en este tema.

En 1973, Mrs. Emerson (34) describe un método sencillo para poder obtener distribuciones de temperaturas en puentes de hormigón. Los cálculos se basan en la hipótesis de no existencia de flujo de calor en la dirección de la directriz de la pieza y en la hipótesis de que el flujo de calor a través de la sección transversal del puente es unidireccional. La no existencia de flujo longitudinal es una hipótesis siempre aceptable excepto en el caso de que se analicen puentes en los cuales existan cartelas muy pronunciadas en arranques de vano o en los que la variación de canto a lo largo de su directriz sea muy considerable; de todas formas, la influencia de dicho flujo en la respuesta térmica del puente tiene poca relevancia.

Sin embargo, el considerar flujo de calor unidireccional en la sección transversal del puente no permite contemplar la existencia de posibles fuentes de calor en los costales del puente ni tampoco visualizar la aparición de gradientes térmicos transversales que pueden llegar a ser de cierta importancia (Johannson (51)).

Las variables climatológicas y sus variaciones tempo-

rales son las correspondientes a las áreas geográficas que Emerson analiza -Manchester y Londres- si bien la autora extrapola los resultados derivados del análisis a toda la zona geográfica ocupada por las Islas Británicas.

El método utilizado se basa en un simple esquema en diferencias finitas unidimensional. La figura 1.15 evidencia la sencillez del método y muestra la discretización de una sección en cajón (no cercana al alma) y las ecuaciones que permiten resolver el problema

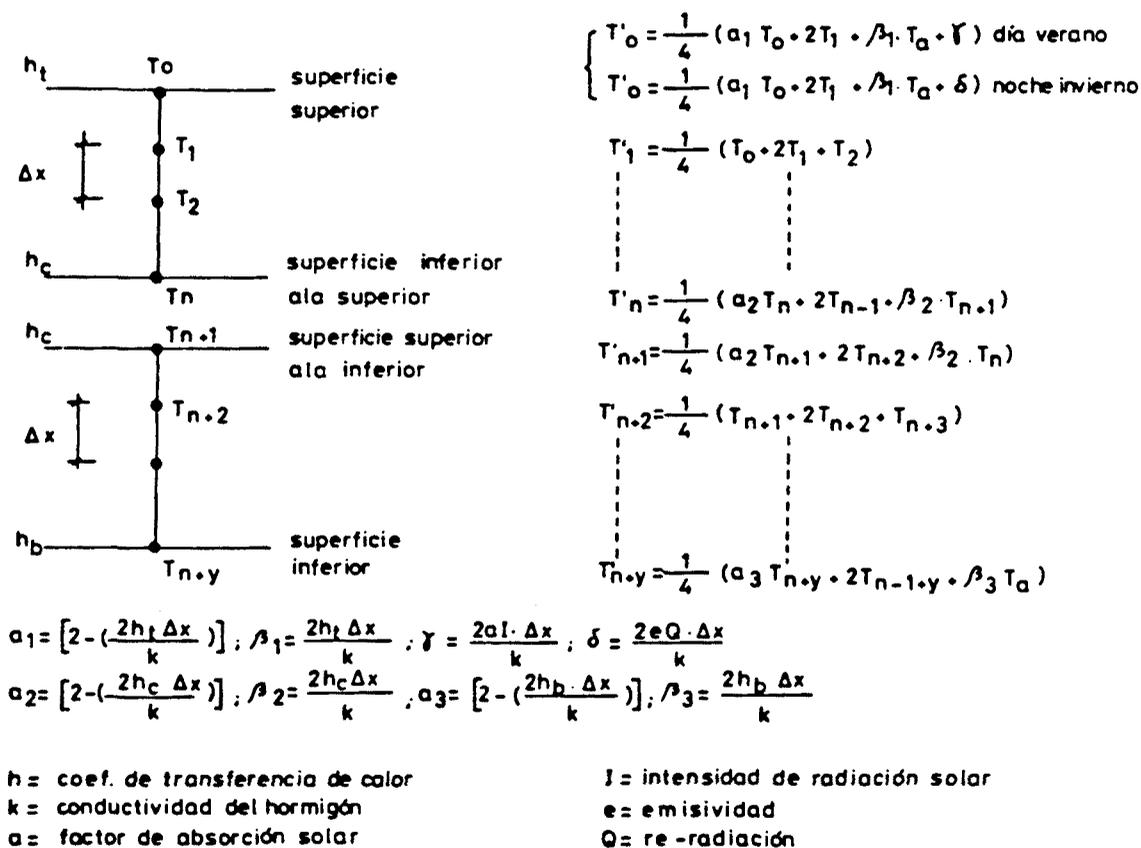


Fig. 1.15.- Discretización de viga cajón y ecuaciones en diferencias (Emerson (34)).

Después de analizar el comportamiento térmico de los puentes de hormigón y de llevar a cabo diversos estudios para métricos de las variables que influyen en la obtención de la distribución de temperaturas, Mrs. Emerson llega a la conclusión de que tres son los parámetros o variables que poseen una

mayor relevancia y son la temperatura ambiente, la intensidad de radiación solar y la velocidad del viento, factor éste último cuyo efecto queda englobado en el valor que adoptan los coeficientes de transferencia de calor en las superficies externas de la sección analizada (Emerson (34), (37)).

Con posterioridad esta misma investigadora presenta, en una reunión de la Comisión II del CEB -Análisis Estructural- celebrada en Pavía en 1981, un artículo en el que se recogen los resultados más relevantes del estudio paramétrico realizado. Diversos son los parámetros o variables que se analizan siendo el estudio de referencia el que se recoge en la figura 1.16; se supone que el análisis se lleva a cabo en las horas diurnas de un día claro y soleado de verano.

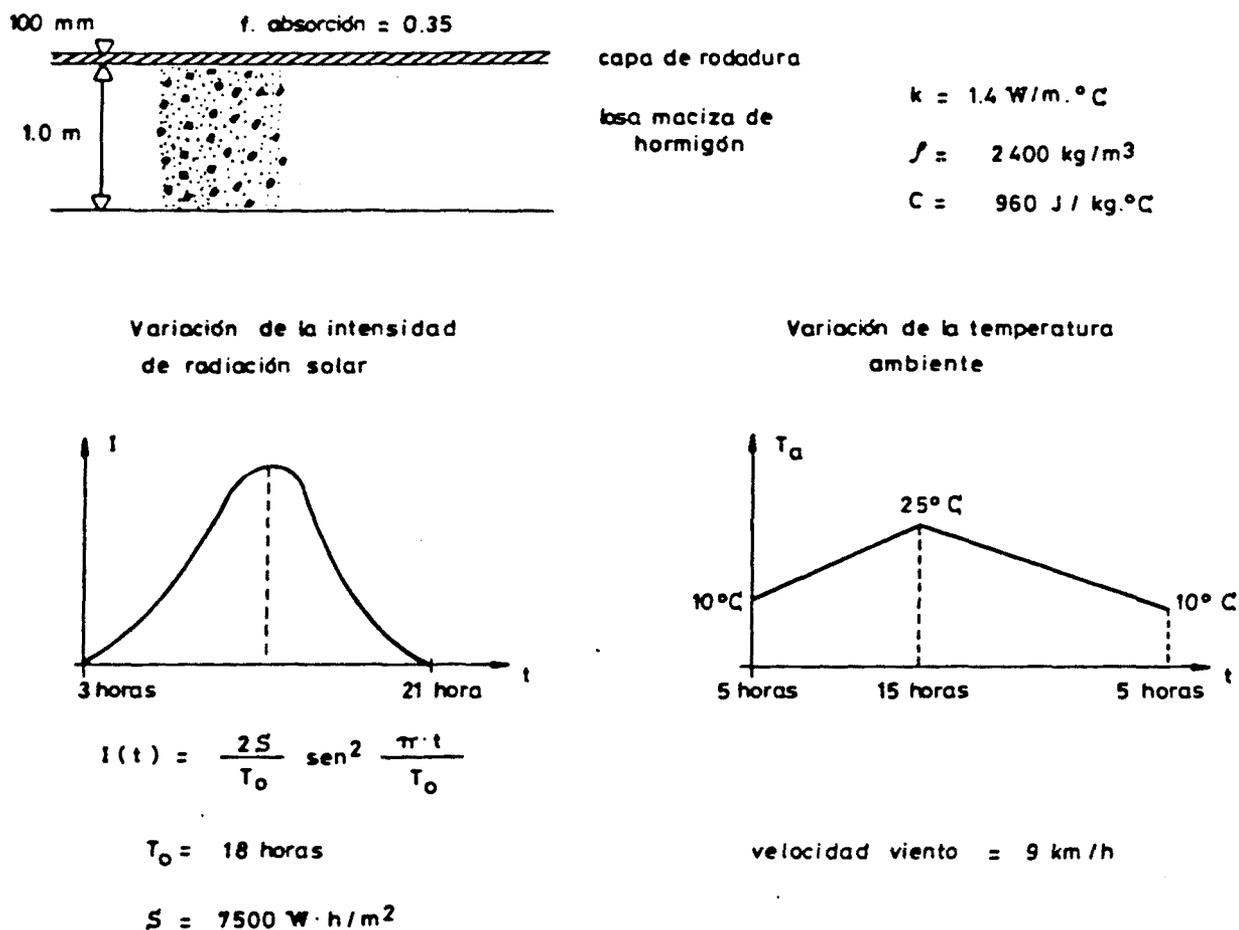


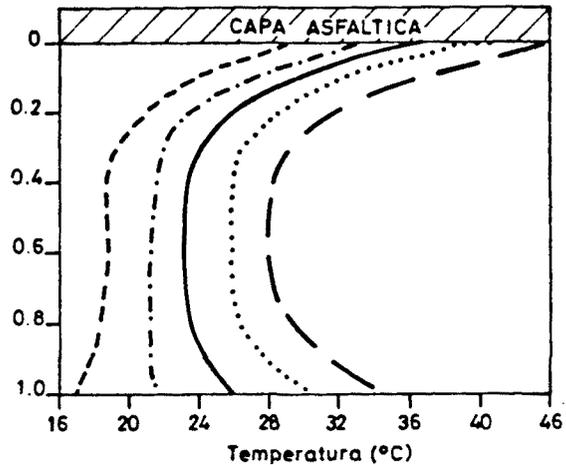
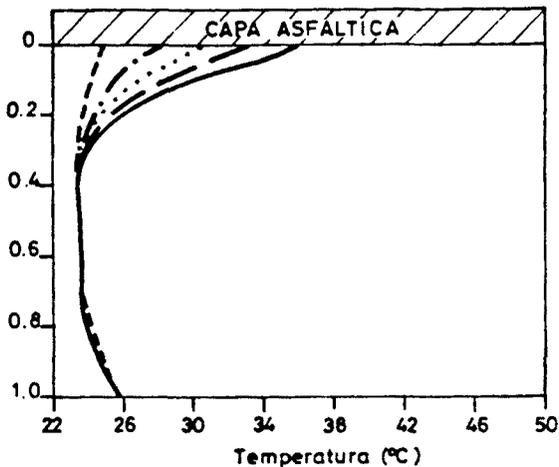
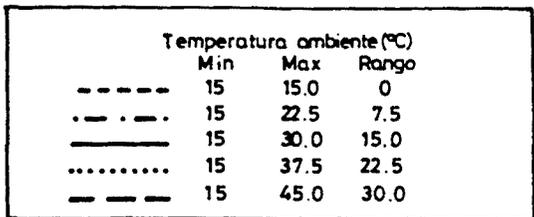
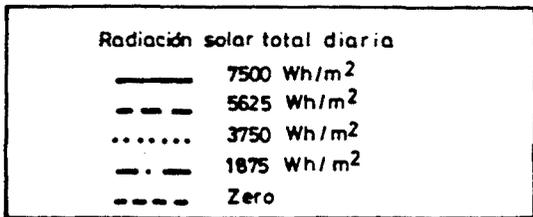
Fig. 1.16.- Estudio de referencia en el análisis paramétrico realizado por Emerson (37).

Evidentemente el estudio o análisis de referencia podría llevarse a cabo para cualquier día del año. Emerson, no obstante, adopta para dicho estudio las condiciones climatológicas y ambientales correspondientes a un día de verano con alta radiación solar, un gran rango de variación de la temperatura ambiente y una baja velocidad del viento (estas condiciones acaecen en unos cuatro o cinco días de verano en las Islas Británicas), ya que de esta forma se generan los máximos gradientes térmicos concomitantes con las temperaturas medias más altas de los puentes de hormigón.

Los resultados del estudio paramétrico se recogen en la figura 1.17; las distribuciones de temperaturas correspondientes al estudio de referencia se representan en trazo continuo.

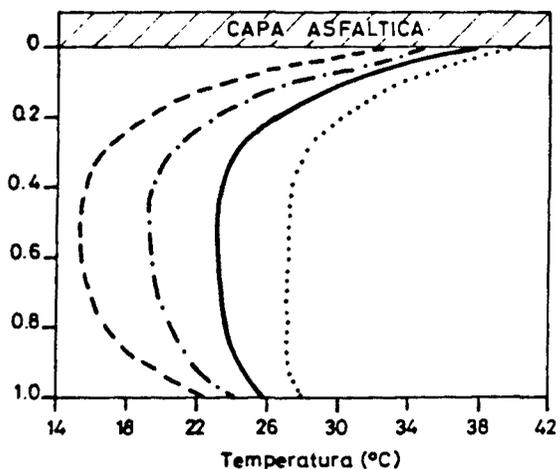
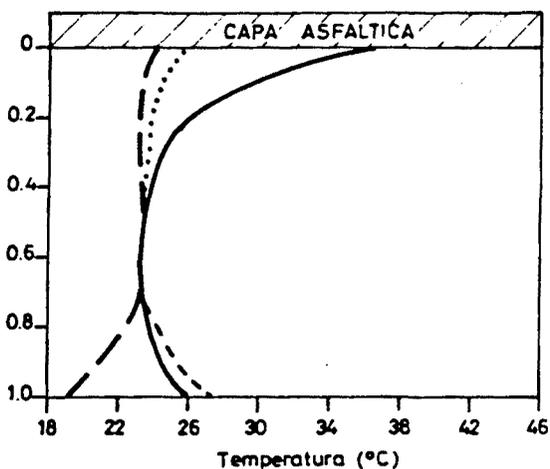
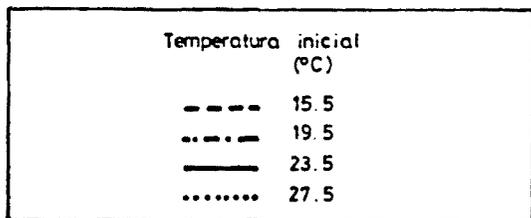
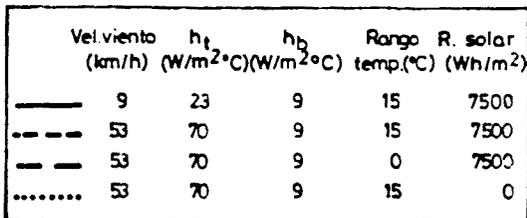
Las figuras 1.17.a, 1.17.b y 1.17.c muestran que, de los tres factores ambientales que, según la autora, influyen de forma más relevante en la temperatura de un puente de hormigón, es la intensidad de radiación solar la que ejerce mayor influencia en la magnitud de las diferencias de temperaturas (gradiente térmicos) mientras que ésta, junto con el valor del rango diario de la temperatura ambiente, tienen más influencia en el nivel de temperaturas alcanzado en el interior del tablero del puente (temperaturas medias). Asimismo, un aumento de la velocidad del viento altera las temperaturas en la parte superior del tablero aproximándose éstas al valor de la temperatura ambiente.

Emerson (35) observa que las combinaciones de condiciones ambientales necesarias para generar máximas diferencias de temperaturas a través de una sección de un puente de hormigón son complejas y variadas. Considerando una losa maciza de canto 1.0 metro puede decirse que las temperaturas en la zona superior del tablero (de una profundidad aproximada de 0.5 metros) vienen controladas, fundamentalmente, por la intensidad de la radiación solar incidente; en la zona intermedia (hasta unos 0.3 metros por encima de la fibra inferior) las temperaturas vienen regidas por las condiciones ambienta-



a) Influencia radiación solar

b) Influencia del rango diario temperatura ambiente



c) Influencia velocidad viento

d) Influencia temperatura inicial

Fig. 1.17.- Resultados del estudio paramétrico de diversas variables que influyen en la distribución de temperaturas en puentes de hormigón (Emerson (37)).

les de los días previos (primordialmente, los niveles de radiación solar y temperatura ambiente) y ya en la zona inferior del tablero las temperaturas dependen de la temperatura ambiente y de la propia irradiación térmica (figura 1.18).

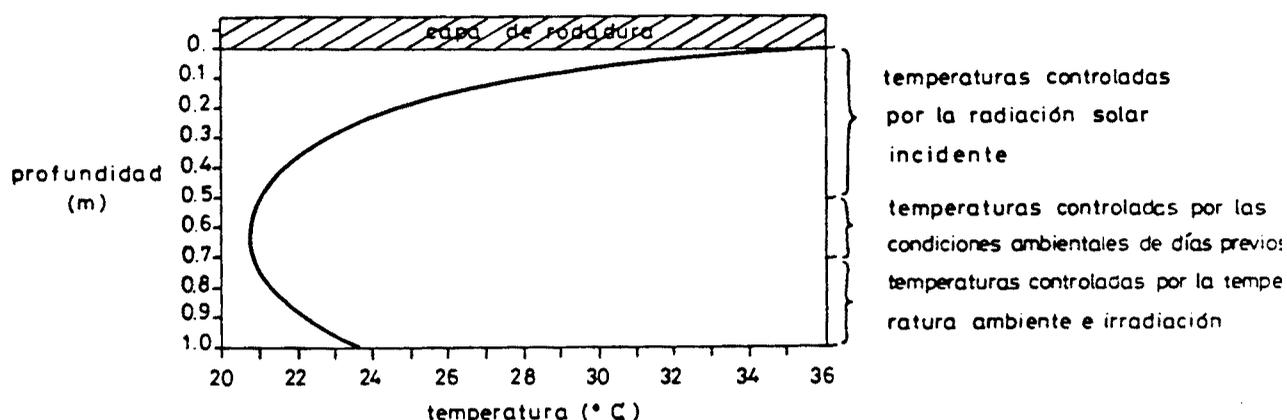


Fig. 1.18.- Condiciones ambientales que controlan la forma de la distribución de temperaturas (según Emerson (35)).

Por otra parte, la figura 1.17.d muestra cuán necesario es poder llegar a estimar con más o menos precisión la distribución inicial de temperaturas; ello es todavía más importante en el caso de puentes de mayor canto en los cuales las temperaturas de las capas medias no varían considerablemente debido a la gran inercia térmica que posee el hormigón. No obstante, y como ya se comentará posteriormente, Zichner (97) obvia el problema de la condición inicial alargando el período de tiempo a analizar con lo cual se consigue amortiguar los posibles errores de los resultados, derivados de dicha condición. Lógicamente la distribución inicial de temperaturas debe ser estimada a partir de datos experimentales; así, los valores que utiliza Emerson en sus estudios son los recogidos en la British Standards Institution (18) los cuales se presentan en la tabla 1.7.

En la reunión ya citada de la Comisión II del CEB, Zichner (97) presenta un artículo que versa sobre efectos térmicos en puentes de hormigón. El autor comenta que, en el cur

so de inspecciones rutinarias de puentes de hormigón pretensado, se habían observado frecuentemente fisuras localizadas, fundamentalmente, en las losas inferiores y en las almas de secciones en cajón. Zichner señala que una de las razones de la aparición de tales fisuras era la existencia de una determinada distribución de temperaturas, la cual no había sido considerada de forma adecuada en el diseño.

Canto (m)	Distribución inicial de temperaturas (°C)	Hora inicial de cálculo (horas)
≤0.25	$T_a(7:00)$	7:00
0.30 ÷ 0.45	$T_a(8:00) + 2^{\circ}\text{C}$	8:00
≥0.50	$T_a(8:00) + 4^{\circ}\text{C}$	8:00

Tabla 1.7.- Distribución inicial de temperaturas (según British Standards Institution (18)).

Para evaluar los efectos térmicos ambientales y su influencia en el comportamiento de los puentes de hormigón, Zichner adopta las hipótesis básicas de no existencia de flujo longitudinal y de deformaciones planas y determina previamente el campo de temperaturas en secciones transversales mediante un esquema bidimensional en diferencias finitas aplicando las pertinentes condiciones de contorno y haciendo especial hincapié en la condición inicial. Efectivamente, el autor indica que la distribución de temperaturas para tiempo igual a cero, que se introduce como condición inicial, influye únicamente en los resultados obtenidos para los inicios del período temporal analizado; con posterioridad, la perturbación inicial que podría introducirse en los resultados del análisis térmico debida a una no muy precisa distribución inicial de temperaturas se desvanece gradualmente. No obstante, para asegurar que dichos resultados no se encuentran desvirtuados Zichner aconseja extender el cálculo a períodos de tiempo más amplios y señala que, en el caso de puentes de hormigón, un período de dos días puede ser adecuado. Esta forma

de actuar ha sido utilizada también por otros investigadores (Elbadry y Ghali (33), (32), Dilger et al. (28)).

Zichner obtiene analíticamente las distribuciones de temperaturas y de tensiones longitudinales autoequilibradas en trece puentes de hormigón pretensado situados en Alemania. La figura 1.19 muestra los resultados de las variaciones de la temperatura media y de la diferencia de temperaturas entre la fibra superior e inferior del tablero (plano lineal equivalente de temperaturas) de dos de los trece puentes analizados así como la variación de la distribución de tensiones autoequilibradas en la losa superior del tablero del puente.

Los resultados del análisis térmico presentado en esta figura (se obtuvieron resultados similares para el resto de puentes analizados) muestran que, para determinadas horas del día, pueden alcanzarse gradientes térmicos lineales de, aproximadamente, 9°C y que la variación de la temperatura media del puente es similar a la variación de la temperatura ambiente del aire con un desfase horario de tres a seis horas. Se observa, asimismo, que a lo largo de un día pueden tener lugar incrementos de temperatura media considerables (aproximadamente, 7°C). En lo que se refiere a las tensiones internas autoequilibradas, Zichner recomienda el no despreciarlas ya que su magnitud, para alguna hora determinada del día (en los casos analizados, las 16:00 horas), es significativa y puede alcanzar un porcentaje elevado de la tensión térmica obtenida en el análisis estructural inducida por la posible hiperelasticidad de la estructura.

Los resultados obtenidos concuerdan con los derivados de otros estudios realizados, si bien aparece alguna discrepancia relativa al instante del día para el cual tienen lugar los máximos gradientes térmicos lineales en la superestructura del puente. Zichner obtiene que dicho instante se encuentra en torno a las 19:00 horas aproximadamente (figura 1.19. c). Ello no parece muy razonable si se contempla y analiza el

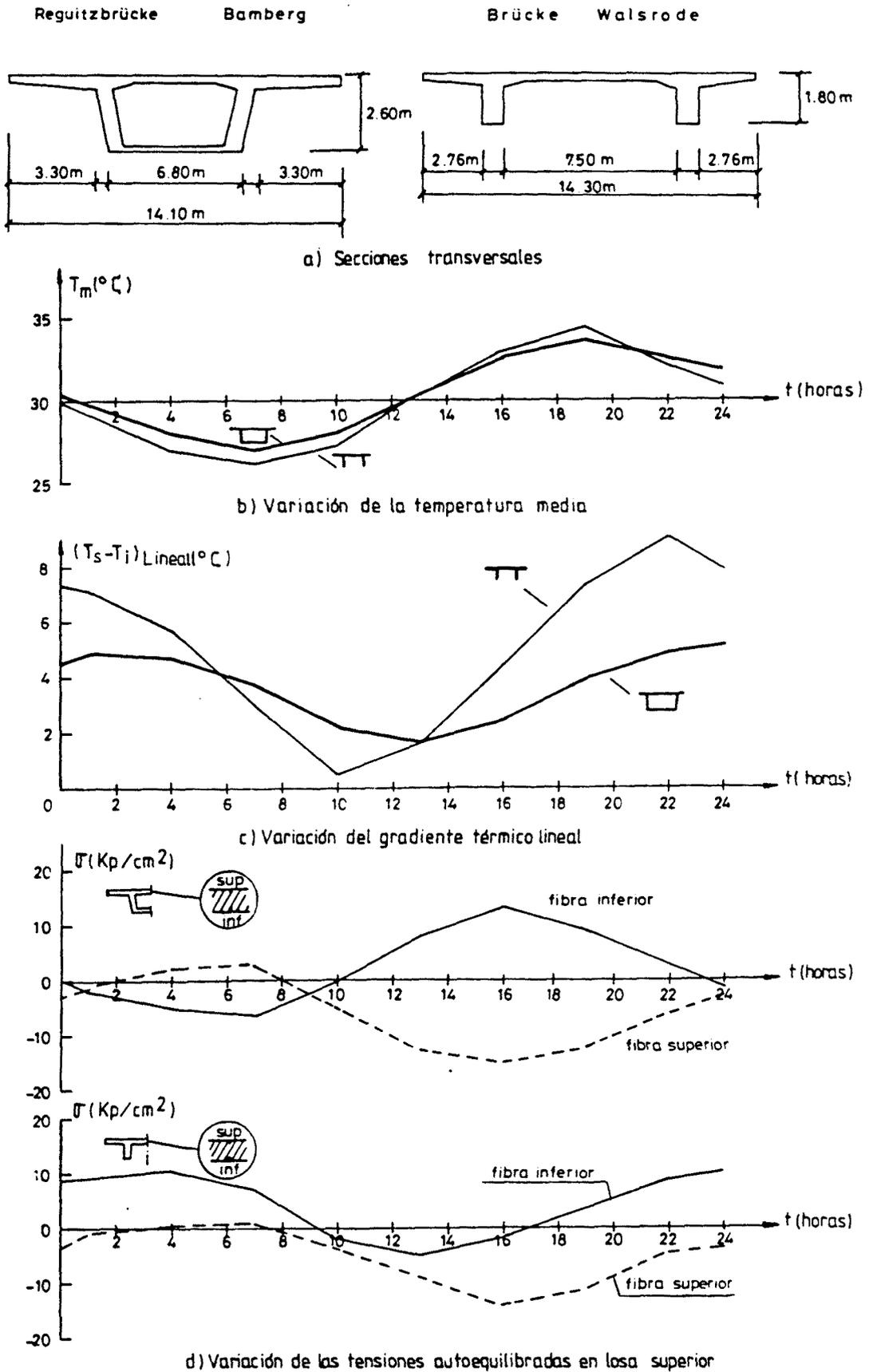


Fig. 1.19.- Resultados del análisis térmico de dos puentes de hormigón pretensado (Zichner (97)).

fenómeno de la absorción y transmisión de calor en puentes de hormigón. En efecto, inicialmente, a medida que la intensidad de radiación solar incidente sobre el tablero va en aumento, el puente se encuentra sometido a una fase de calentamiento en la zona superior de la sección transversal lo que origina unas distribuciones de temperaturas fuertemente no lineales; éstas generarán, por lo tanto, altos gradientes térmicos lineales. Posteriormente, superada de forma parcial la gran inercia térmica que posee el hormigón, se origina un flujo de calor de las capas altas de la sección a las capas intermedias lo cual producirá, por una parte, una distribución más uniforme de temperaturas a lo largo de la sección transversal y, por otra, un aumento de la temperatura media del puente.

Por consiguiente, parece lógico pensar que, en general, se alcanzarán primeramente los máximos gradientes térmicos lineales y posteriormente, con un cierto desfase horario, las máximas temperaturas medias del puente de hormigón; ello viene corroborado por estudios llevados a cabo por otros investigadores (Emerson (34) (37), Elbadry y Ghali (32) (33)) y por los resultados que el autor de la presente tesis obtiene, los cuales se muestran y analizan en el siguiente capítulo.

Otro de los investigadores que analiza con profundidad la influencia de los efectos térmicos ambientales en el análisis y diseño de puentes de hormigón es Priestley (81) (84). Este indica que la problemática del diseño de puentes frente a la acción térmica no ha sido tratada con la suficiente profundidad; así, los posibles movimientos longitudinales inducidos por cambios en la temperatura media del puente son absorbidos por una adecuada disposición de juntas de dilatación o de aparatos de apoyo y, en el caso de que las pilas se empotren en el tablero del puente, por un diseño de aquéllas lo suficientemente flexible. Sin embargo, el autor señala la existencia de otro problema de marcado interés, y es la inducción de tensiones térmicas a causa de la distribución no plana de temperaturas a través de la superestructura del puente.

Aunque la variación transversal de temperaturas a través del espesor de las almas de puentes con sección en cajón ha sido identificada como una de las razones decisivas para la posible formación de fisuras, el problema principal radica, según Priestley (84), en la determinación del gradiente vertical de temperaturas y de la distribución de tensiones asociada a dicho gradiente, ambas función directa de las condiciones ambientales y climatológicas en las que se encuentra inmerso el puente.

Para la predicción de temperaturas en secciones de puentes de hormigón, Priestley adopta el método de las diferencias finitas utilizando un esquema unidimensional, ya que, según se señala el autor en (84), los flujos longitudinal y transversal son, en la mayoría de los casos, no significativos. No obstante, Priestley y Thurston (82) comparan las soluciones obtenidas mediante este método con las obtenidas mediante el método de los elementos finitos (elementos bidimensionales) y técnicas experimentales de medida de temperaturas llegando a la conclusión de que el acuerdo entre los resultados es notable.

Evidentemente, el obtener la respuesta térmica de secciones genéricas como las representadas en la figura 1.20 mediante un esquema unidimensional en diferencias finitas implica el analizar varios ejes verticales y ensamblar los resultados para, así, poder llegar a obtener una respuesta térmica global de toda la sección transversal del puente analizado.

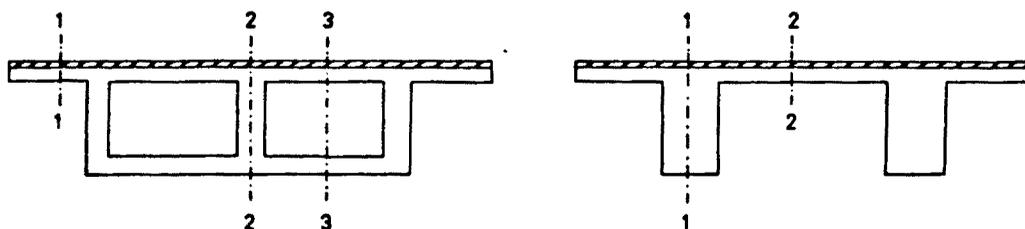


Fig. 1.20.- Ejes verticales en los cuales se realiza el análisis térmico de secciones de puentes (Priestley (84)).

Los trabajos de investigación de Priestley en el campo de los efectos térmicos en puentes de hormigón tienen como objetivo primordial el poder llegar a establecer un gradiente térmico de diseño (o distribución de temperaturas) acorde con la realidad física. Ello, no obstante, no es algo sencillo y necesita de la definición apriorística de lo que debe ser un gradiente "crítico" de diseño. Así, McQuillan (65) y Emerson (35) definen como gradiente "crítico" aquél que genera máximas diferencias de temperaturas en el interior de la sección analizada para unas determinadas condiciones ambientales, es decir, aquél que induce las máximas curvaturas térmicas impuestas. No obstante, y así lo indican Priestley y Buckle en (85), la magnitud de tales temperaturas tiene, por sí misma, poca relevancia para el proyectista de puentes de hormigón; sí la tienen las magnitudes de las tensiones primarias -autoequilibradas- debidas a la no linealidad de la distribución de temperaturas, y las tensiones secundarias -de continuidad- debidas a la existencia de coacciones externas o vinculaciones que impiden la libre deformación térmica. Ello cobra una mayor importancia si se examinan los resultados derivados de un análisis térmico y estructural conjunto, adoptando para éste último la hipótesis de linealidad entre tensiones y deformaciones; en efecto, se observa que, en general, las tensiones térmicas pico aparecen para instantes distintos al instante para el cual tienen lugar los máximos gradientes térmicos lineales.

Por estas razones Priestley (84) sostiene que, para puentes continuos de hormigón, puede definirse como gradiente "crítico" aquel gradiente que, teniendo una cierta probabilidad de aparecer durante la vida útil de la estructura, genera máximas tensiones de tracción en la fibra inferior del puente.

La opinión del autor de esta tesis en torno a este tema es que un planteamiento en tensiones, si bien puede tener más consistencia para el proyectista de puentes de hormigón, lleva consigo la enorme dificultad de tener que cubrir un am

plio espectro de casos en los que las condiciones críticas de la estructura del puente a nivel tensional pueden ser muy variadas. Estas dependen de la propia tipología longitudinal (puentes pórtico,...) y transversal del puente (en almas de secciones en cajón pueden aparecer fisuras oblicuas debidas a la interacción de las tensiones tangenciales originadas por cortante con las tensiones térmicas) y de las propias condiciones ambientales; así, en invierno, y durante una noche apacible, fría y despejada con máxima irradiación térmica pueden inducirse gradientes térmicos inversos concomitantes con bajas temperaturas medias del puente. Emerson (34) señala que ello ocurre como promedio, en las Islas Británicas, en varias noches durante los meses de invierno.

En mi opinión, tal problemática puede analizarse desacoplando ambos aspectos: la acción térmica y los efectos tensionales. Por una parte, siempre será de interés para el proyectista el conocer la verdadera acción térmica que incide sobre el puente analizado en cuestión o disponer de fórmulas simplificadas de diseño para la acción térmica acordes con la realidad física y ambiental en la que se encuentra inmerso el puente; dichas fórmulas, evidentemente, deben extraerse de exhaustivos estudios paramétricos y de los resultados obtenidos para aquellos gradientes que, pudiendo aparecer durante cualquier día del año para una localidad determinada, induzcan las máximas curvaturas térmicas impuestas. Ello, posteriormente, permitirá conocer el comportamiento estructural del puente de hormigón y los efectos tensionales producidos por la acción térmica, no sin antes haber evaluado la magnitud de las tensiones internas autoequilibradas.

Siguiendo con la revisión de los trabajos de investigación realizados por Priestley, éste lleva a cabo un estudio paramétrico de algunas de las variables que influyen sobre la respuesta térmica seccional; dicho estudio se extendió a las secciones transversales de puentes de hormigón pretensado comúnmente utilizados (losas, sección en cajón unicelular y plu

ricelular, puentes de vigas). La figura 1.21 muestra los resultados obtenidos para una sección en doble T; en ella se dan las distribuciones de temperaturas y de tensiones térmicas a lo largo del alma, obtenidas éstas últimas como superposición del estado tensional autoequilibrado y del estado tensional de continuidad suponiendo que existe coacción total a la deformación debida a curvatura térmica impuesta.

Los resultados se obtienen en base a datos meteorológicos observados en la ciudad de Christchurch, Nueva Zelanda. De su análisis Priestley extrae las siguientes conclusiones.

Por un lado, un aumento de la velocidad media del viento disminuye la temperatura en la losa superior del tablero ya que la pérdida de calor por convección aumenta considerablemente. Ello supondrá una disminución del gradiente térmico y del nivel inducido de tensiones (figura 1.21.b).

Por otra parte, los resultados que se observan en la figura 1.21.c muestran que un aumento del rango diario de la temperatura ambiente lleva consigo un aumento de las temperaturas de la fibra superior e inferior del puente siendo el efecto mucho más notable en la fibra inferior. Ello supone una reducción de las tracciones existentes en esta fibra apareciendo las máximas tensiones de tracción en la mitad de la altura del alma aproximadamente.

Las figuras 1.21.d y 1.21.e evidencian la influencia del espesor de la capa asfáltica de rodadura y el factor de absorción solar respectivamente. En cuanto a la influencia de la primera variable, puede observarse que un aumento del espesor de la capa asfáltica de rodadura reduce la temperatura en la superficie superior del puente y, consecuentemente, también se ve reducido el gradiente térmico lineal. Por último, superficies con mayor factor de absorción solar originan mayores diferencias de temperaturas en el interior de la sección analizada con lo que las tensiones térmicas inducidas son de mayor magnitud.

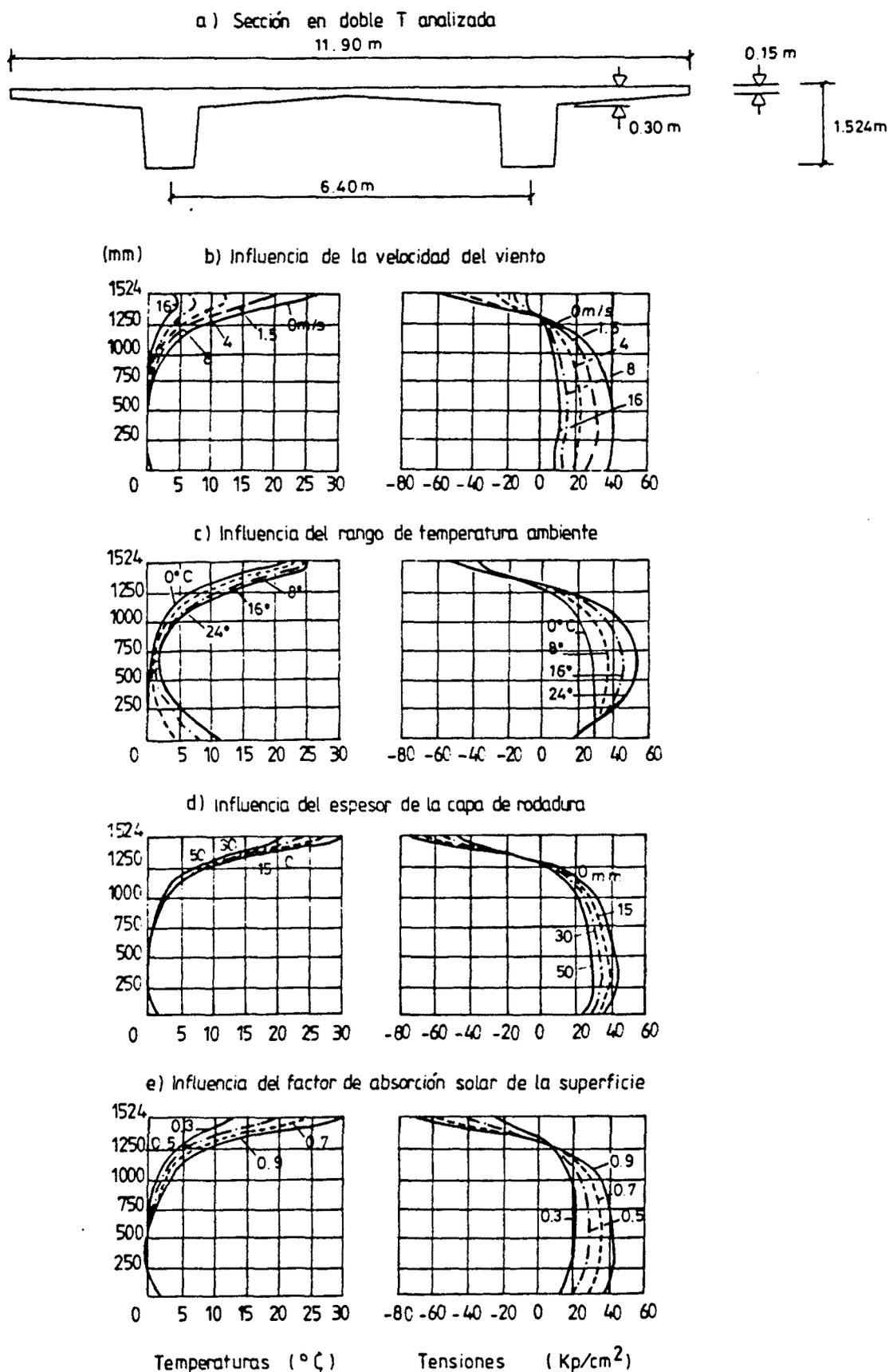


Fig. 1.21.- Distribuciones de temperaturas y de tensiones térmicas según el eje vertical de las almas de las vigas en T (Priestley (84)).

En base a estos resultados y después de analizar numerosas secciones tipo de puentes de hormigón pretensado, Priestley (83) adopta un gradiente térmico estandar que, desde 1977 hasta la fecha, ha sido utilizado en el diseño y análisis de la mayoría de los puentes de hormigón en Nueva Zelanda. De él se hablará con posterioridad en el apartado 1.5 de este primer capítulo.

Recientemente, se han llevado a cabo en la Universidad de Calgary, Canadá, diferentes trabajos de investigación que versan sobre la problemática de la influencia de la acción térmica ambiental en el comportamiento de puentes mixtos y puentes de hormigón. Muestra representativa son varios artículos realizados por investigadores de dicha universidad (Elbaidry, Ghali (32) (33), Dilger, Ghali et al. (28)).

Según Dilger et al. (28), para el análisis térmico en tableros de puente, se requiere conocer un conjunto de datos específicos que son:

- Geometría de la sección transversal
- Localización y orientación del puente
- Propiedades de los materiales
- Día del año y hora
- Condiciones atmosféricas y ambientales

La predicción del campo de temperaturas se fundamenta en los principios generales básicos de transferencia de calor comentados ya con anterioridad y el método numérico utilizado es el método de las diferencias finitas.

Una de las particularidades a destacar en el contexto del artículo, la cual se desarrolla a continuación, es la de que los autores obtienen, de forma analítica, la magnitud de la intensidad de radiación solar incidente, en función de la localización geográfica del puente y de la orientación e inclinación de la superficie expuesta a insolación. Ello permiti

rá, en cierta medida, el poder predecir distribuciones de temperaturas en puentes emplazados en zonas para las cuales no se disponga de datos y medidas experimentales.

La cantidad de energía solar incidente sobre una superficie normal a los rayos solares viene definida por

$$I_n = k_T \cdot I_{SC} \quad |1.73|$$

En dicha relación I_{SC} es la constante solar. Esta representa la energía que, por unidad de tiempo, incide sobre una superficie perpendicular a la dirección de los rayos solares situada fuera de la atmósfera terrestre a una distancia media tierra-sol.

Hasta hace pocos años, la estimación de la constante solar se hacía mediante la extrapolación de los valores de radiación medidos en la superficie terrestre. No obstante, en los últimos años, dicha constante se ha determinado por medida directa mediante la utilización de satélites artificiales adoptándose un valor medio de $I_{SC} = 1353 \text{ W/m}^2$. (Dilger, Ghali et al. (28), Coronas et al. (25)). En realidad, la intensidad de radiación solar incidente fuera de la atmósfera varía ligeramente a lo largo del año debido a que la tierra describe una trayectoria elíptica alrededor del sol; ello se traduce en una variación del $\pm 3\%$ en torno al valor medio de la constante solar. Por otra parte, el factor de transmitancia k_T adimensional, expresa la atenuación de la radiación solar debida a la presencia de atmósfera; por consiguiente, dicho factor dependerá de las condiciones atmosféricas y de la longitud de las trayectorias que los rayos solares deben recorrer a través de la masa de aire existente. Según estudios realizados por Kehlbeck (53), el factor de transmitancia k_T puede aproximarse mediante la siguiente relación:

$$k_T = 0.9^{m' \cdot t_u} \quad |1.74|$$

El factor de masa de aire m' depende de la altitud solar y de

la presión atmosférica existente a la altura donde se sitúa la superficie expuesta a radiación

$$m' = \frac{k_a}{\text{sen}(\text{altitud} + \text{solar } 5^\circ)} \quad |1.75|$$

Los valores de k_a adoptados para este estudio vienen recogidos en la siguiente tabla

Altitud sobre el nivel del mar (metros)	Presión atmosférica relativa (k_a)
0	1.0
500	0.94
1000	0.89
1500	0.84
2000	0.79

Tabla 1.8.- Valores de la presión atmosférica relativa a diferentes altitudes (Dilger et alt. (28)).

El factor de turbidez t_u , que aparece en la expresión |1.74|, representa la atenuación de la radiación solar debida a la existencia de nubosidad y de polución ambiental. Dilger, Ghali et alt. (28) indican que, para cielos despejados y ambientes nítidos dicho factor varía entre 1.8 y 3.0 mientras que para ambientes turbios e industriales este factor puede alcanzar valores tan altos como 8.0 y 9.0 aproximadamente.

Cuando los rayos solares formen un ángulo θ con la normal a la superficie expuesta, el valor de la intensidad de radiación solar incidente sobre dicha superficie puede determinarse mediante la siguiente expresión

$$I = I_n \cdot \cos\theta \quad |1.76|$$

El ángulo θ viene definido por una ecuación trigonométrica que relaciona diversas coordenadas angulares, necesarias

para definir la posición del sol relativa a un observador situado en la superficie terrestre; dicha ecuación puede encontrarse en las referencias bibliográficas (Coronas et al. (25), Elbadry y Ghali (33)).

Lógicamente, la expresión $|1.76|$ es aplicable únicamente en horas comprendidas entre el alba y el crepúsculo y, en determinadas tipologías transversales de secciones de puentes de hormigón, debe contemplarse la posibilidad de que los voladizos existentes proyecten sombra sobre las almas; ello implicará el no considerar la incidencia de radiación solar sobre aquéllas a lo largo de una determinada altura.

Siguiendo esta misma línea de investigación, Elbadry y Ghali publican sendos artículos (32) (33) que revisan y analizan el comportamiento de los puentes de hormigón sometidos éstos a acciones térmicas inducidas por las condiciones climatológicas y ambientales. En ambos artículos, los autores exponen el método numérico utilizado para la obtención de las distribuciones de temperaturas y, a continuación, presentan resultados derivados de los estudios paramétricos llevados a cabo para cada una de las variables que influyen en el fenómeno de la transmisión de calor en puentes de hormigón. El análisis posterior de los resultados permite evaluar, de alguna forma, la influencia de cada una de las variables o parámetros analizados sobre la distribución obtenida de temperaturas.

Los autores adoptan la hipótesis de flujo bidireccional y resuelven la ecuación diferencial mediante el método de los elementos finitos, obteniendo las distribuciones de temperaturas en la sección transversal del puente analizado.

Cabe indicar que el método de resolución coincide en todo su desarrollo con lo expuesto en el apartado 1.3.1.2.2 de este primer capítulo. El incremento de tiempo adoptado es de 1 hora y el período total a analizar se extiende a 72 horas.

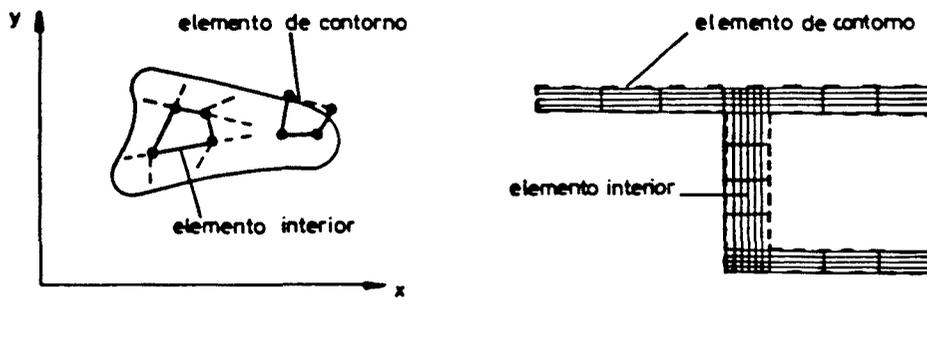


Fig. 1.22.- Discretización mediante elementos finitos de una sección transversal genérica de puente utilizada por Elbadry y Ghali (33).

A continuación se presentan los resultados derivados del estudio paramétrico para la sección que se muestra en la figura 1.23. Las propiedades térmicas y mecánicas de los materiales vienen recogidas en la tabla 1.9.

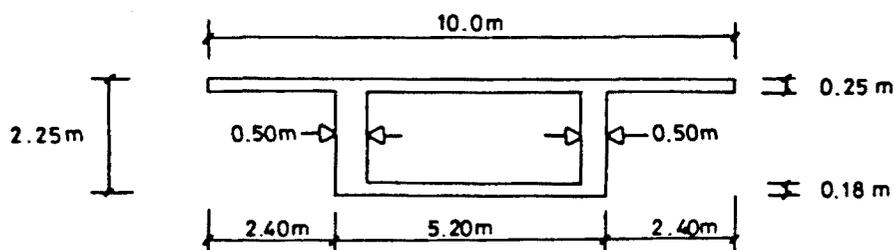


Fig. 1.23.- Sección transversal analizada en los estudios paramétricos de Elbadry y Ghali (32), (33).

Las condiciones climáticas y ambientales utilizadas en el análisis paramétrico fueron las existentes en Calgary, Canadá, siendo el estudio de referencia el correspondiente a condiciones primaverales y orientación del puente este-oeste.

Dos de las variables analizadas fueron la orientación del puente y la estación del año. Se obtuvieron distribuciones de temperaturas en tres días que correspondían respectiva

mente a tres estaciones del año: primavera, verano e invierno. Para cada uno de ellos se fue variando el ángulo azimut, que define la orientación del puente, desde 90° (posición norte-sur) hasta 0° (posición este-oeste).

Propiedad del material	Hormigón	Asfalto	Tablero con capa de nieve
Conductividad térmica, k ($W/m^\circ C$)	1.5	0.93	----
Calor específico, c ($J/kg^\circ C$)	960.	920.	----
Factor de absorción solar, a	0.50	0.90	0.15
Emisividad, e	0.88	0.92	0.30
Coefficiente de dilatación térmica, α ($^\circ C^{-1}$)	8×10^{-6}	20×10^{-6}	----
Densidad, ρ (kg/m^3)	2400.	2100.	----
Módulo de elasticidad, E (Kp/cm^2)	273860.	1000.	----

Tabla 1.9.- Valores de las propiedades térmicas y mecánicas de los materiales adoptados por Elbadry y Ghali en (32), (33).

La figura 1.24 muestra la variación horaria de la curvatura térmica inducida para diferentes estaciones y orientaciones del puente.

En dicha figura puede observarse que el efecto de la orientación del puente sobre el valor de la curvatura térmica no es muy pronunciado en primavera y verano, mientras que en invierno pueden aparecer diferencias del orden del 40% en lo referente a las curvaturas máximas. Por otra parte, puede apreciarse que, en general, las curvaturas térmicas inducidas du-

rante la estación de verano son mayores que las que aparecen en primavera e invierno. Ello es de esperar ya que, en verano, la intensidad de radiación solar incidente sobre la superficie del tablero es más elevada que en otras estaciones.

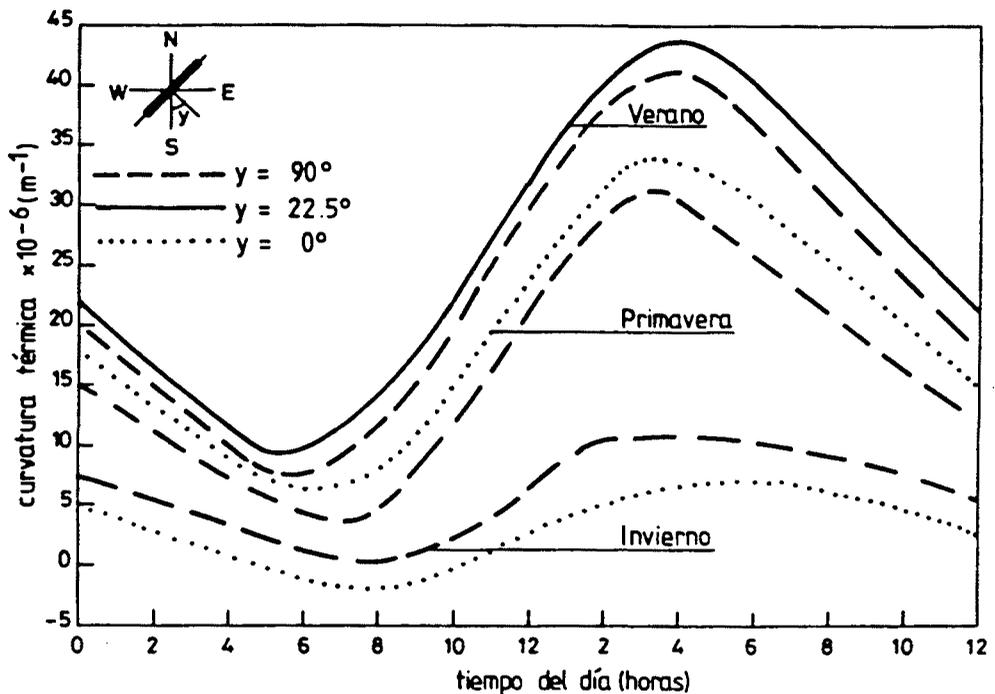


Fig. 1.24.- Variación horaria de la curvatura térmica inducida para diferentes estaciones y orientaciones del puente (Elbadry y Ghali (33)).

En la figura 1.25 se muestran las distribuciones de temperaturas y de tensiones longitudinales autoequilibradas correspondientes a las máximas curvaturas térmicas impuestas.

Otro de los parámetros analizados por Elbadry y Ghali es la temperatura ambiente. Esta, dependiendo de la estación del año y de las condiciones atmosféricas, varía según un modelo cíclico que los citados investigadores aproximan mediante funciones sinusoidales. Después del análisis de los resultados obtenidos en el estudio de este parámetro, los autores señalan, al igual que otros investigadores (Emerson (34), Priestley (84)), que las distribuciones de tensiones autoequi

libradas y las curvaturas térmicas impuestas varían dependiendo, fundamentalmente, de la magnitud de la amplitud del ciclo térmico diario y no del propio valor de la temperatura ambiente.

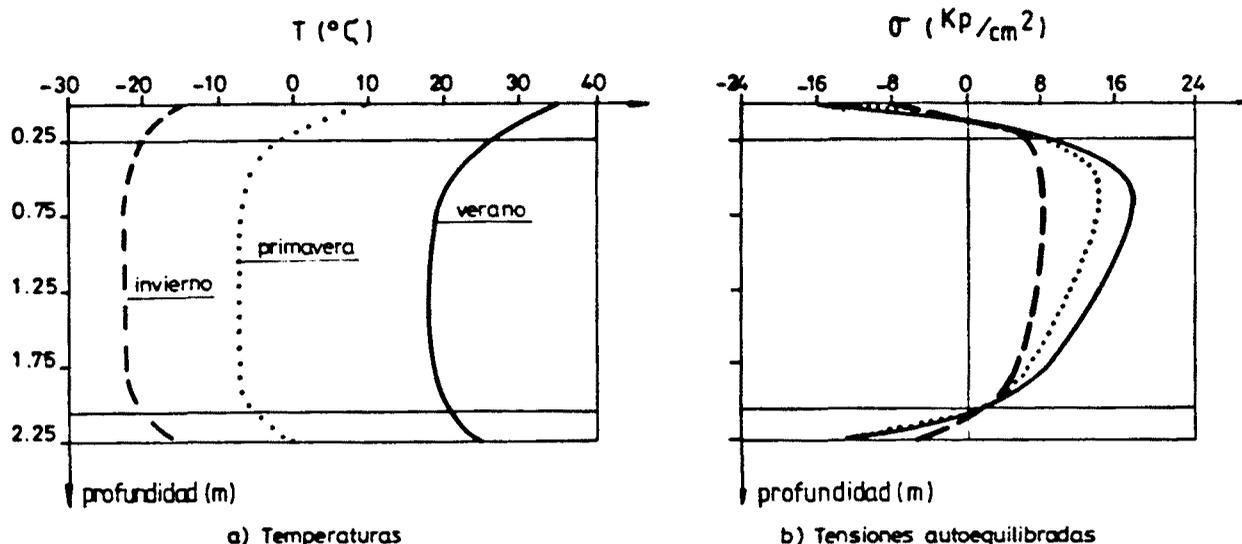


Fig. 1.25.- Distribuciones de temperaturas y de tensiones autoequilibradas a lo largo del eje central del alma correspondientes a máximas curvaturas (Elbadry y Ghali (33)).

Así, un incremento del rango diario de temperatura ambiente supone un incremento, aunque no muy acusado, de las curvaturas térmicas y un incremento considerable del valor de las tensiones longitudinales autoequilibradas; todo ello puede observarse en las figuras 1.26 y 1.27.

Uno de los factores que influye de forma determinante en el fenómeno de la transmisión de calor en puentes de hormigón es la velocidad del viento. El efecto de dicho factor como ya se ha comentado con anterioridad, se engloba en el valor o valores de los coeficientes de transferencia de calor por convección que adoptan las diferentes superficies externas e internas del puente. Los valores de los coeficientes de convección que emplean Elbadry y Ghali en sus investigaciones se recogen en la tabla 1.10 y vienen dados por Kehlbeck (53).

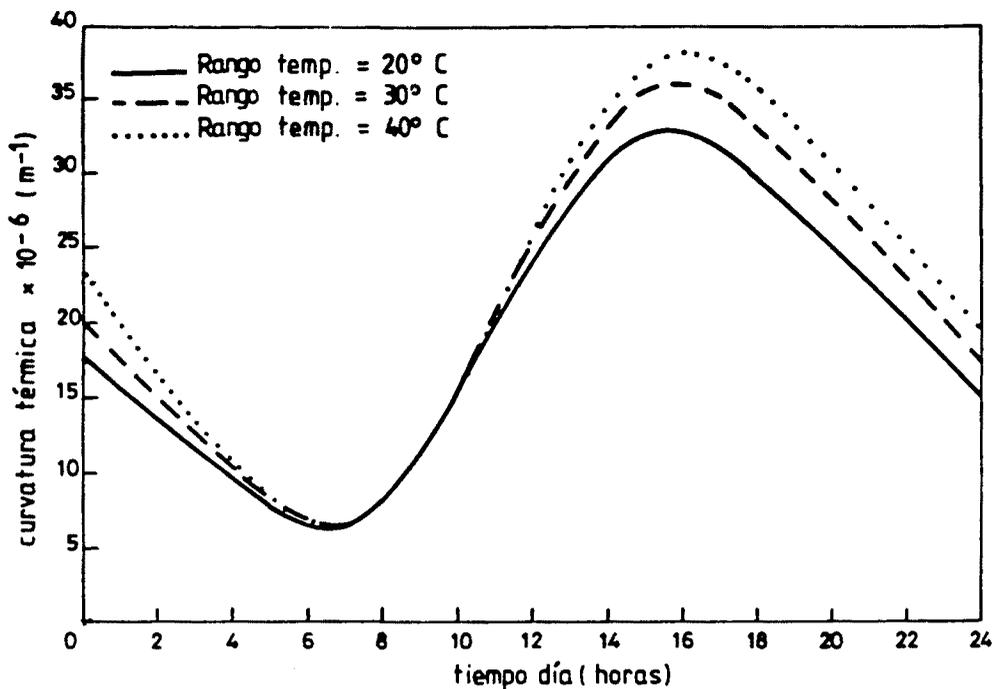


Fig. 1.26.- Variación horaria de la curvatura térmica para diferentes rangos de temperatura ambiente (condiciones de primavera, $\gamma=0^\circ$) (Elbadry y Ghali (33)).

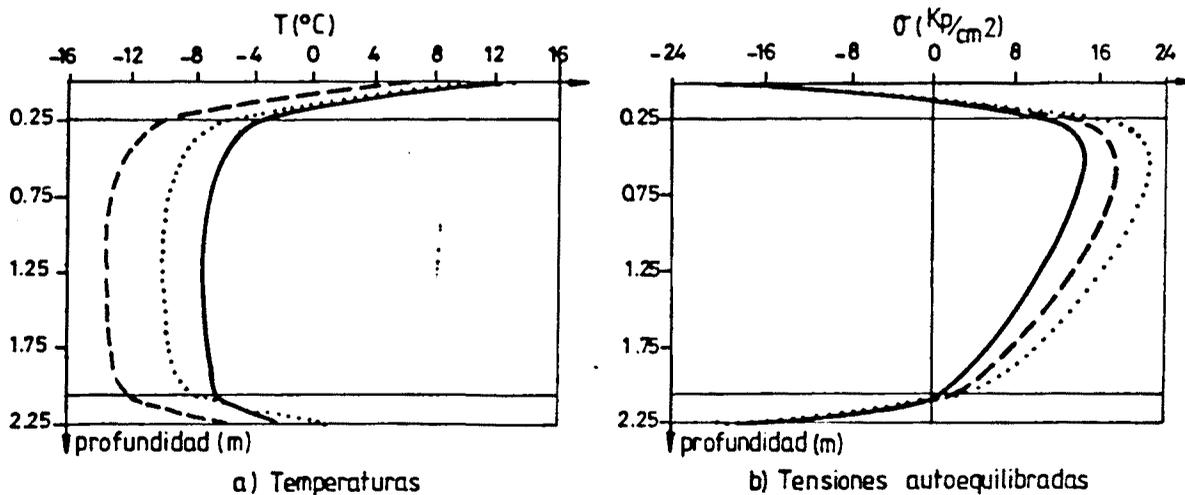


Fig. 1.27.- Distribuciones de temperaturas y de tensiones autoequilibradas a lo largo del eje del alma correspondientes a máximas curvaturas (a 4:00 pm) (condiciones de primavera, $\gamma=0^\circ$) (Elbadry y Ghali (33)).

Valores del coeficiente de transferencia de calor por convección ($W/m^2\text{ }^{\circ}C$)			
Superficie del puente	Velocidad del viento (m/seg)		
	1.0	4.0	12.5
Superficie superior de la losa tablero del puente	8.5	20.0	52.5
Existencia de capa asfáltica	8.8	21.0	56.0
Superficie inferior de la losa en voladizo	6.0	17.5	50.0
Superficies interiores del cajón ($v_{\text{viento}}=0$)	3.5	3.5	3.5
Superficies exteriores de las almas	7.5	19.0	51.5
Superficie exterior de la losa inferior	6.0	17.5	50.0

Tabla 1.10.- Valores del coeficiente de transferencia de calor por convección para diferentes superficies del puente y diferentes velocidades de viento (según Kehlbeck (53)).

En las figuras 1.28 y 1.29 se muestran los resultados derivados del estudio paramétrico del factor velocidad del viento.

En ellas puede observarse que altas velocidades de viento tienden a inducir temperaturas más cercanas a la temperatura ambiente en las superficies externas expuestas al fenómeno de la convección; de ahí que las curvaturas térmicas sean de menor magnitud y, por consiguiente, también lo sean las tensiones de continuidad que se generan en estructuras hiperestáticas. Parece, pues, obvio que, atendiendo únicamente a la consideración de este factor, los puentes emplazados en lugares abiertos expuestos a la intemperie (valles, montañas,...) sufrirán menos efectos perjudiciales debidos a la acción tér-

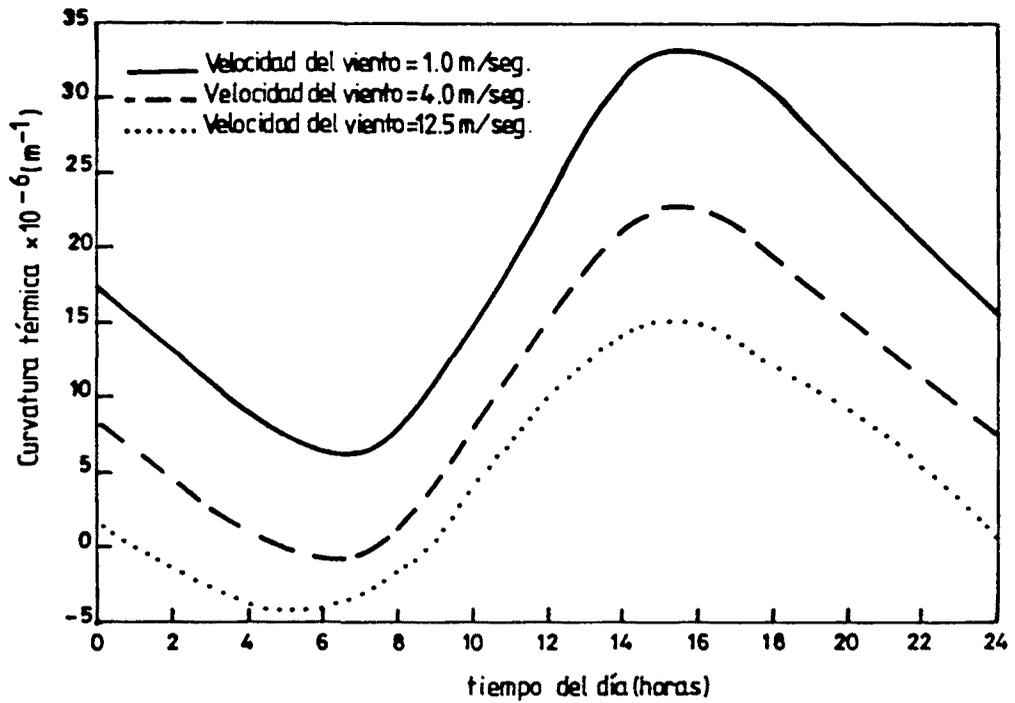


Fig. 1.28.- Variación horaria de la curvatura térmica para diferentes velocidades de viento (condiciones de primavera, $\gamma=0^\circ$) (Elbadry y Ghali (33)).

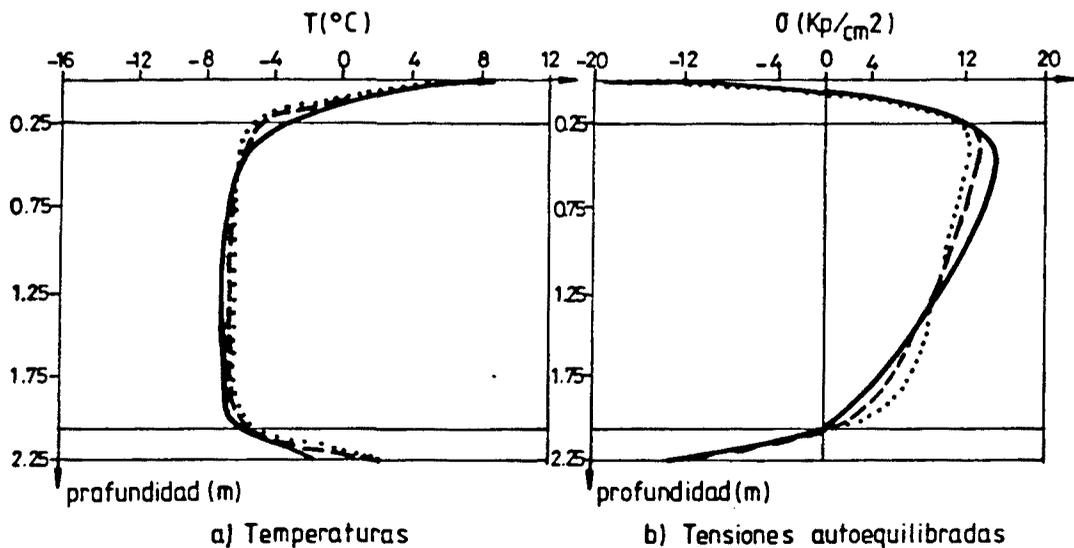


Fig. 1.29.- Distribuciones de temperaturas y de tensiones autoequilibradas a lo largo del eje del alma correspondientes a máximas curvaturas térmicas (a 4:00 pm) (condiciones de primavera, $\gamma=0^\circ$) (Elbadry y Ghali (33)).

mica ambiental que los emplazados en ambientes urbanos, en donde la velocidad del viento suele ser menor.

Como ya se ha indicado anteriormente, la naturaleza y color de las superficies expuestas a radiación solar condicionan, de forma apreciable, las distribuciones de temperaturas en puentes de hormigón. Una capa de rodadura asfáltica o una capa de nieve de pequeño espesor sobre el tablero del puente hacen que las distribuciones de temperaturas y su variación en el tiempo difieran notablemente de las obtenidas en el caso de analizar secciones de puentes en los que la superficie expuesta fuera el propio hormigón estructural.

En la tabla 1.9 puede observarse que el asfalto tiene un factor de absorción más elevado que el del hormigón si bien su conductividad es más baja, lo que hace que la capa de rodadura pueda comportarse como un aislante térmico. También puede observarse que una pequeña capa de nieve reduce drásticamente dicho coeficiente.

Los resultados del análisis de este parámetro, los cuales se presentan en las figuras 1.30 y 1.31, indican que la presencia de una capa de asfalto de 50 mm. de espesor produce un aumento de la temperatura en la superficie superior de la losa tablero del puente y de las curvaturas térmicas inducidas. Por el contrario, la presencia de una fina capa de nieve sobre el tablero hace que las curvaturas térmicas se vean reducidas.

Después de un análisis de los resultados derivados del estudio paramétrico, los autores llegan a la conclusión de que el campo de temperaturas que induce las mayores curvaturas térmicas y los mayores niveles de tensiones autoequilibradas en una sección cajón de un puente de hormigón se desarrolla bajo las siguientes condiciones:

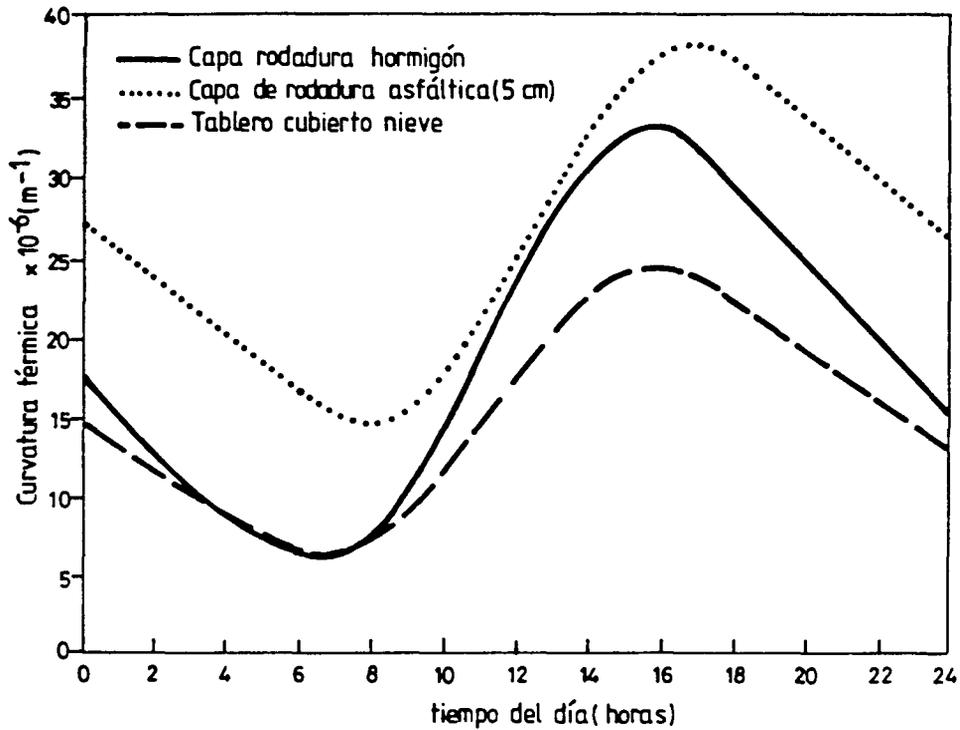


Fig. 1.30.- Variación horaria de la curvatura térmica para diferentes tipos de superficie (condiciones de primavera, $\gamma=0^\circ$) (Elbadry y Ghali (33)).

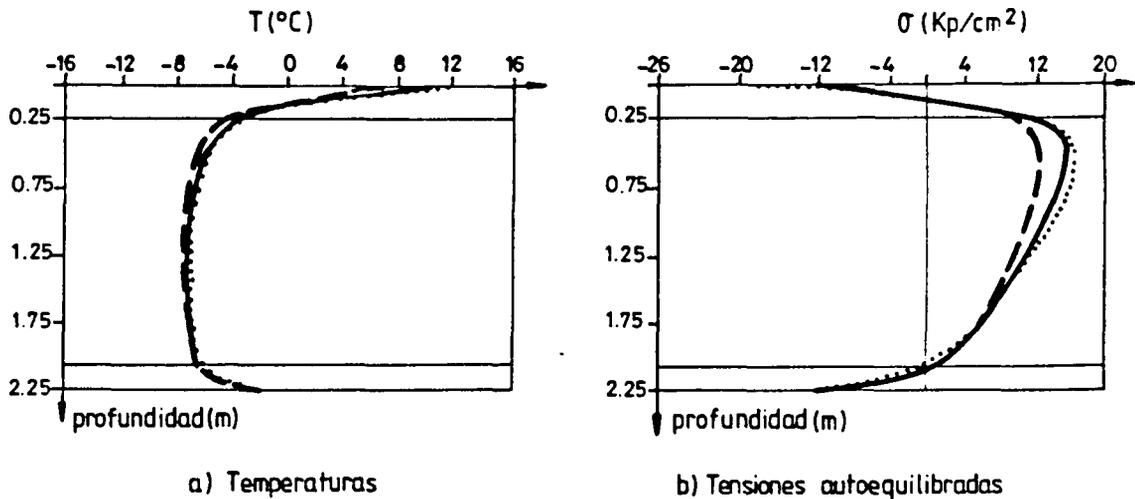


Fig. 1.31.- Distribuciones de temperaturas y de tensiones autoequilibradas a lo largo del eje del alma correspondientes a máximas curvaturas térmicas (a 4:00 pm) (condiciones de primavera, $\gamma=0^\circ$) (Elbadry y Ghali (33)).

- Durante verano, ya que la intensidad de radiación solar incidente sobre el tablero es máxima.
- Cuando el rango diario de temperatura ambiente es elevado.
- Cuando la velocidad del viento es mínima.
- Cuando sobre el tablero de hormigón se extiende una capa asfáltica de rodadura.

Otros trabajos de investigación, similares al realizado por Elbadry y Ghali, se han desarrollado simultáneamente en varias universidades norteamericanas; de entre ellos cabe destacar los estudios de Thepchatri, Johnson y Matlock (92), en la Universidad de Austin, Texas, y los de Berwanger y Symko (12)(13) en la Universidad de Ottawa, centrándose éstos últimos en el análisis del comportamiento de puentes mixtos.

Por último, se citan y revisan brevemente los trabajos llevados a cabo en la Universidad de Lisboa. Reis y Serafim (88) indican que uno de los principales factores, responsable de la existencia de fisuras en presas de hormigón, es el aumento notable de la temperatura debido al calor desprendido en el proceso de hidratación. Para evaluar cuál es la influencia de los cambios de temperatura sobre el estado tensional en presas de hormigón, los autores desarrollan un método que permite cuantificar las tensiones de origen térmico durante la fase constructiva atendiendo a un comportamiento viscoelástico del hormigón. Dicho método se basa en la utilización del concepto de temperatura equivalente, el cual depende del módulo de elasticidad del hormigón E , de la función de relajación $r(t, \tau)$ y de la distribución de temperaturas y su variación en el tiempo $T(x, y, t)$ (Zienkiewicz (98)).

Este mismo concepto fue posteriormente utilizado por Reis y Appleton (89) para evaluar las tensiones autoequilibradas existentes en puentes de hormigón. Como era de esperar, un análisis de los resultados lleva a la conclusión de que, si se considera que el hormigón posee un comportamiento vis-

coelástico, existe una reducción en el valor de las tensiones térmicas autoequilibradas con respecto al valor obtenido en régimen elástico. No obstante, los resultados se basan en la constancia o invariabilidad de la acción térmica siendo ello, a mi entender, una hipótesis no muy realista ya que es evidente la existencia de fluctuaciones diarias y estacionales de las condiciones climatológicas y ambientales y, por consiguiente, de la propia acción térmica.

Por otra parte, no siempre es fácil estimar el tiempo τ a partir del cual la deformación térmica compuesta incide sobre la estructura analizada, dependiendo en la mayoría de los casos del propio esquema evolutivo de la obra, ni elegir el tiempo t para el cual deben ser evaluadas las tensiones térmicas autoequilibradas (a mayor tiempo transcurrido desde la imposición de la deformación térmica, menor será la magnitud de las tensiones autoequilibradas obtenidas).

Debido a estas razones, el autor de esta tesis cree conveniente el obtener las distribuciones de tensiones autoequilibradas haciendo uso de la teoría de la elasticidad lineal. Esta forma de actuar queda, en cualquier caso, del lado de la seguridad y permitirá extraer conclusiones de diseño en lo que se refiere al valor de tales tensiones térmicas.

No obstante, siempre queda abierta una línea futura de investigación basada en el estudio y análisis de la interacción fluencia-acción térmica ambiental. De dicho análisis podrán derivarse conclusiones relativas a la magnitud de las tensiones térmicas inducidas.

1.4.- INSTRUMENTACION DE PUENTES DE HORMIGON PARA MEDIR TEMPERATURAS. ESTUDIOS EXPERIMENTALES.

1.4.1.- Necesidades varias para la experimentación en puentes de hormigón

Hasta este apartado se han expuesto, y desarrollado en algún caso, diversos métodos para la obtención analítica y numérica de distribuciones de temperatura y de tensiones auto-equilibradas en puentes de hormigón y se ha llevado a cabo una revisión crítica de los trabajos de investigación más fecundos, de los que se tiene conocimiento, en torno a esta temática.

Debido a la variabilidad y difícil cuantificación de algunas de las variables que entran en juego en el fenómeno de transmisión de calor en puentes de hormigón, puede ser de interés el corroborar los resultados obtenidos a partir de estudios teóricos con los derivados de la experimentación.

Varias pueden ser las razones o necesidades por las que, en algunos casos, es conveniente llevar a cabo una instrumentación para medida de temperaturas en puentes de hormigón:

- Diseño y disposición de aparatos de apoyo y de juntas de dilatación.
- Procedimiento constructivo: puentes atirantados, avance en voladizo.
- Estudio y obtención de acciones térmicas de diseño: gradientes e incrementos de temperatura media. Comprobación de modelos teóricos.
- Obtención de datos meteorológicos y ambientales relacionados con la respuesta térmica de los puentes.

Algunas de ellas, quizás las más significativas, se han puesto de manifiesto en recientes realizaciones de puentes de hormigón pretensado en nuestro país (Pérez Fadón (78), Manterola y Fernández Troyano (62)).

Los aparatos de apoyo de los puentes deben diseñarse de tal forma que sean capaces de absorber las cargas verticales y horizontales transmitidas por la superestructura y ello pasa, obviamente, por la necesidad de evaluar de forma más o menos precisa los esfuerzos generados por las deformaciones térmicas impuestas a las que se ven sometidos los puentes. Por consiguiente, un dimensionamiento adecuado de los aparatos de apoyo y de las juntas de dilatación debe contemplar la influencia de las variaciones térmicas ambientales sobre el comportamiento estructural del puente. Leonhardt (58) indica que la influencia de los efectos térmicos no debe ser nunca menospreciada de cara al diseño de dichos elementos resistentes -juntas y apoyos- señalando que, en algunos casos, los costes de reparación de tales elementos han llegado a ser, al cabo de unos pocos años de su construcción, del mismo orden de magnitud que el coste inicial del puente en su totalidad.

Recientemente, se ha llevado a cabo en nuestro país la construcción del Puente a la Isla de Arosa. Dicho puente, de longitud total 1980 metros, posee una tipología longitudinal de viga continua constituida por treinta y ocho vanos de cincuenta metros de luz y dos vanos extremos de cuarenta metros. El diseño de dicho puente tiene la particularidad de disponer únicamente dos juntas de dilatación en ambos estribos. Es evidente que, en este caso, los apoyos del puente deben venir condicionados por la no existencia de juntas en toda la longitud del mismo siendo únicamente las juntas extremas las que serán capaces de absorber los movimientos de dilatación-contracción que se produzcan. En un puente de tales características la influencia de la temperatura es considerable ya que los posibles esfuerzos de compresión o tracción a los que se ve sometido el puente no son nada desdeñables; por otra par-

te, la disposición de aparatos de apoyo durante todo el proceso constructivo debe ser la idónea.

Dicha problemática suscitó la idea de instrumentar el tablero del puente para medir temperaturas -sección cajón monocelular- facilitándose de esta forma el control de ejecución de la obra y permitiéndose disponer los apoyos de tal forma que el comportamiento estructural fuera siempre el más adecuado.

Otras realizaciones de puentes de tablero metálico o de hormigón pretensado, construídas algunas de ellas en nuestro país, han evidenciado de forma notable la importancia que la acción térmica ambiental puede adquirir durante el procedimiento constructivo. Puentes atirantados como los de Rande y Barrios de Luna son un claro exponente. Este tipo de puentes y, en general, los construídos por avance en voladizo de luces de vano considerables son muy sensibles a las deformaciones de temperatura. Así, en el caso del Puente Ingeniero Carlos Fernández Casado -Puente de Barrios de Luna- se observó una variación en las flechas a lo largo del día que para fases adelantadas de la construcción del voladizo, rondaba en torno a los 25 cms. (Manterola y Fernández Troyano (62)).

Por otra parte, la puesta en carga de los tirantes así como la nivelación de los carros de avance depende directamente de la temperatura a la que está el puente. Por esta razón, en el Puente de Barrios de Luna se instrumentaron una serie de dovelas y tirantes así como las torres, pudiéndose conocer el gradiente térmico y alargamientos o acortamientos del tablero y tirantes respecto a la temperatura media anual. Con estos datos se obtenía la deformada del puente debido a la variación de temperatura tanto estacional como horaria y se podía llevar a cabo un adecuado y preciso control de flechas durante la construcción del puente.

Es de notar la importancia que, durante el proceso constructivo, puede tener la acción térmica ambiental sobre

pilas o torres de gran altura en puentes dependiendo, fundamentalmente, del azimut del eje longitudinal del puente. No será de extrañar pues que dichas torres experimenten en cabeza corrimientos horizontales del orden de los 15 cms. y superiores.

Si bien los casos de instrumentación expuestos con anterioridad atienden a necesidades particulares de construcción y proyecto, proporcionan una interesante información acerca del comportamiento de los puentes de hormigón frente a los efectos térmicos ambientales. No obstante, en países como Nueva Zelanda o Gran Bretaña, se han llevado a cabo amplios programas de investigación que tenían como objetivo primordial el conocer la influencia de las condiciones ambientales en la obtención de las acciones térmicas de diseño para puentes de hormigón.

Los trabajos de investigación realizados en estos países se basaron, en una primera etapa, en modelos analíticos de transmisión de calor y modelos experimentales en laboratorio. Estos últimos presentan alguna limitación originada por la dificultad de simular las condiciones existentes en el lugar de emplazamiento del puente y fue por ello por lo que se decidió llevar a cabo en estos países campañas de experimentación in situ de puentes de hormigón para medir temperaturas en diferentes puntos de la sección transversal del tablero. Los resultados permitirían contrastar la idoneidad de los diversos modelos teóricos utilizados y fundamentar con mayor rigor científico posibles acciones térmicas de diseño -incremento o decremento uniforme de temperatura y gradientes térmicos-.

1.4.2.- Sistemas de medidas de temperatura

Un sistema para medir temperaturas consta de un transductor de temperatura y del propio equipo de medida. En la actualidad existen también transductores de deformación y de temperatura que proporcionan ambas magnitudes simultáneamente. La existencia de dichos transductores en el mercado actual se debe, no sólo al gran interés que supone conocer la temperatura en un punto y la deformación asociada a esa variación térmica, sino también a que, a menudo es necesario neutralizar los cambios debidos a temperatura en los transductores de deformación.

Transductores de temperatura

Los transductores de temperatura son dispositivos de medida que transforman la magnitud física, en este caso la temperatura, en una señal eléctrica proporcional a dicha magnitud. Actualmente existen cuatro tipos de transductores de temperatura:

- Termopares
- Termómetros resistivos RTD
- Termistores NTC
- Semiconductores

La figura 1.32 muestra los rangos aproximados de temperatura que se obtienen con cada uno de ellos pasando, a continuación a describir de forma breve su funcionamiento y particularidades (Doebelin (30)).

El funcionamiento de los termopares se basa en dos principios fundamentales:

- Al poner dos metales en contacto, aparece una diferencia de potencial si sus dos uniones están a diferente temperatura (efecto Seebeck) (figura 1.33.a).

- Existe un flujo de calor entre dos conductores por los que circula una corriente (efecto Peltier) (figura 1.33.b).

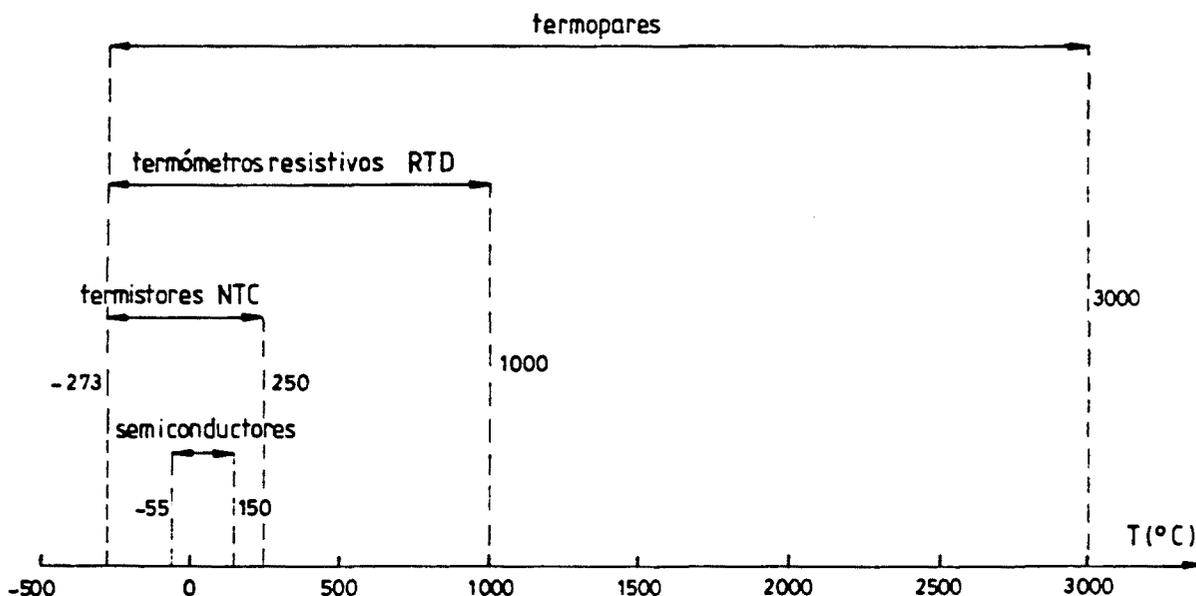


Fig. 1.32.- Transductores de temperatura y rangos aproximados de obtención de temperaturas.

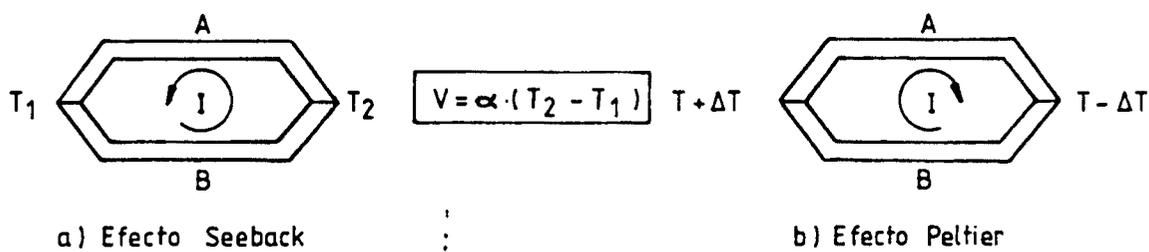


Fig. 1.33.- Fundamentos físicos del funcionamiento de termopares.

De cara a la medición de temperaturas en puentes de hormigón la utilización de termopares presenta algunos inconvenientes. Así, por una parte, es necesaria la disposición de un cable de compensación para no introducir errores en las uniones de cables a lo largo del recorrido hasta el equipo de medida y por otra, la señal eléctrica suministrada -diferencia de potencial entre metales- es de muy pequeña magnitud.

El rango de obtención de temperaturas de los termopares es excesivo si lo que se pretende con ellos es obtener información a cerca de los niveles térmicos que se alcanzan en puentes de hormigón, originados por los condicionantes meteorológicos y ambientales existentes en el lugar de emplazamiento del puente. Ello, sumado al algo elevado coste actual de este tipo de transductores, hace que su utilización vaya cayendo en desuso en los últimos años observándose una transición hacia el empleo de otros tipos de transductores de temperatura.

Los termómetros resistivos RTD se fundamentan en el hecho de cómo varía la resistencia de un hilo conductor al variar la temperatura. Efectivamente la resistencia de un hilo conductor es proporcional a su resistividad y a su longitud e inversamente proporcional a la sección dependiendo dichas características, eléctricas y geométricas, de la temperatura.

$$R = \rho \frac{l}{S} = f(T) = R_0 (1 + a_1 T + a_2 T^2 + a_3 T^3 + \dots + a_n T^n) \quad |1.77|$$

La figura 1.34 muestra curvas resistencia-temperatura para diferentes metales y en ella puede observarse que para rangos de temperatura no muy elevados ($T \leq 200^\circ\text{C}$) la relación entre ambas variables es lineal.

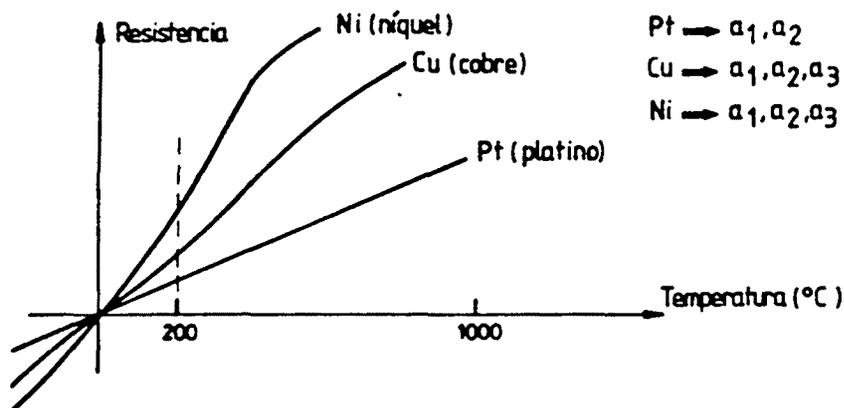


Fig. 1.34.- Curvas resistencia-temperatura de diversos termómetros resistivos RTD (Pt, Cu, Ni).

Una ventaja importante de este tipo de transductores sobre los termopares es que no es necesaria la utilización de un cable especial de compensación desde el transductor hasta el equipo de medida.

Otros transductores de temperatura comúnmente utilizados en la práctica son los termistores. Estos son termómetros resistivos -miden resistencia- en óxidos semiconductores dopados (NiO , Co_2O_3 , Mn_2O_3). La relación entre resistencia y temperatura es de tipo exponencial y puede observarse en la figura 1.35.

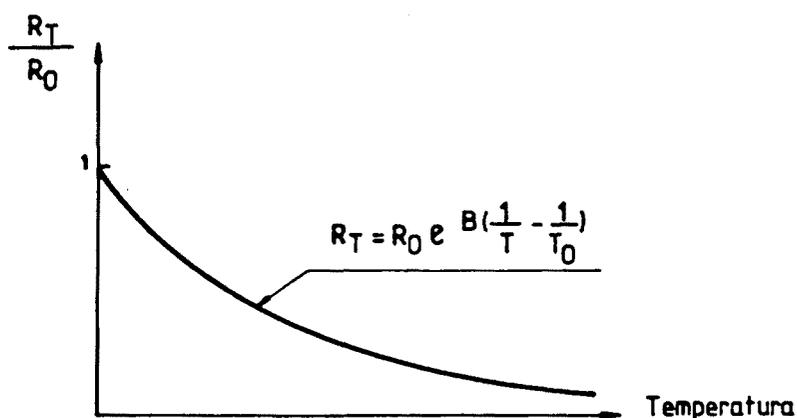


Fig. 1.35.- Curva resistencia-temperatura de un termistor NTC.

Un inconveniente que aparece en este tipo de transductores es precisamente la relación no lineal existente entre resistencia y temperatura lo que obliga a llevar a cabo un procesamiento de datos a posteriori. No obstante, una ventaja que presentan los termistores frente a los termómetros resistivos es que en aquéllos ligeras variaciones de temperaturas suponen elevadas variaciones de resistencia, hecho que no ocurre en el caso de que se utilicen termómetros resistivos.

Por último, otro tipo de transductores de temperatura de reciente aparición son los circuitos integrados medidores de temperatura. Estos son circuitos que convierten directamente la temperatura en intensidad de corriente o en tensión me-

diante convertidores temperatura-corriente o convertidores temperatura-tensión. En ellos se tiene una relación directa entre temperatura y señal eléctrica no siendo necesario un posterior procesamiento de los datos. Por otra parte, su coste es relativamente bajo. El inconveniente principal que presenta la utilización de semiconductores es que el rango de medida de temperaturas es el más pequeño. No obstante en el caso que nos ocupa -la medición de temperaturas en puentes de hormigón- ello no posee ninguna importancia ya que las variaciones de temperatura que experimenta el material debidas a la incidencia de la acción térmica ambiental quedan englobadas dentro del intervalo de posibles medidas de temperatura del circuito integrado (entre -55°C y $+150^{\circ}\text{C}$).

Equipos de medida

Se llama equipo de medida al dispositivo que permite conocer la temperatura a partir de la señal eléctrica que envía el transductor. El equipo será un voltímetro, si con el transductor se dispone de una tensión proporcional a la temperatura, o será un medidor de resistencia si el transductor experimenta una variación de ésta al variar la temperatura. En ambos casos el equipo de medida proporcionará la lectura calibrada en grados.

Algunas veces los equipos de medida incluyen en su interior tablas de linealización en el caso de que la relación entre la señal eléctrica entregada por el transductor y la temperatura no sea lineal.

El conocimiento del perfil de temperaturas en secciones de puentes de hormigón necesita de una instrumentación extensa que proporcione la temperatura en numerosos puntos simultáneamente. Para disponer de esta información de forma automatizada se utilizan los sistemas de adquisición de datos (DAS). Un sistema de adquisición de datos consta de un multiplexor de entradas, el cual se encarga de conectar cada

uno de los canales de entrada a un convertidor analógico-digital. Dicho convertidor actúa como voltímetro y proporciona una salida digital inteligible para el ordenador que controla el sistema. Un diagrama de flujo genérico de un equipo de medida de temperaturas se presenta en la figura 1.36.

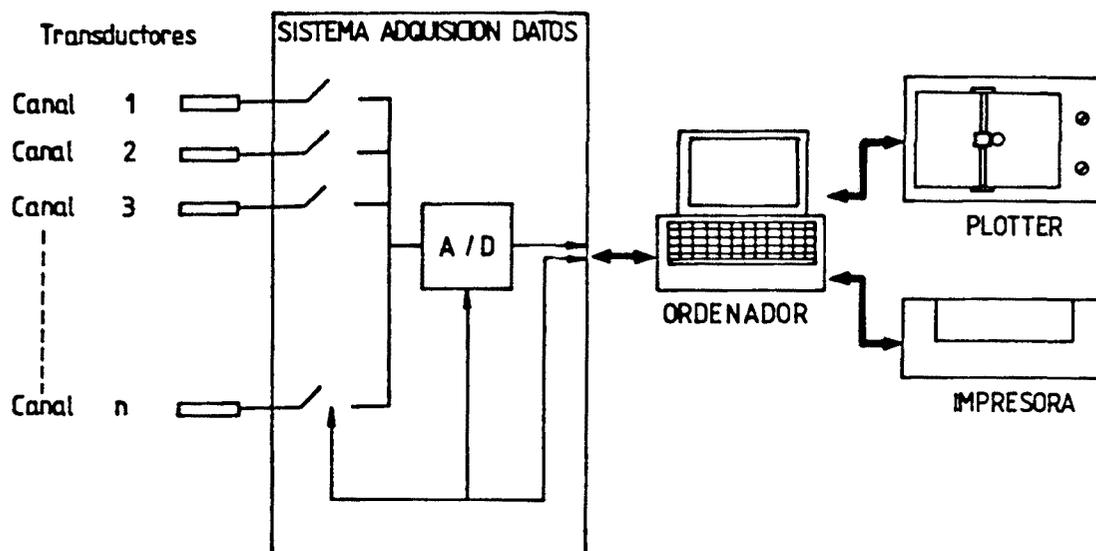


Fig. 1.36.- Diagrama de flujo del equipo de medida de temperaturas.

1.4.3.- Posición de los puntos de medida de temperatura

La posición de los dispositivos de medida de temperatura en secciones transversales de puentes de hormigón debe atender, fundamentalmente, a dos aspectos:

- El objetivo que persigue la medición de temperaturas.
- La propia tipología transversal de la sección a instrumentar.

En lo referente al primer aspecto puede decirse que, en general, los objetivos que persigue una medición de temperaturas en secciones de puentes son dos: la obtención de la temperatura media del puente y la obtención del gradiente térmico al que se ve sometido.

La obtención de la temperatura media necesita, en un principio, de un menor número de dispositivos de medida que en el caso de que se quiera obtener el gradiente térmico. Así por ejemplo en el Puente a la Isla de Arosa se dispusieron cuatro termopares situados en las esquinas del núcleo de hormigón que envuelve a la célula del cajón (figura 1.37).

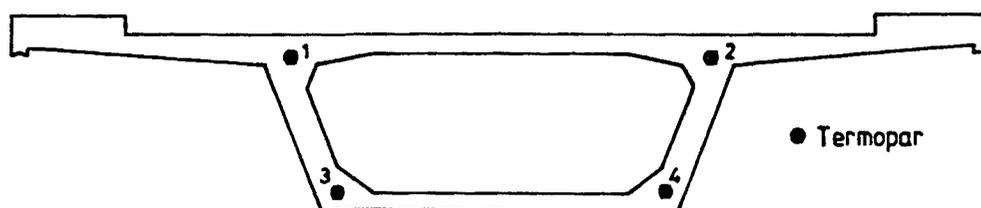


Fig. 1.37.- Disposición de termopares en sección centro vano en el Puente de la Isla de Arosa.

Las temperaturas de los cuatro puntos de medida permiten obtener con suficiente aproximación la temperatura media del puente.

En el caso de secciones macizas la disposición de elementos medidores de temperaturas cara a la obtención de la temperatura media puede llevarse a cabo mediante un número reducido de aquéllos (alrededor de cuatro); no obstante es necesario disponer los dos elementos superiores de medida algo alejados de la superficie superior del tablero de hormigón (figura 1.38).

Actuando de esta forma los puntos de medida 1 y 2 reflejarán unas temperaturas que no vendrán influenciadas de forma acusada por el calentamiento o enfriamiento de la superficie superior del tablero de hormigón; conviene señalar aquí que el rango de variación de la temperatura de la superficie superior es de mayor magnitud que el de la temperatura media del puente. Posteriormente, una simple interpolación lineal permitirá obtener con suficiente precisión dicha temperatura media. Esta forma de actuar puede no ser necesaria en el ca-

so de secciones celulares ya que, en éstas, gran parte del área de la sección se encuentra concentrada en las alas superior e inferior.

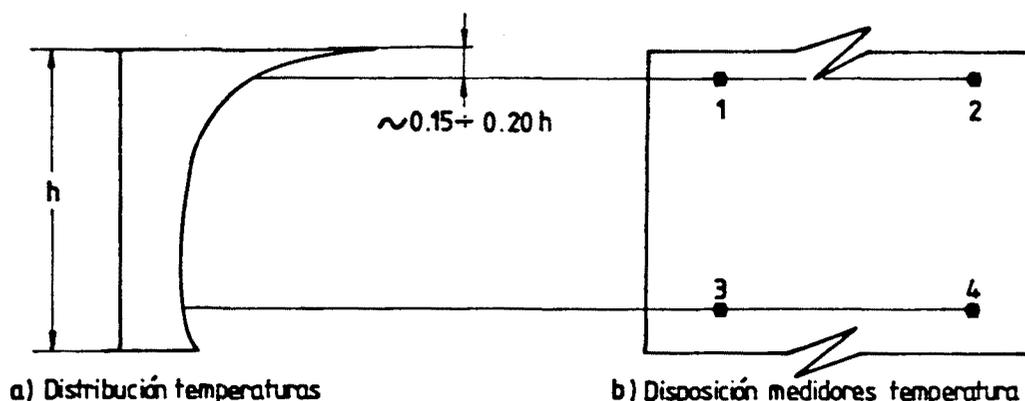


Fig. 1.38.- Disposición de elementos de medida de temperatura en puentes de hormigón en losa maciza para obtención de temperatura media.

En el caso de querer obtener distribuciones de temperatura a lo largo de toda la sección -temperaturas medias y gradientes- ya sea por razones constructivas, de proyecto o teóricas, la instrumentación debe llevarse a cabo mediante un mayor número de puntos de medida.

La figura 1.39 muestra la posición de los dispositivos de medida de temperaturas en la sección transversal del Puente de Barrios de Luna:

Dicha disposición permite reproducir fielmente la distribución existente de temperaturas y mediante una simple integración pueden obtenerse los gradientes térmicos y temperaturas medias del puente en función del tiempo. En general, este tipo de instrumentación según el cual se dispone un elevado número de puntos de medida de la temperatura es el que se ha utilizado con mayor frecuencia en los puentes de hormigón. Prueba de ello son las instrumentaciones que se han llevado a cabo para medir temperaturas en este tipo de estructuras, tanto en nuestro país como en el extranjero (Manterola (61), Wood (85), Hoffman et al. (42), Zichner (97)).

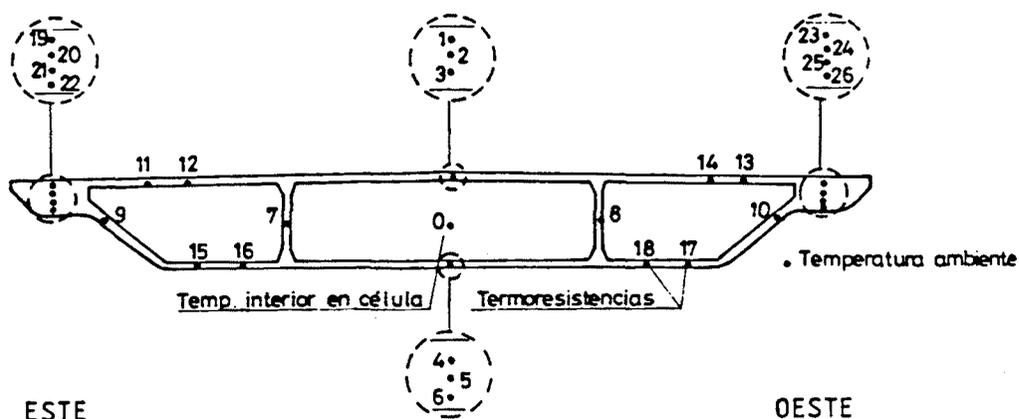


Fig. 1.39.- Disposición de termoresistencias en una de las dovelas del Puente de Barrios de Luna.

El segundo aspecto que puede condicionar, de alguna forma, la colocación de los puntos de medida de temperatura es la propia tipología transversal de la sección a analizar. Atendiendo a dicha tipología y al fenómeno de transmisión de calor que tiene lugar en las secciones comúnmente utilizadas en puentes de hormigón pueden vislumbrarse dos grupos de diferente respuesta y comportamiento térmicos:

- Secciones macizas
- Secciones con huecos

En secciones macizas, siendo el flujo de calor preferentemente unidireccional -según la dirección vertical- se observan diferencias apreciables entre los resultados obtenidos para diversos ejes verticales de la sección. No obstante, la integración de las temperaturas extendida a lo largo de toda el área de la sección del puente da como resultado que el gradiente térmico según la dirección transversal es prácticamente despreciable, tal como se mostrará en siguientes capítulos. Ello es debido, por un lado, a la gran masa de hormi-

gón que debe atravesar el calor y, por otro, a que, en la mayoría de los casos, los puentes de hormigón de sección maciza se diseñan con pequeños voladizos los cuales proyectan sombra sobre los paramentos laterales impidiéndose así la existencia de focos de calor en aquéllos.

En base a estas premisas la instrumentación de un puente de losa maciza puede realizarse mediante la instalación de elementos o dispositivos de medida colocados consecutivamente según el eje vertical del puente que pasa por el centro de gravedad (figura 1.40).

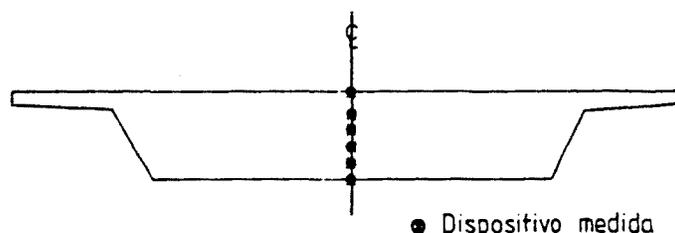


Fig. 1.40.- Instrumentación de puentes en losa maciza.

Para puentes de vigas el fenómeno de transmisión de calor que tiene lugar es similar pudiéndose desprestigiar, en general, el posible flujo térmico en la dirección transversal. No obstante pueden existir algunas diferencias entre los resultados obtenidos para las vigas interiores y los obtenidos para las vigas exteriores dependiendo de las condiciones climatológicas a uno y otro lado del puente y del azimut de éste. La instrumentación idónea debe ser tal que los elementos de medida se dispongan según una línea vertical que coincide con el eje de simetría de la viga.

En secciones tipo losa aligerada o en secciones celulares el comportamiento térmico es algo más complejo y necesitan de una instrumentación algo más amplia con objeto de visualizar todos los fenómenos locales que puedan acaecer. Las razones son varias.

En primer lugar los espesores son menores que los de una sección tipo losa maciza y ello permite la existencia de flujo de calor a través de las paredes de separación de las células o aligeramientos entre sí y con el exterior. Se observa además que en secciones celulares, tanto la losa superior como la inferior se encuentran sometidas a fuertes gradientes térmicos. Por otra parte, aunque en este tipo de secciones los voladizos pueden alcanzar longitudes considerables, también son de una magnitud considerable los cantos totales proyectándose sombra, únicamente, en una cierta longitud parcial de las almas exteriores de la sección; ello genera fuentes de calor que originarán flujos térmicos a través de aquéllas que pueden inducir, en algunos casos, gradientes de cierta relevancia. Por último, no olvidemos que quizás ha sido la tipología transversal de sección en cajón la que ha causado mayores problemas de deterioro en lo que se refiere a la incidencia de la acción térmica ambiental en puentes de hormigón (Leonhardt et al. (56)).

A la luz de estos comentarios una instrumentación óptima de una sección cajón genérica puede venir definida por la disposición de elementos de medida que se presenta en la figura 1.41.

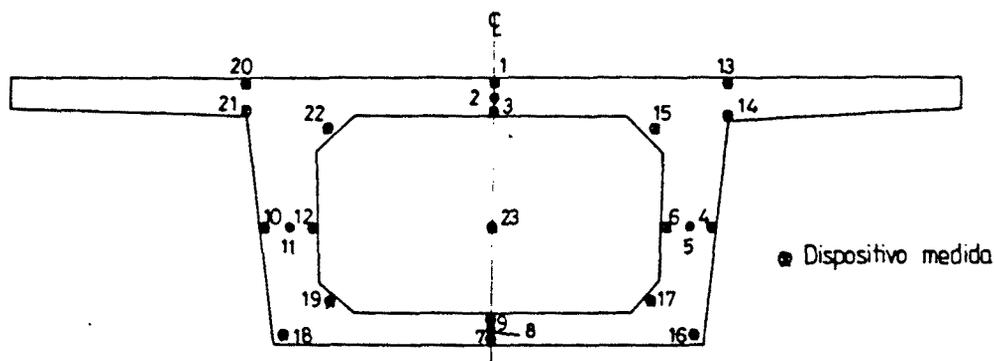


Fig. 1.41.- Instrumentación de puente de sección en cajón.

La colocación de los dispositivos de medida es tal que permite evaluar los gradientes térmicos existentes en alas y almas pudiéndose comprobar en algunos casos que, dependiendo del azimut del eje longitudinal del puente, la respuesta térmica es no simétrica.

Por último cabe comentar que siempre será de interés el disponer una instrumentación externa al puente, la cual proporcionará datos relativos a las condiciones ambientales y climatológicas en las que se encuentra inmerso el puente (radiación solar, temperatura ambiente, velocidad del viento, factor de turbidez,...); ello permitirá correlacionar experimentalmente dichas condiciones con las acciones térmicas a las que se verá sometido el puente.

1.4.4.- Revisión de estudios experimentales en puentes de hormigón in situ para medición de temperaturas

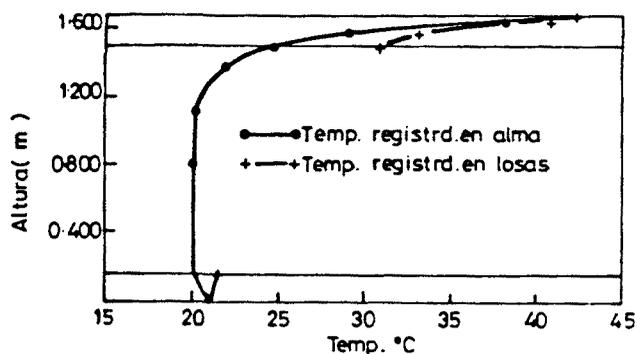
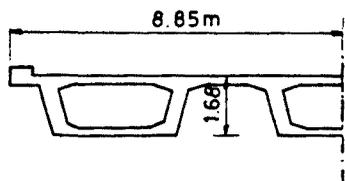
Han sido numerosos los estudios experimentales que se han llevado a cabo en puentes de hormigón in situ para conocer su distribución de temperaturas. El hecho de que las condiciones meteorológicas y ambientales sean diferentes para cada país ha impulsado el que investigadores de diferentes nacionalidades hayan desarrollado amplios programas de estudio en el entorno de la problemática de los efectos térmicos en puentes y, en particular, en los de hormigón. El objetivo más frecuente de tales estudios es, como ya se ha indicado con anterioridad, ahondar en el conocimiento de la acción térmica e intentar acotar y evaluar, si ello fuera posible, su influencia sobre el comportamiento estructural de los puentes de hormigón. A continuación se presentan, de forma breve, los trabajos experimentales de medición de temperaturas más relevantes de los que se tiene conocimiento llevados a cabo en puentes de hormigón.

En Nueva Zelanda, a partir de 1970, se realizaron medidas de temperatura en cinco puentes de hormigón; en tres de ellos la instrumentación fue muy extensa y permitió registrar resultados de mediciones durante cuatro años. De los cinco puentes instrumentados, cuatro eran puentes continuos de hormigón pretensado con sección en cajón y el quinto era un puente de vigas. Las secciones transversales de tres de los cinco puentes, su instrumentación y los perfiles de las distribuciones del campo térmico correspondientes a las máximas diferencias de temperatura, entendidas éstas como las diferencias entre la temperatura de la fibra superior del tablero de hormigón y la mínima del perfil de temperaturas a lo largo del eje vertical para cada uno de los puentes, pueden observarse en la figura 1.42. La tabla 1.11 recoge dichas máximas diferencias de temperaturas, las cuales tuvieron lugar en la estación de verano.

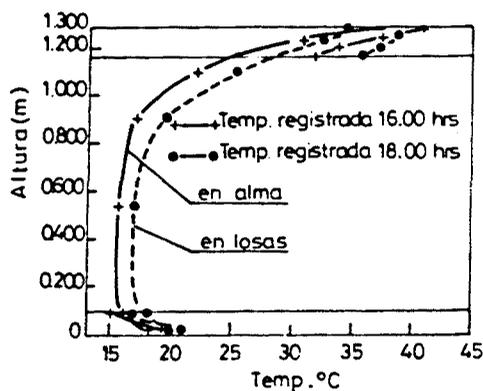
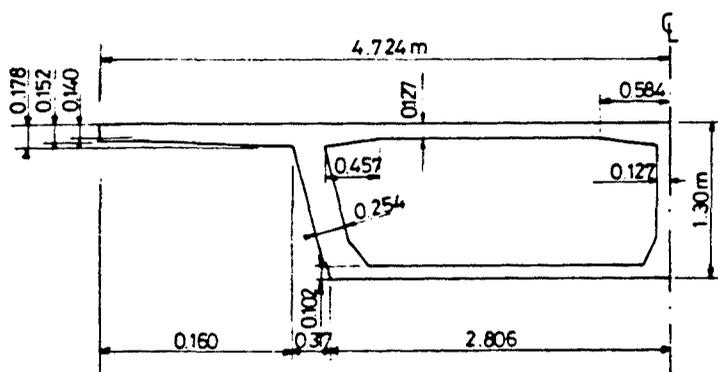
Puente instrumentado	Máxima diferencia de temperaturas (°C)	
	Sin capa asfáltica	Con capa asfáltica
Bowen Street Overpass	22.	21.
Lower Shotover River Bridge	22.	22.
Grafton Gully No. 1 Bridge	24.6	---
Thorndon Bridge	---	17.5

Tabla 1.11.- Máximas diferencias de temperaturas en los puentes instrumentados (Priestley, Buckle y Wood (85)).

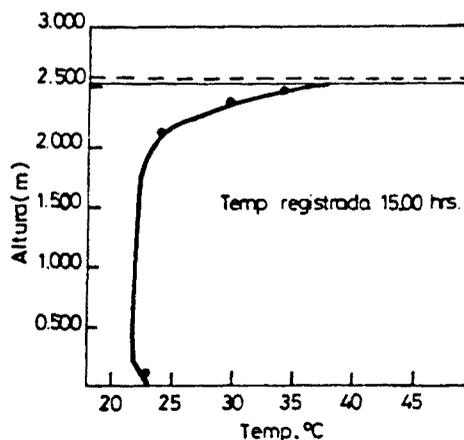
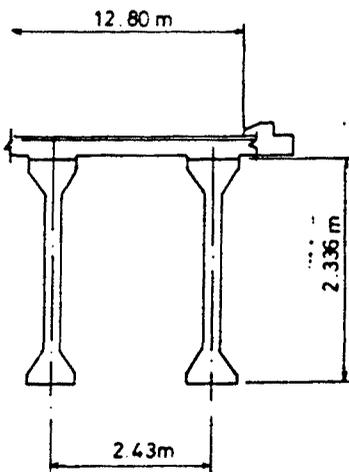
La comparación de estos resultados con los propuestos por el Highway Bridge Design Brief de Nueva Zelanda (70) lleva a la conclusión de que el perfil de temperaturas preconizadas por el mencionado organismo era idóneo para las condiciones climatológicas y ambientales de este país.



a) Bowen Street Overpass. 22 de Enero de 1978



b) Lower Shotover River Bridge. 14 de Diciembre de 1977



c) Thorndon Overbridge. 26 de Enero de 1978

Fig. 1.42.- Puentes de hormigón instrumentados en Nueva Zelanda. Perfiles registrados de temperaturas correspondientes a máximas diferencias de temperaturas (Priestley, Buckle y Wood (85)).

Conviene comentar que, durante la medición de temperaturas, en un número no muy elevado de ocasiones, se registraron diferencias negativas, es decir, la losa superior del tablero del puente se encontraba a menor temperatura que el alma. En algún caso, frente a condiciones extremas, dicha diferencia alcanzó los -10°C , valor éste ciertamente considerable y que puede plantear la necesidad de analizar la respuesta estructural de los puentes de hormigón frente a gradientes térmicos inversos, o negativos. De hecho, y ello se verá con posterioridad en el apartado 1.5 del presente capítulo, algunas normativas internacionales contemplan esta posibilidad (CEB (23), British Standard BS 5400 (18)).

En cuanto a la frecuencia de aparición de altas diferencias de temperatura se dedujo de los resultados obtenidos a lo largo de toda la experimentación que una diferencia de temperaturas por encima de los 15°C tendría lugar, como promedio, en unos veinte días al año mientras que una diferencia de temperaturas que excediera de 20°C ocurriría de tres a cinco días al año.

Simultáneamente, se ha desarrollado en los últimos años en Inglaterra un programa paralelo de investigación sobre el comportamiento térmico de los puentes de hormigón. Para llevar a cabo parte de esta investigación, se instrumentaron diversos puentes con diferentes tipologías transversales, algunas de las cuales se presentan en la figura 1.43.

La instrumentación permitió obtener medidas de temperatura en diversos puntos de la sección y, por consiguiente, conocer cuál era la distribución de temperaturas a lo largo del canto total del puente y cuál era el movimiento longitudinal del puente. El registro de temperaturas se hizo de forma continuada durante períodos que oscilaron entre uno y cinco años. Los resultados derivados de la instrumentación de dichos puentes coincidían substancialmente con los obtenidos en los estudios experimentales de los puentes de hormigón ins

trumentados en Nueva Zelanda. A continuación la figura 1.44 muestra diversas distribuciones de temperatura obtenidas experimentalmente en el Adur Bridge correspondientes a diferentes días del año y diferentes horas.

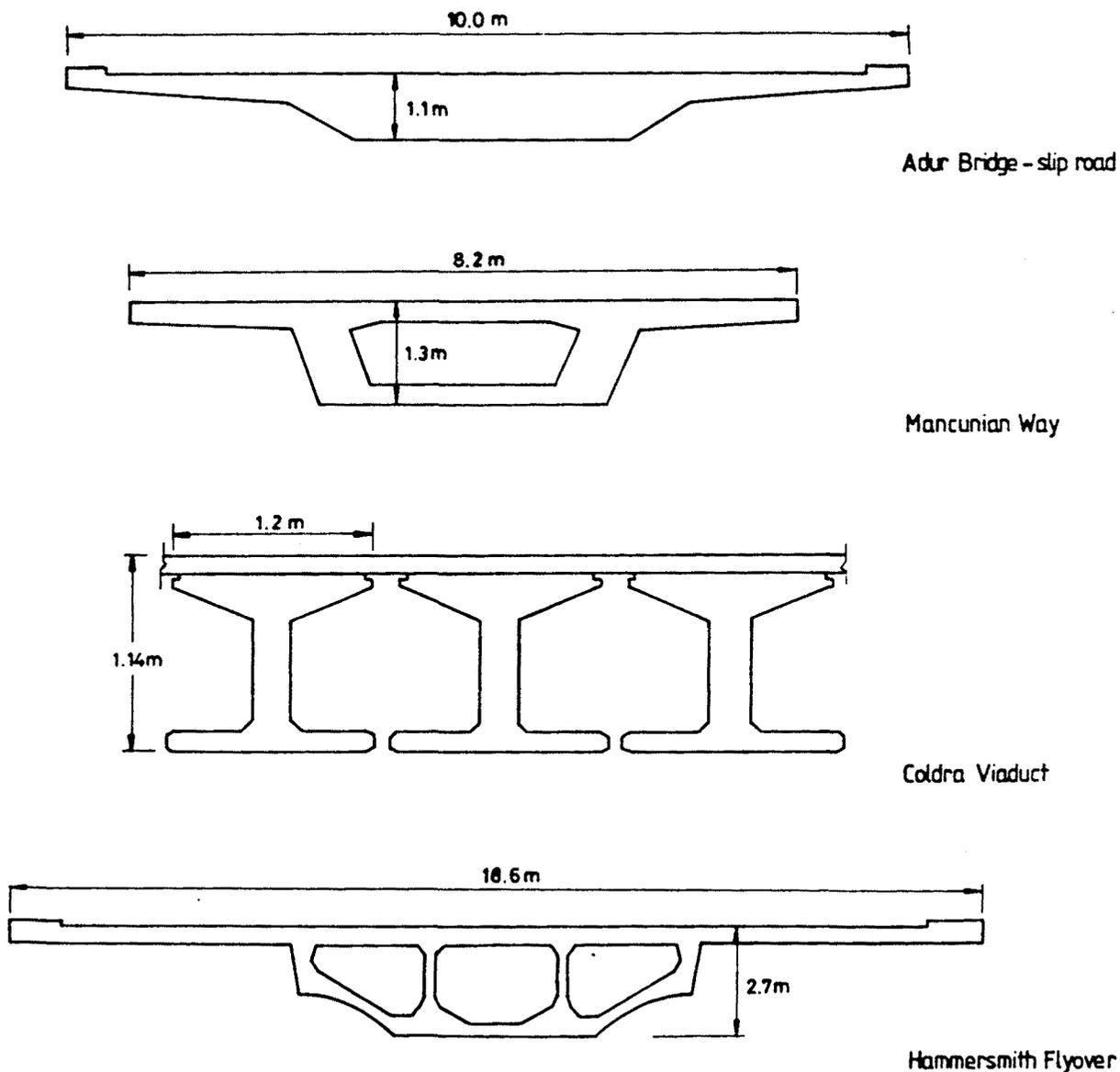


Fig. 1.43.- Secciones transversales de tableros de puentes de hormigón instrumentados (Emerson (36)).

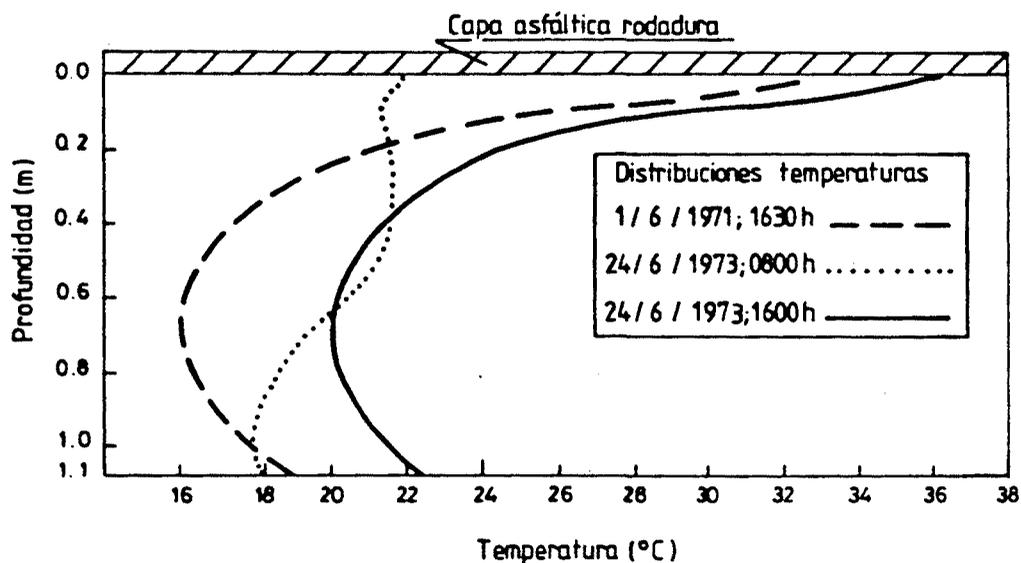


Fig. 1.44.- Distribuciones de temperaturas en el Adur Bridge (Emerson (35) (36)).

Dichas gráficas y el conjunto de resultados obtenidos para el resto de puentes instrumentados evidencian de forma clara el hecho de que las distribuciones de temperaturas en puentes de hormigón son no lineales. Ello se traduce en diferencias máximas de temperaturas entre la fibra superior del tablero y la fibra que se encuentra a la mínima temperatura realmente relevantes. Dichas diferencias máximas de temperatura, tanto positivas como negativas, se recogen en la tabla 1.12.

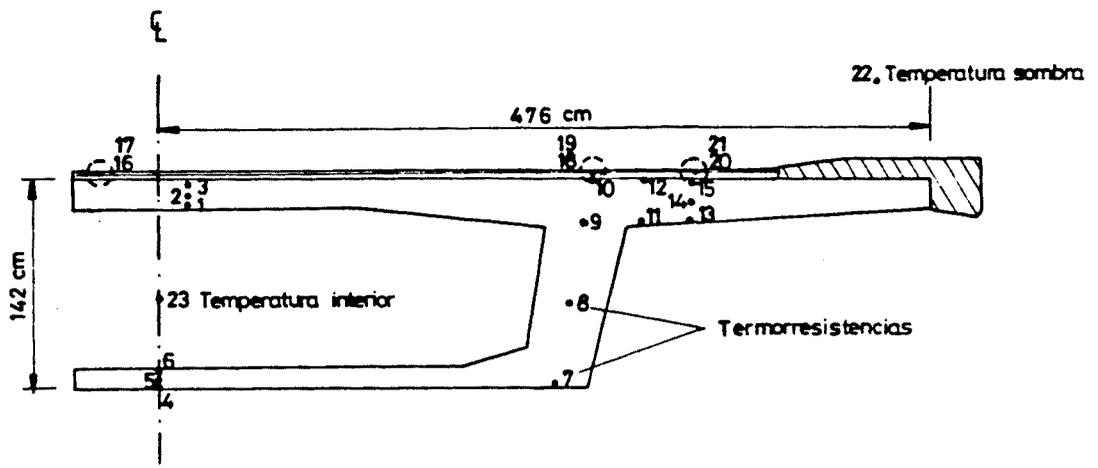
Puente instrumentado	Espesor de capa asfáltica (mm)	Diferencia máxima de temperaturas (°C)	
		Positiva	Negativa
Adur Bridge	64	17.0	-9.0
Mancunian Way	90	14.0	-8.0
Coldra Viaduct	102	13.0	-5.0
Hammersmith Flyover	92	15.0	-8.0

Tabla 1.12.- Máximas diferencias positiva y negativa de temperaturas en los puentes instrumentados (Emerson (35)).

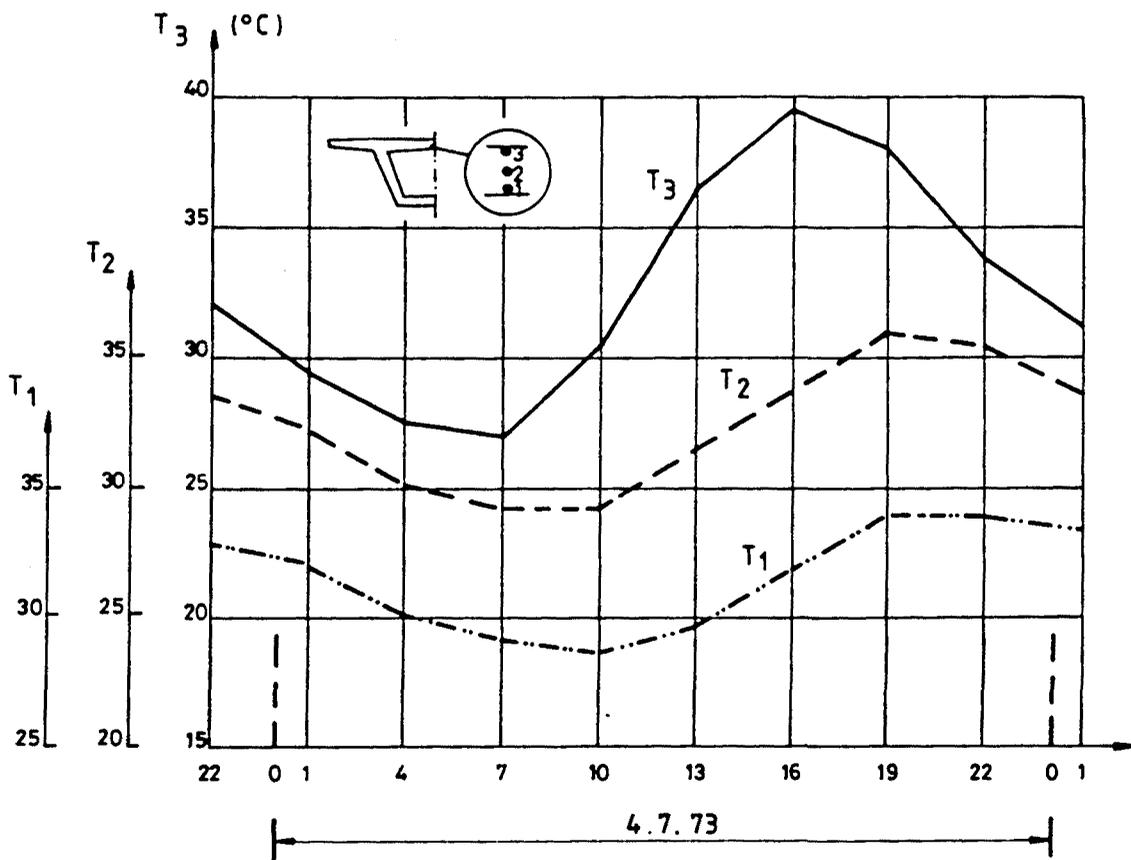
Otros estudios y trabajos experimentales en puentes de hormigón para medición de temperaturas y de deformaciones asociadas a variaciones térmicas han sido realizados en otros países, si bien de una forma algo puntual y no enmarcada dentro de un programa de investigación.

Así por ejemplo, en Alemania, Zichner (97) lleva a cabo, en colaboración con el Departamento de Construcción de Puentes del Ayuntamiento de Frankfurt, la instrumentación de un puente de hormigón pretensado emplazado en esta ciudad alemana. La sección transversal de dicho puente así como la disposición de los termopares puede observarse en la figura 1.45.a. A pesar de que el período de experimentación fue extenso, cercano a los dos años, no se dispone de muchos resultados y los pocos de que se dispone se presentan en la figura 1.45.b.

También en Canadá y en Estados Unidos se han realizado instrumentaciones de puentes de hormigón para medir temperaturas y deformaciones térmicas. En este último país, caben destacar los estudios llevados a cabo por Hawkins y Clark (41) sobre la respuesta térmica y estructural del Denny Creek Viaduct, Washington, y los trabajos de Hoffman, McClure y West (42) en el estudio y experimentación de un puente pretensado de sección en cajón localizado en la Pennsylvania Transportation Research Facilities. En este último puente se estudió, de forma experimental, la posibilidad de existencia de variaciones de temperatura en función del eje longitudinal de la estructura. El posterior análisis de los resultados mostró que dichas variaciones eran mínimas y que, por consiguiente, el flujo térmico longitudinal era prácticamente despreciable. La figura 1.46 muestra la ubicación de los dispositivos de medida de temperatura así como algunos de los perfiles de distribución de temperaturas, según el eje de simetría de la sección, obtenidos a lo largo del período de experimentación (del 25 de Octubre de 1978 al 16 de Octubre de 1979).

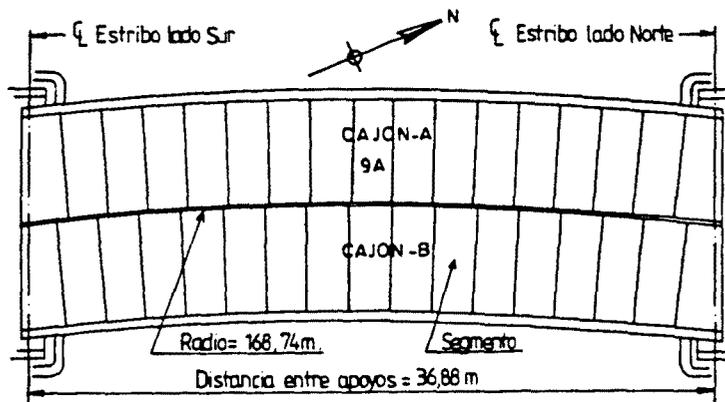


a) Sección transversal del puente, Disposición de los termopares

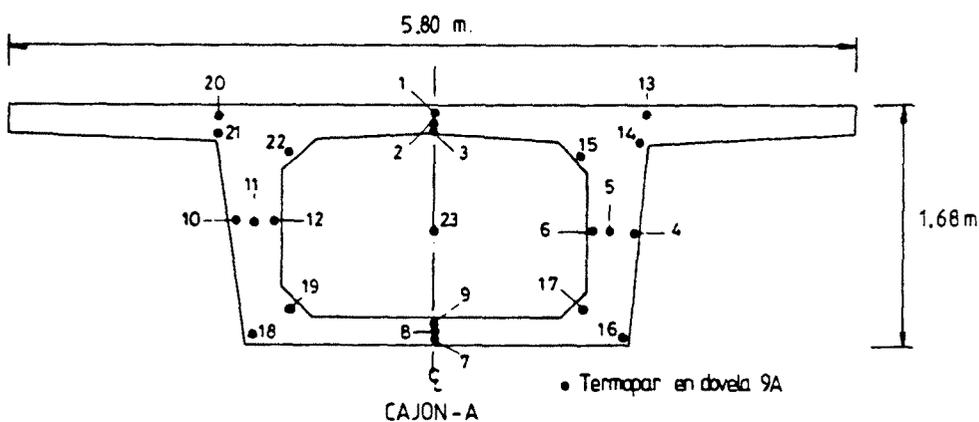


b) Temperaturas registradas en los termopares 1,2 y 3 situados en la losa superior de 25 cm. de espesor el 4 de Julio de 1973

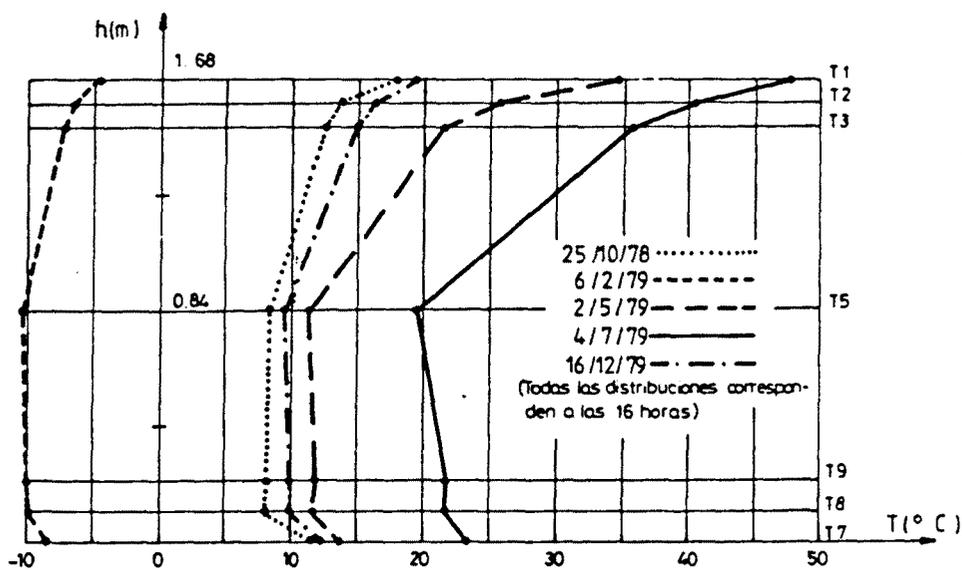
Fig. 1.45.- Instrumentación de un puente de hormigón pretensado emplazado en Frankfurt, Alemania (Zichner (97)).



a) Planta del puente instrumentado



b) Sección transversal típica. Disposición de los termopares en la dovela 9A



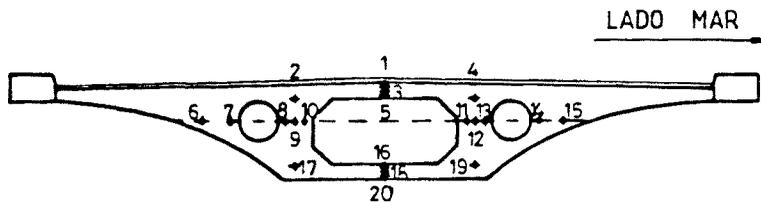
c) Distribuciones de temperaturas en la sección centro vano 9A (lecturas de los termopares 1,2,3,5,9,8,7)

Fig. 1.46.- Instrumentación de un puente de hormigón pretensado emplazado en el estado de Pennsylvania, U.S.A. (Hoffman et alt. (42)).

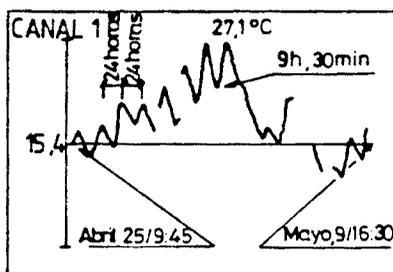
En Francia, la medida de las variaciones diarias de las reacciones de apoyo de los Puentes de Champigny-sur-Yoni y de Tourville-la-Rivière puso de relieve la importancia de las sollicitaciones de flexión debidas a las diferencias de temperatura existentes entre las fibras superior e inferior de un tablero de hormigón (Mathivat (64)). Ello dio origen a diversos estudios teóricos y de investigación experimental en laboratorio. Cabe citar aquí el ensayo para medir temperaturas en la viga cajón de hormigón pretensado del Puente de Champigny sometida a los efectos térmicos y ambientales existentes en el lugar de emplazamiento del puente; dicha experimentación fue llevada a cabo en el Laboratoire Central des Ponts et Chaussées durante los años 1980 y 1981 (54).

Por último, en España, además de la experimentación realizada in situ en puentes de hormigón ya reseñada anteriormente, cabe destacar otros estudios experimentales de cierta relevancia.

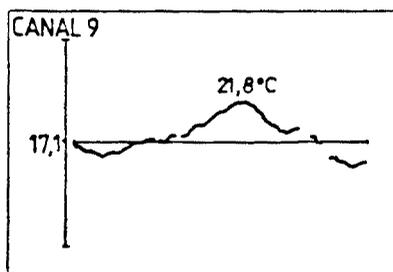
El Departamento de Estructuras de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos de la Universitat Politècnica de Catalunya tuvo la oportunidad de llevar a cabo una prueba de carga controlada del Viaducto lado Sur de la Plaza Alfonso X el Sabio de Barcelona, previa a su posterior demolición. La campaña necesaria de información para poder conocer el estado de los materiales y poder estimar la influencia de la temperatura en el comportamiento tenso-deformacional de la estructura permitió obtener distribuciones de temperaturas a través de la sección transversal del viaducto a lo largo de un período de tiempo comprendido entre el 25 de Abril y el 9 de Mayo de 1984. La totalidad de los resultados obtenidos, así como un análisis detallado de los mismos, quedan recogidos en Aparicio y Casas (7); no obstante, y de forma muy concisa, se hace referencia aquí a algunos de los resultados relativos a las distribuciones de temperaturas existentes en el viaducto. La figura 1.47 muestra la sección transversal del tablero y la ubicación de los puntos de medida de temperatura, así como variaciones térmicas registradas por algunos de los termómetros electrónicos instalados.



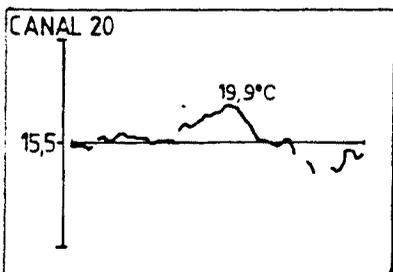
a) Sección transversal Disposición de los termómetros



b) Evolución de la temperatura en el termómetro 1



c) Evolución de la temperatura en el termómetro 9



d) Evolución de la temperatura en el termómetro 20

Fig. 1.47.- Resultados de temperaturas relativas al Viaducto Alfonso X el Sabio (la interrupción de los gráficos se debe a defectos en el suministro de energía eléctrica).

De dicha figura se desprende que la evolución de la temperatura en diferentes puntos de la sección transversal sigue una ley periódica. Por otra parte, es claro que la distribución de temperaturas presenta un perfil no lineal -las diferencias de temperatura observadas entre los puntos 1 y 9 son más acusadas que las observadas entre los puntos 9 y 20-.

En cuanto al gradiente térmico puede decirse que éste no es nada despreciable y que, en base a los resultados de que dispone el autor de esta tesis hasta la fecha, dicho gradiente podría situarse, en esta época del año y para el puente analizado en cuestión, próximo a los 80C.

Asimismo, se tiene conocimiento de que el Departamento de Tecnología de las Estructuras de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos de la Universidad de Santander llevó a cabo la instrumentación de una estructura de hormigón construída para la ampliación del muelle de Victoria Eugenia del puerto de Bilbao en la que, entre otros parámetros, se procedía a la toma de medidas de temperatura en diversos puntos de la sección transversal.

Por último, durante la fase de ejecución del Puente de Alcoy sobre el río Barxell, puente atirantado prefabricado, se estuvo utilizando una instrumentación a base de sensores de temperatura y medidores de tensiones en pila, dovelas y tirantes que, junto con un riguroso y exhaustivo control topográfico, permitían conocer en todo momento las deformaciones reales de la estructura.

1.5.- ACCIONES TERMICAS DE DISEÑO EN PUENTES DE HORMIGON

1.5.1.- Especificaciones y recomendaciones de la normativa internacional relativas a la acción térmica

La mayoría de los códigos y normativas internacionales proporcionan al proyectista reglas prácticas de cara a la consideración de la acción térmica en el diseño de puentes de hormigón.

El presente apartado tiene como finalidad el mostrar cómo consideran dichas normativas internacionales la acción térmica ambiental y cuáles son las propuestas en torno a la definición de las acciones térmicas de diseño.

Adelantemos que existe una gran dispersión en los tratamientos del tema en lo que se refiere a la determinación de los valores característicos de las acciones térmicas. Lógicamente, dicha dispersión puede venir justificada por el hecho de que la normativa, en lo que se refiere a los efectos térmicos ambientales, debería ajustarse a las condiciones metereológicas y ambientales existentes en el país en cuestión.

Las especificaciones y recomendaciones de las normativas que se exponen a continuación se cree son representativas de lo existente en la actualidad en lo referente a la consideración de la acción térmica en el diseño de puentes de hormigón puesto que, con ellas, se cubren grandes extensiones geográficas pertenecientes a diferentes continentes. Al final de este subapartado se presenta una tabla resumen, la cual permitirá llevar a cabo un rápido análisis comparativo entre las normativas vigentes revisadas de los diferentes países.

Australia

El código australiano para diseño de puentes de hormigón exige el que los efectos de la variación de la temperatura media del puente y del gradiente térmico sean considerados en el proceso de diseño.

Las variaciones de la temperatura media vienen especificadas en el código dependiendo sus valores de la localización geográfica del lugar de emplazamiento del puente. Dicha normativa también especifica la consideración de una distribución no lineal de temperaturas imponiendo una diferencia de temperatura entre la fibra superior e inferior del tablero del puente de 24°C . Dicha distribución, lógicamente, inducirá distribuciones de tensiones autoequilibradas. La presencia de capa asfáltica de rodadura sobre dicho perfil de temperaturas se considera despreciable. (NAASRA Bridge Design Specification (72)).

Por otra parte, es de interés señalar que la normativa australiana hace una llamada de atención sobre los posibles efectos de un gradiente de temperaturas horizontal a través de la sección transversal de la superestructura del puente. No obstante, no ofrece ninguna guía relativa a cuándo y cómo debe ser esta acción térmica considerada (Imbsen et al. (44)).

Nueva Zelanda

El código neozelandés Highway Bridge Design Brief (70) indica que en el diseño de puentes de hormigón debe considerarse una variación en la temperatura media del puente de $\pm 20^{\circ}\text{C}$, variación ésta que es independiente del canto de la sección del tablero y de la climatología del lugar de emplazamiento del puente.

En cuanto a la consideración de la existencia de diferencias de temperatura a través de la sección transversal del

tablero en el análisis y diseño estructural es de interés seguir la evolución histórica de las distribuciones de temperaturas de diseño propuestas por la normativa de este país en los últimos años.

Debido a los problemas de comportamiento en servicio observados en el Newmarket Viaduct de Auckland, cuyo origen radicó en la no consideración de la acción térmica de forma adecuada (Priestley y Buckle (85)), se adoptó a partir de 1970 un perfil de temperaturas, para secciones en cajón, como el que se muestra en la figura 1.48.b. Estudios posteriores indicaron que dicho perfil era simplista y se sugirió por parte de diversos investigadores una distribución de temperaturas de diseño tal como la que se muestra en la figura 1.48.c. A partir de 1976, los trabajos teóricos llevados a cabo por Priestley (83), (84) y McQuillan (65), corroborados por mediciones de temperatura en estructuras reales de puentes de hormigón dieron como fruto la distribución de temperaturas de diseño que se presenta en las figuras 1.48.d y 1.48.e y que es la que propone, en la actualidad, la normativa neozelandesa. (Highway Bridge Design Brief (71)).

Como puede observarse en dichas figuras, la distribución de diseño consta de tres componentes:

- La parábola de 5º grado en la que la temperatura T en la fibra superior del tablero de hormigón es función del espesor de la capa asfáltica. Dicho perfil de temperaturas es aplicable a losas, vigas en T y almas y voladizos de secciones en cajón.
- Un gradiente térmico lineal aplicable a losas superiores de tablero sobre células.
- Un incremento lineal de temperatura de 0°C a 1.5°C a lo largo de 200 mm. de la parte inferior de la sección.

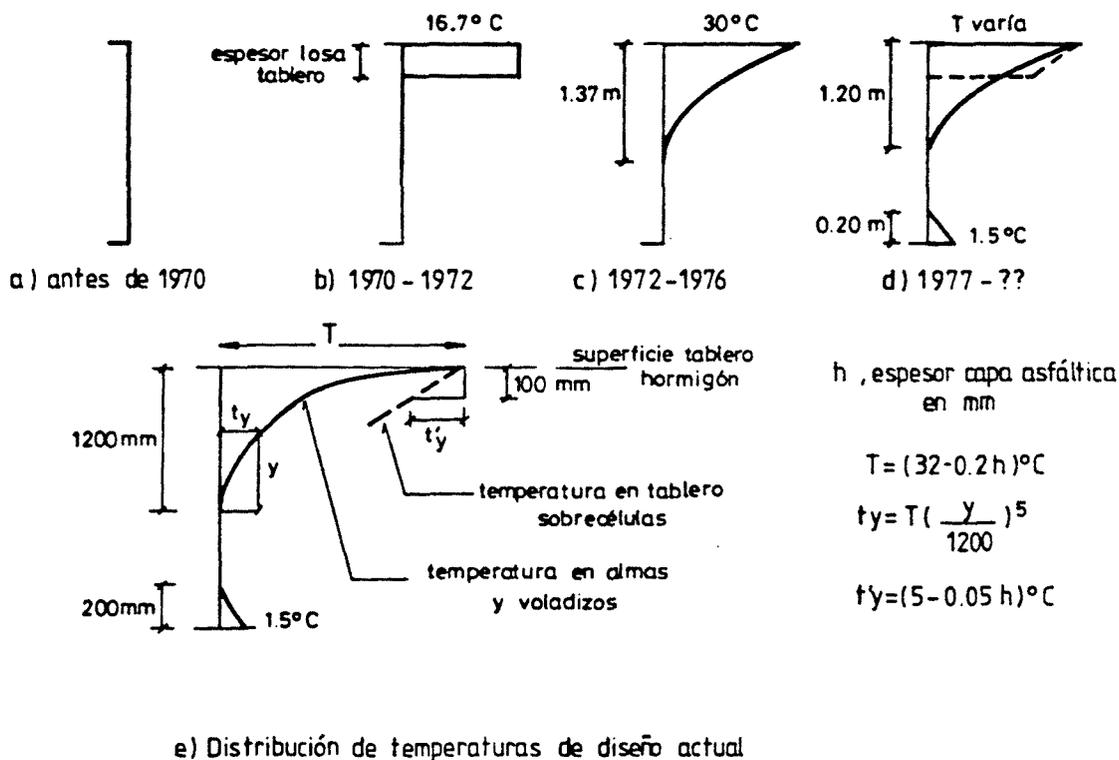


Fig. 1.48.- Distribuciones de temperaturas de diseño para puentes de hormigón en Nueva Zelanda. Evolución histórica (Priestley y Buckle (85)).

Como particularidad propia de esta distribución cabe destacar el hecho de que tal distribución de temperaturas no es la que genera mayores curvaturas térmicas impuestas sino que es aquella para la cual se inducen, en un principio, mayores tensiones de tracción en la fibra inferior del tablero del puente de hormigón (Priestley y Buckle (85)).

Estados Unidos

Las recomendaciones de diseño de puentes en Estados Unidos vienen especificadas en la normativa de la American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO (1)). En algunos estados se han desarrollado, de forma individual, procedimientos propios de diseño para la consideración de efectos térmicos. Por otra parte, en lo que se refiere a la temperatura, las recomendaciones de diseño propuestas por el Post Tensioning Institute (PTI (86)) suelen ser utilizadas en el diseño de puentes de hormigón pretensado.

Las especificaciones de diseño de la AASHTO proponen la consideración de un incremento o decremento de la temperatura media del puente en función de la climatología de su lugar de emplazamiento. Si no se dispone de suficientes datos, los valores de las variaciones de temperatura media del puente recomendados por dicha normativa son los que se presentan en la siguiente tabla 1.13.

Rango temperatura ambiente Localización	Variaciones de temperatura Deformación unitaria
Extremo: 48.8°C Ciertas montañas y lugares desérticos	$\Delta T = \pm 22.2^{\circ}\text{C}$ $\epsilon = 0.00024$
Moderado: 37.7°C Valles interiores y mayoría de localidades de montaña	$\Delta T = \pm 19.4^{\circ}\text{C}$ $\epsilon = 0.00021$
Suave: 26.6°C Zonas costeras	$\Delta T = \pm 16.7^{\circ}\text{C}$ $\epsilon = 0.00018$

Tabla 1.13.- Variaciones de temperatura en puentes de hormigón (AASHTO (1)).

En lo relativo al gradiente térmico, es de destacar que esta normativa no hace ningún comentario al respecto. No obstante, en un reciente programa de investigación subvencionado por la AASHTO y realizado por Imbsen et al. (44) se proponen unas distribuciones de temperatura de diseño no lineales que tienen en cuenta las posibles diferencias de temperatura existentes a través de la sección transversal del tablero del puente.

En cuanto a la normativa del PTI, ésta recomienda en sus especificaciones de cara al análisis y diseño de puentes de hormigón pretensado la consideración de una distribución de temperaturas según la cual la losa superior de los tableros de puentes cajón se encuentra a mayor temperatura que el resto de la sección. La diferencia de temperaturas, a falta de otros datos, se fija en 10°C . Esta distribución tiene similitud con la propuesta por la normativa neozelandesa en 1970 y con la distribución de temperaturas de diseño que propone, en la actualidad, la normativa suiza SIA 160 si bien en ésta el perfil de temperaturas en la losa superior no es uniforme sino que varía linealmente a razón de $0.5^{\circ}\text{C}/\text{cm}$ siendo la temperatura en la fibra superior del tablero de 10°C (Jaccoud (50)).

El Post Tensioning Institute PTI también recomienda en su normativa el considerar los siguientes fenómenos térmicos de cara a una evaluación de las tensiones transversales:

- Un enfriamiento rápido de la losa superior con respecto a la gruesa losa inferior del tablero en zonas cercanas a apoyos intermedios.
- Una diferencia de temperatura entre el interior de las células de una sección en cajón y el ambiente exterior.

La normativa americana del American Concrete Institute (ACI) en su manual Analysis and Design of Reinforced Concrete Bridge Structures (2) indica que el rango de variación anual de la temperatura media del puente debe ser determinado en función de su lugar de emplazamiento. En ausencia de datos meteorológicos y ambientales, el ACI Committee 343 recomienda considerar las siguientes variaciones de temperatura (tabla 1.14).

	Aumento de temperatura	Descenso de temperatura
Clima moderado	16.7°C	22.2°C
Clima frío	19.4°C	25°C

Tabla 1.14.- Variaciones de la temperatura media para puentes de hormigón adoptados por el ACI Committee 343 (2).

En lo que se refiere a la diferencia de temperaturas entre la fibra superior e inferior de la sección transversal del tablero del puente, este manual aconseja el adoptar un gradiente de temperaturas lineal de 11.1°C.

Canadá

En el pasado, la normativa a seguir en este país para el diseño de puentes era la propugnada por la AASHTO, y así ocurre todavía en algunas provincias. No obstante, la provincia de Ontario ha desarrollado recientemente unos criterios para determinar los efectos térmicos, criterios que difieren de forma considerable de los mencionados en las especificaciones de la normativa americana.

En base a mapas de isotermas de máximas y mínimas temperaturas medias diarias, la normativa desarrollada en la pro

vincia de Ontario proporciona las variaciones a considerar en la temperatura media del puente adoptando, en general, una temperatura de 15°C como temperatura inicial una vez ya finalizada la construcción del puente. Dichas variaciones pueden verse afectadas por unos factores de corrección que dependen, fundamentalmente, del canto del tablero del puente.

Por otra parte, para obtener los movimientos del puente y la magnitud de las tensiones originadas es necesario conocer el valor del coeficiente de dilatación térmica. Este, según la normativa de Ontario, puede adoptar distintos valores dependiendo del tipo de árido y del método de curado utilizado en la confección del hormigón.

En cuanto al gradiente térmico vertical, el efecto estructural de éste es considerado a través de la imposición de unas curvaturas térmicas adimensionales que pueden actuar en uno u otro sentido y cuyo valor depende únicamente del canto del tablero del puente. (Ontario Highway Bridge Design Code (74)).

Alemania

La normativa alemana señala que deben ser consideradas en el diseño de puentes de hormigón unas variaciones de la temperatura media del puente de +30°C y -20°C. Dichas variaciones deben ser tenidas en cuenta para calcular las tensiones debidas a la expansión y contracción térmica de la superestructura del puente, adoptando una temperatura de construcción de +10°C. La temperatura media máxima puede reducirse en 5°C en elementos estructurales con cantos iguales o superiores a 70 cms.

En cuanto al gradiente térmico, éste se supone lineal y su valor es de 7°C. Es interesante constatar que la normativa de este país contempla la posibilidad de existencia de un gradiente térmico vertical negativo -inverso- lineal y de

valor -3.5°C (CEB (23)) el cual refleja el fenómeno de enfriamiento de la losa superior del tablero.

En Holanda, varios grupos de trabajo han propuesto los siguientes valores para el gradiente térmico vertical, aunque oficialmente no han sido adoptados por la normativa de este país:

- Gradiente térmico vertical positivo de 10°C .
- Gradiente térmico vertical negativo de 5°C .

Dinamarca

Las normativas utilizadas en este país para el análisis y diseño de puentes de hormigón consideran el efecto de la variación de la temperatura media del puente y la existencia de diferencias de temperatura a través del canto de la sección transversal del tablero.

Debido a la pequeña extensión de este país y a que las variaciones climatológicas son mínimas no existe distinción a la hora de fijar las variaciones de la temperatura media del puente en función de la climatología del lugar de emplazamiento de éste. Así, se adopta una temperatura media mínima del puente de -15°C y una temperatura media máxima de 25°C .

En lo referente a cómo contempla la normativa danesa la existencia de diferencias de temperaturas a través de la sección transversal, aquélla adopta un gradiente térmico lineal positivo de 15°C y uno negativo de -10°C .

Por otra parte considera la necesidad de evaluar los efectos tensionales que generaría una diferencia de temperaturas entre el interior de las células de una sección cajón y el ambiente exterior. Dicha diferencia, a falta de datos experimentales, se fija en 5°C (Proposal for Design and Load Regulations for Highway Bridges (29)).

Suecia

En Suecia, el rango de variación de la temperatura efectiva media del puente se determina a través de la aplicación de una fórmula que considera, como variables principales, el canto total del tablero del puente y la latitud del lugar de emplazamiento de éste adoptando una temperatura inicial de 10°C en el momento de la construcción.

En lo referente a la diferencia de temperaturas existente en el interior de la sección transversal se adopta unos gradientes lineales de 10°C y -5°C , los cuales reflejan respectivamente los fenómenos térmicos de calentamiento y enfriamiento de la losa superior del tablero del puente.

Francia

Las normas de diseño de puentes de hormigón en Francia consideran los efectos estructurales inducidos por las variaciones de la temperatura media del puente y por el gradiente térmico resultante del calentamiento del tablero debido a la radiación solar incidente.

Las variaciones de la temperatura media del puente adoptadas en las normativas de este país son un incremento de temperatura de $+30^{\circ}\text{C}$ y un decremento de -40°C suponiendo una temperatura inicial de construcción que puede oscilar entre 8°C y 14°C .

Los efectos de la fluencia en el análisis estructural pueden ser considerados dividiendo el rango de variación de la temperatura media en dos partes:

- Una variación uniforme de $\pm 10^{\circ}\text{C}$ -a corto plazo, ocurre rápidamente- adoptando el módulo de elasticidad instantáneo.

- El resto de la variación térmica -a largo plazo, ocurre lentamente- suponiendo un módulo de elasticidad tres veces menor que el instantáneo.

La temperatura en el interior de la sección transversal del tablero se supone varía linealmente adoptándose un gradiente de 10°C si la acción térmica actúa conjuntamente con las cargas permanentes y de 6°C si actúan también las sobrecargas de uso de la estructura. En ambos casos, el módulo de deformación a considerar es el módulo instantáneo debido al carácter periódico y diario -los gradientes se generan diariamente- de tales variaciones térmicas (CEB (23), Mathivat (64)).

Gran Bretaña

Las especificaciones de diseño de puentes de hormigón consideran cambios en la temperatura media del puente así como diferencias entre las temperaturas existentes a varias profundidades a través de la sección transversal del tablero.

Las máximas y mínimas temperaturas medias de los puentes se obtienen a partir de los mapas de isoterma de máxima y mínima temperatura ambiente en los respectivos lugares de emplazamiento. Los extremos de dichas temperaturas medias máxima y mínima del puente se fijan en 37°C y -14°C respectivamente. Los valores de las variaciones de la temperatura media del puente pueden verse afectados por un factor corrector que depende del tipo y espesor de la capa de rodadura.

En cuanto al perfil de temperaturas a través de la sección transversal se supone que es no lineal adoptándose en diseño una distribución de temperaturas compuesta de varios tramos lineales con diferente pendiente a diversas profundidades. Dichas profundidades así como las diferencias de temperatura existentes entre ellas dependen del canto total de la sección, de la tipología transversal del puente y del tipo y espesor

de la capa de rodadura. (British Standards Institution BS-5400 (18)).

Por otra parte, la normativa inglesa considera el fenómeno térmico de enfriamiento de la zona superior del tablero del puente. Para ello, en diseño se adopta de nuevo una distribución de temperaturas no lineal formada por diferentes tramos lineales, la cual viene determinada en función de los parámetros anteriormente mencionados.

El coeficiente de dilatación térmico a adoptar para un hormigón ordinario, señala la normativa inglesa, es $12 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$. Dicho valor puede variar en función del tipo de árido y, en particular, si éste es calizo, dicho coeficiente adopta el valor de $7 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$. Lógicamente, dicho coeficiente no afecta a la distribución de temperaturas pero sí afecta a las distribuciones tensionales inducidas por la acción térmica.

España

Las instrucciones EH-82 y EP-80 ((31), (38)) así como las instrucciones relativas a las acciones a considerar en el proyecto de puentes de carretera y ferrocarril ((68), (69)) consideran en elementos estructurales de hormigón unas variaciones térmicas de

$$\pm (20 - 0.75\sqrt{e}) \text{ } ^\circ\text{C}$$

en donde e es el espesor ficticio del elemento considerado, función del área y del perímetro de la sección.

En lo referente a la posibilidad de existencia de diferencia de temperaturas entre paramentos de un mismo elemento, las instrucciones mencionadas anteriormente señalan en su articulado que en aquellos elementos en los que alguna de sus partes pueda estar sometida a la acción directa del sol será necesario considerar una diferencia de temperaturas de

10°C entre la parte más caliente y la más fría. No obstante, queda a juicio del proyectista la elección del gradiente térmico e incluso se puede llegar a prescindir de sus efectos previa justificación.

Por último, decir que las normativas españolas mencionadas adoptan para el coeficiente de dilatación térmica del hormigón el valor de $10 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, independientemente del tipo de árido y del método de curado utilizados en la confección del hormigón.

A continuación se presenta una tabla resumen en donde se recogen las características principales de los tratamientos dados por las normativas en lo que se refiere a la consideración de la acción térmica en el diseño de puentes de hormigón (tabla 1.15).

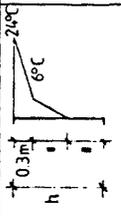
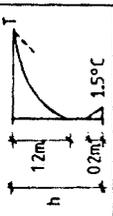
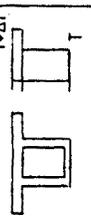
Temperatura media eficaz del puente			Distribuciones de temperaturas. Gradientes verticales			Otras acciones térmicas		
Rango de variación de la temperatura	Variables o parámetros que influyen en el rango	Información climatológica	Notas	Calentamiento del tablero	Enfriamiento del tablero	VARIABLES consideradas	Gradiente horizontal	Gradientes de temperaturas en elementos de la sección transversal
Australia 3 rangos: 0 a 50°C -5 a 50°C -10 a 40°C	Clima. Tipología transversal	Definición de 3 regiones climáticas en función de la latitud y altitud	-----		Ninguno	Canto del tablero	Requiere consideración	Gradientes de temperaturas aplicables a las losas del tablero
Nueva Zelanda Aumento: 20°C Descenso: -20°C	Ninguna	Ninguna	-----		Ninguno	Canto del tablero. Espesor de capa de rodadura	Ninguno	Variación de temperatura aplicable a las losas del tablero
Estados Unidos (AASHTO) Basado en el lugar de emplazamiento. En general: Clima Variación Extremo: +22.2°C Moderado: -19.4°C Suave: -16.7°C	Clima (rango temperatura ambiente). Espesor del elemento	Climas extremos, moderados y suaves	-----	Ninguno	Ninguno	-----	Ninguno	Ninguno
Estados Unidos (PCI)	-----	-----	Las sugerencias no mejoran las recomendaciones de la AASHTO		Requiere su consideración para evaluar tensiones transversales cuando el espesor de la losa inferior es importante	-----	Ninguno	Enfriamiento de la superficie expuesta
Estados Unidos (ACI) Basado en el lugar de emplazamiento. En general: Clima Variación Mod. 16.7°C, -22.2°C Frio 19.4°C, -25°C	Clima	Climas moderados y fríos	-----	Gradiente lineal de 11.1°C	Ninguno	Ninguna	Ninguno	Ninguno
Canadá (Ontario) Temperatura media mínima del puente: 5°C por debajo de la mínima temperatura ambiente media diaria. Temperatura media máxima del puente: 10°C por encima de la máxima temperatura ambiente media diaria	Canto del tablero. Clima	Mapas de isotermas de máximas y mínimas temperaturas medias diarias	Temperatura de construcción de 15°C	Curvaturas térmicas impuestas adicionales en el canto del tablero del puente	Curvaturas térmicas impuestas adicionales en el canto del tablero del puente	Canto del tablero	Ninguno	Gradiente lineal de 15°C en la losa superior del tablero

Tabla 1.15.- Tabla resumen de las recomendaciones y especificaciones de diversas normativas internacionales relativas a la consideración de la acción térmica ambiental en el análisis y diseño de los puentes de hormigón.

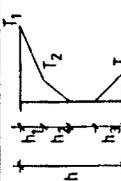
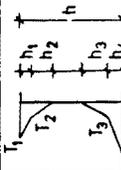
Temperatura media eficaz del puente				Distribuciones de temperaturas. Gradientes verticales			Otras acciones térmicas	
Rango de variación de la temperatura	Variables o parámetros que influyen en el rango	Información climatológica	Notas	Calentamiento del tablero	Enfriamiento del tablero	Variables consideradas	Gradiente horizontal	Gradientes de temperaturas en elementos de la sección transversal
Alemania Aumento máximo: 30°C Descenso máximo: -20°C La temperatura máxima puede reducirse en 5°C en elementos de espesor ≥ 70 cms	Canto del tablero	Ninguna	Temperatura de construcción de 10°C El rango de variación de la temperatura para movimiento del puente es más elevado	Gradiente lineal de 7.0°C	Gradiente lineal de -3.5°C	Ninguna	Ninguno	Ninguno
Dinamarca Temperatura media máxima: 25°C Temperatura media mínima: -15°C	Clima del país	El rango de temperaturas adoptado se basa en las temperaturas ambiente registradas en los últimos 115 años	----	Gradiente lineal de 15.0°C	Gradiente lineal de -10.0°C	Ninguna	Ninguno	Diferencia de temperatura de 5°C entre el ambiente exterior y el interior de las células de la sec. cajón
Suecia Fórmula basada en la latitud del lugar de emplazamiento y del canto del tablero	Clima. Canto del tablero	Fórmula basada en la latitud obtenida a partir de las temperaturas ambiente registradas	Temperatura de construcción de 10°C	Gradiente lineal de 10.0°C	Gradiente lineal de -5.0°C	Ninguna	Ninguno	Ninguno
Francia Aumento: 30°C Descenso: -40°C	No especificadas	Ninguna	Las tensiones se obtienen a corto y largo plazo	Gradiente lineal de 10.0°C con cargas permanentes. Gradiente lineal de 6.0°C con cargas permanentes y sobrecargas de uso	Ninguno	Combinación de acciones	Ninguno	Ninguno
Gran Bretaña Temperatura media máxima: 37°C Temperatura media mínima: -14°C	Clima. Tipología transversal. Capa de rodadura	Mapas de isothermas	----			Espesor de la capa de rodadura. Canto del tablero. Clima.	Ninguno	Gradientes de temperaturas aplicables a las losas del tablero
España Aumento: (20-0.75√e) °C Descenso: -(20-0.75√e) °C	Espesor del tablero	Ninguna	----	Gradiente lineal de 10.0°C	Ninguno	Ninguna	Ninguno	Ninguno

Tabla 1.15 (cont).- Tabla resumen de las recomendaciones y especificaciones de diversas normativas internacionales relativas a la consideración de la acción térmica ambiental en el análisis y diseño de los puentes de hormigón.

1.5.2.- Análisis y comentarios

De un análisis previo de las especificaciones y recomendaciones recogidas en cada una de las normativas comentadas en el subapartado anterior se desprende una conclusión de cierta relevancia y es que los tratamientos de aquellas normativas que abordan la problemática de la acción térmica en el diseño de los puentes de hormigón difieren notablemente entre sí apreciándose diferencias cualitativas y cuantitativas y evidenciándose una clara disparidad en la elección de los criterios de diseño que permitirían abordar el problema de forma satisfactoria.

Por otra parte, los tratamientos de algunas de las normativas se muestran muy simplistas en lo que se refiere a la definición de las acciones térmicas a considerar. Es evidente, en algunos casos, el desconocimiento de la influencia de los efectos térmicos ambientales sobre la respuesta térmica y tensional de los puentes de hormigón -las distribuciones de temperaturas son claramente no lineales- y la poca riqueza de matices en la definición de la acción térmica cuando ésta puede presentar rangos de variación relativamente elevados, dependiendo de numerosos parámetros físicos, ambientales, climatológicos y de emplazamiento del puente.

En cuanto a las acciones térmicas a considerar, la mayoría de las normativas vigentes muestra preocupación por la definición del gradiente térmico vertical positivo y de la variación de la temperatura media del puente. No obstante, es evidente que, en algunos casos, es necesario tener en cuenta otras acciones térmicas que reflejan fenómenos físicos que pueden tener incidencia en la respuesta tensional a nivel sección y nivel estructura. Uno de ellos es la posibilidad cierta de que la fibra superior del tablero del puente se encuentre a menor temperatura que la fibra inferior -gradiente térmico vertical negativo-. Otros, que cobran mayor importancia en puentes de sección en cajón dado que generan tensiones

transversales de cierta consideración (Leonhardt et al. (56)) vienen originados por las diferencias de temperatura existentes entre las losas superior e inferior del cajón y/o entre el ambiente exterior y el interior de la o las células.

Conviene comentar también que, en algunos casos, los puentes de hormigón y, de nuevo fundamentalmente, los de tipología transversal en cajón, pueden verse sometidos a gradientes térmicos horizontales cuya magnitud depende del lugar de emplazamiento, del azimut y de las características geométricas de la sección transversal.

Las normativas españolas ((31), (38), (68), (69)), a tenor de lo expuesto en la tabla resumen 1.15, pueden ser calificadas de simplistas en lo que se refiere a la definición de las acciones térmicas a considerar en el diseño de puentes de hormigón. Las recomendaciones de diseño recogidas en ellas carecen de rigor científico -las variaciones de la temperatura media del puente y el gradiente térmico pueden variar de forma considerable en función de numerosos parámetros, unos con mayor influencia que otros- y obvian todo lo referente a la consideración de otras acciones térmicas que pueden incidir de forma notable en la respuesta tensional del puente.