

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

C A P I T U L O 2

MODELO DE ANALISIS PARA LA OBTENCION
DE LA RESPUESTA TERMICA Y TENSIONAL
DE LOS PUENTES DE HORMIGON

2.1.- INTRODUCCION

Presentado en el capítulo anterior el estado del conocimiento sobre el comportamiento térmico y tensional de los puentes de hormigón frente a la acción térmica ambiental se pasa, a continuación, a exponer y describir el método numérico que se ha utilizado de forma continua en el desarrollo de la tesis de cara a la obtención de la respuesta térmica y tensional a nivel sección de los tableros de puentes de hormigón.

Con posterioridad, los resultados derivados del presente estudio se contrastarán con resultados experimentales y analíticos obtenidos para diferentes puentes de hormigón.

Es de interés señalar que uno de los estudios experimentales que se presentan en este capítulo es consecuencia de la experimentación llevada a cabo por el autor de esta tesis doctoral. El puente instrumentado, el cual salva la riera de Can Estapé, en el término municipal de Rubí, provincia de Barcelona, es un puente losa de hormigón armado de 13.0 metros de luz. Los resultados obtenidos, los cuales se analizan en el subapartado 2.4.2 de este capítulo, han sido útiles para la contrastación propia de la idoneidad del modelo numérico utilizado.

2.2.- METODO NUMERICO UTILIZADO PARA LA RESOLUCION DEL PROBLEMA TERMICO EN PUENTES DE HORMIGON

2.2.1.- Hipótesis adoptadas. Convergencia y estabilidad del método numérico

Recordemos que la ecuación diferencial que gobierna el fenómeno de la transmisión de calor en puentes de hormigón era

$$\nabla^2 T = \frac{\rho \cdot c}{k} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \quad |2.1|$$

la cual es susceptible de ser resuelta aplicando las pertinentes condiciones inicial y de contorno |1.18| y |1.30|, ya analizadas en el capítulo anterior.

Para llegar a dicha ecuación diferencial se han adoptado, desde un punto de vista térmico, las siguientes hipótesis relativas al comportamiento del hormigón:

- Medio continuo
- Medio isótropo
- Medio homogéneo
- Permanencia de las propiedades térmicas

Por otra parte, para analizar el comportamiento de los puentes de hormigón frente a la acción térmica ambiental, se ha supuesto que la generación de calor interno originada por la reacción exotérmica durante el proceso de fraguado ha finalizado.

Para obtener la respuesta térmica se ha adoptado la hipótesis de flujo bidireccional, hipótesis ésta asumida en la mayoría de los estudios de investigación realizados por otros autores. Dicha hipótesis queda corroborada en el siguiente capítulo al analizar la influencia de la variación

del canto sobre las distribuciones de temperaturas que aparecen en diferentes secciones transversales -sección de apoyo, sección a L/4 y sección en clave- en puentes de inercia variable; en ellos se apreciará, de forma clara, la existencia de un equilibrio térmico según el eje longitudinal del puente. Por otra parte, el adoptar flujo bidireccional permitirá visualizar diferentes respuestas térmicas y tensionales según el eje vertical que se contemple y obtener gradientes térmicos transversales que, en algunos casos, podrán no ser despreciables.

El método numérico a utilizar de cara a la resolución del problema térmico en puentes de hormigón se basa en un esquema en diferencias finitas correspondiente al método explícito de solución de ecuaciones diferenciales en derivadas parciales. Como ya se ha comentado en el subapartado 1.3.1.2.2, 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 a lo largo del dominio tiempo debe ser tal que se verifique la condición

$$K \cdot \frac{\Delta t}{\frac{(\Delta x)^2 \cdot (\Delta y)^2}{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2}} \leq \frac{1}{2} \quad |2.2|$$

la cual asegura que el método sea convergente y numéricamente estable.

Sin embargo, es importante destacar que dicha condición no asegura la estabilidad en los nodos exteriores, en donde deben imponerse las condiciones de contorno relativas a absorción de radiación solar y pérdidas o ganancias de calor debidas a convección y radiación térmica. La figura 2.1 muestra la discretización de una zona de esquina de una sección transversal genérica de un puente de hormigón.

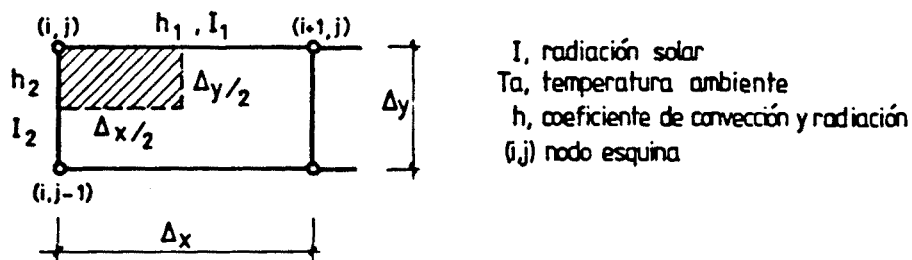


Fig. 2.1.- Discretización en zona de esquina de una sección transversal genérica de un puente de hormigón.

Planteemos el balance energético

$$\begin{aligned}
 & aI_1 \cdot \frac{\Delta x}{2} + k \cdot \frac{T_{i,j-1} - T_{i,j}}{\Delta y} \cdot \frac{\Delta x}{2} - h_1 (T_{i,j} - T_a) \frac{\Delta x}{2} + \\
 & + aI_2 \cdot \frac{\Delta y}{2} + k \cdot \frac{T_{i+1,j} - T_{i,j}}{\Delta x} \cdot \frac{\Delta y}{2} - h_2 (T_{i,j} - T_a) \frac{\Delta y}{2} = \\
 & = \rho \cdot c \cdot \frac{\Delta x}{2} \cdot \frac{\Delta y}{2} \cdot \frac{T_{i,j,\Delta t} - T_{i,j}}{\Delta t}
 \end{aligned}$$

Operando se obtiene que

$$\begin{aligned}
 T_{i,j,\Delta t} = & T_{i+1,j} \frac{2K \cdot \Delta t}{(\Delta x)^2} + T_{i,j-1} \frac{2K \cdot \Delta t}{(\Delta y)^2} + \\
 & + T_{i,j} \left\{ 1 - 2K\Delta t \left[\left(\frac{1}{(\Delta x)^2} + \frac{1}{(\Delta y)^2} \right) + \frac{1}{k} \left(\frac{h_1}{\Delta y} + \frac{h_2}{\Delta x} \right) \right] \right\} + \\
 & + 2a \cdot \frac{K \cdot \Delta t}{k} \cdot \frac{I_1 \cdot \Delta x + I_2 \cdot \Delta y}{\Delta x \cdot \Delta y} + \\
 & + 2 \cdot \frac{K \cdot \Delta t}{k} \left(\frac{h_2}{\Delta x} + \frac{h_1}{\Delta y} \right) T_a
 \end{aligned}$$

Suponiendo que I_1 , I_2 y T_a son valores exactos y que se comete un cierto error en la temperatura de los nodos para el instante t , el error introducido para un instante posterior $t + \Delta t$ puede obtenerse mediante la siguiente expresión

$$\Delta T_{i,j,\Delta t} = \frac{2K \cdot \Delta t}{(\Delta x)^2} \Delta T_{i+1,j} + \frac{2K \cdot \Delta t}{(\Delta y)^2} \Delta T_{i,j-1} + \{1 - 2K \cdot \Delta t \left[\left(\frac{1}{(\Delta x)^2} + \frac{1}{(\Delta y)^2} \right) + \frac{1}{k} \left(\frac{h_1 + h_2}{\Delta y \Delta x} \right) \right] \}$$

Adoptando η como

$$\eta = \max(|\Delta T_{i+1,j}|, |\Delta T_{i,j}|, |\Delta T_{i,j-1}|)$$

debe verificarse que

$$\Delta T_{i,j,\Delta t} \leq \left\{ 2K\Delta t \left(\frac{1}{(\Delta x)^2} + \frac{1}{(\Delta y)^2} \right) + \left| 1 - 2K\Delta t \left[\left(\frac{1}{(\Delta x)^2} + \frac{1}{(\Delta y)^2} \right) + \frac{1}{k} \left(\frac{h_1 + h_2}{\Delta y \Delta x} \right) \right] \right| \right\} \eta$$

La condición de estabilidad exige

$$\Delta T_{i,j,\Delta t} \leq \eta$$

o lo que es lo mismo

$$\left\{ 2K\Delta t \left(\frac{1}{(\Delta x)^2} + \frac{1}{(\Delta y)^2} \right) + \left| 1 - 2K\Delta t \left[\left(\frac{1}{(\Delta x)^2} + \frac{1}{(\Delta y)^2} \right) + \frac{1}{k} \left(\frac{h_1 + h_2}{\Delta y \Delta x} \right) \right] \right| \right\} \leq 1$$

Operando se obtienen dos condiciones:

$$1 - 2K\Delta t \left[\left(\frac{1}{(\Delta x)^2} + \frac{1}{(\Delta y)^2} \right) + \frac{1}{k} \left(\frac{h_1 + h_2}{\Delta y \Delta x} \right) \right] \leq 1 - 2K\Delta t \left(\frac{1}{(\Delta x)^2} + \frac{1}{(\Delta y)^2} \right)$$

$$-1 + 2K\Delta t \left(\frac{1}{(\Delta x)^2} + \frac{1}{(\Delta y)^2} \right) \leq 1 - 2K\Delta t \left[\left(\frac{1}{(\Delta x)^2} + \frac{1}{(\Delta y)^2} \right) + \frac{1}{k} \left(\frac{h_1 + h_2}{\Delta y \Delta x} \right) \right]$$

De la primera desigualdad se deduce que Δt debe ser positivo. De la segunda se obtiene el valor de Δt que hace esta ble el método numérico de resolución:

$$\Delta t \leq \frac{1}{K} \cdot \frac{1}{2 \left(\frac{1}{(\Delta x)^2} + \frac{1}{(\Delta y)^2} \right) + \frac{1}{k} \left(\frac{h_1 + h_2}{\Delta y \Delta x} \right)} \quad |2.3|$$

Recordemos que la condición de estabilidad deducida a partir de la ecuación diferencial de transmisión de calor es

$$\Delta t_1 \leq \frac{1}{K} \cdot \frac{1}{2 \left(\frac{1}{(\Delta x)^2} + \frac{1}{(\Delta y)^2} \right)} \quad |2.4|$$

Por consiguiente

$$\Delta t = \frac{2 \left(\frac{1}{(\Delta x)^2} + \frac{1}{(\Delta y)^2} \right)}{2 \left(\frac{1}{(\Delta x)^2} + \frac{1}{(\Delta y)^2} \right) + \frac{1}{k} \left(\frac{h_1}{\Delta y} + \frac{h_2}{\Delta x} \right)} \Delta t_1 = m \cdot t_1 \quad |2.5|$$

Adoptando valores medios para los coeficientes de transferencia de calor por convección, conductividad y dimensiones de la malla se obtienen valores del parámetro m próximos a 0.6 y 0.7. En consecuencia, parece conveniente adoptar la siguiente condición de estabilidad numérica

$$\Delta t \leq \frac{1}{K} \cdot \frac{1}{4 \left(\frac{1}{(\Delta x)^2} + \frac{1}{(\Delta y)^2} \right)} \quad |2.6|$$

Es de interés destacar la importancia de la ecuación |2.3|. A pesar de que dicha condición de estabilidad no suele citarse en las referencias bibliográficas, es necesario el considerarla puesto que para altas velocidades de viento, lo cual implica elevados coeficientes de transferencia de calor por convección, la solución del problema térmico mediante un esquema explícito en diferencias finitas puede hacerse inestable numéricamente.

La ecuación |2.3| y, de forma aproximada, la ecuación |2.6| imponen una restricción al valor del incremento de tiempo a adoptar. No obstante, por una parte, 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 y, por otra, dadas las dimensiones de anchos, cantos y espesores de una sección genérica transversal de un puente de hormigón, la adopción de una malla en diferencias lo suficientemente tupida no supone

incrementos de tiempo excesivamente pequeños -en general, dichos incrementos se encuentran próximos a las 0.5 horas-.

Ello nos ha hecho inclinarnos hacia la elección de un método explícito de resolución y no implícito que, aunque presenta la ventaja de ser incondicionalmente estable y convergente, requiere de la solución de un sistema de tantas ecuaciones como nodos aparecen en la discretización de la sección, lo cual lleva consigo un aumento excesivo de las operaciones de cálculo de ordenador (Zienkiewicz (100)).

Por otra parte, en el caso que nos ocupa, dada la aleatoriedad de algunos de los datos climatológicos y ambientales introducidos en el análisis térmico (factor de turbidez, radiación solar, temperatura ambiente,...) cabe preguntarse si una mejora en la precisión de la solución, en algunos casos muy pequeña, justifica la adopción de otros métodos numéricos que requieren un aumento excesivo del tiempo de cálculo de ordenador.

Por último cabe hacer algunos comentarios relativos a la elección de la malla de discretización de la sección transversal del puente. En primer lugar, dicha malla debe reflejar de forma fiel los contornos exteriores e interiores que delimitan la sección y debe reproducir de forma realista el comportamiento térmico y tensional en el interior de la sección transversal. Para ello debe utilizarse una malla tal que discretice satisfactoriamente los elementos estructurales de pequeño espesor que puedan conformar la totalidad de la sección transversal del puente (por ejemplo, las almas, losas superior e inferior del tablero y voladizos de una sección cajón).

Así, si bien en puentes losa este problema no es acuciante, sí lo es en la tipología transversal de puentes cajón puesto que es importante conocer la distribución de temperaturas y tensiones a través de almas y alas fundamentalmente. Ello siempre posibilitará la definición de la situación de los puntos críticos de la sección en lo que se refiere a su estado tensional, asociado a la distribución de temperaturas.

Por otra parte, y a efectos de obtención del gradiente térmico vertical positivo -curvatura térmica impuesta- en puentes cajón es muy importante el definir una malla lo suficientemente tupida en las losas superior e inferior del tablero. Debido a la fuerte no linealidad de la distribución de temperatura a través de estos elementos una discretización poco tupida podría introducir errores en los resultados obtenidos para el gradiente térmico. No ocurre así para la obtención de la temperatura media del puente en donde las diferencias encontradas utilizando una malla más tupida u otra menos tupida -en ambos casos, la malla debe reflejar con suficiente precisión la respuesta térmica en las losas del tablero- pueden situarse próximas al 3%. Es decir, de alguna forma, el valor obtenido del gradiente térmico es susceptible de una mayor variación en función de la malla utilizada que el valor de la temperatura media del puente. Por todo ello, se recomienda que en puentes de sección en cajón la discretización sea tal que su incremento de ordenadas -según el eje vertical- sea de 5 a 6 cms. Un mayor refinamiento de la malla conduce a resultados de gradientes prácticamente idénticos.

2.2.2.- Estructuración del programa desarrollado

La formulación en diferencias finitas empleada en la resolución de la ecuación diferencial que gobierna el fenómeno de la transmisión de calor es de todos conocida y ya ha sido expuesta en el capítulo anterior. Es por ello por lo que no se va a incidir aquí en dicha formulación y sí en algunos aspectos particulares del programa numérico confeccionado. Este presenta las siguientes características generales:

- Contempla cualquier tipo de contorno que pueda presentarse en secciones transversales de puentes de hormigón.
- Contempla la posibilidad de refinamiento de mallas para encajar cualquier tipología transversal y analizar con mayor detalle determinadas zonas.

- Requiere poco tiempo de CPU si se compara con otros métodos numéricos (método de los elementos finitos, método implícito de diferencias finitas,...). Recordemos que el período de tiempo analizado debe extenderse a 72 horas para que así la influencia de la condición inicial, fijada a priori, vaya desvaneciéndose (Zichner (97), Elbadry y Ghali (32), (33) CEB (23)).
- Facilidad en la entrada de datos debiendo ser amplia y dejando libres la gran mayoría de los parámetros ambientales, físicos y estructurales que entran en juego en el fenómeno de la transmisión de calor.

El esquema del programa, denominado DTTMF, es relativamente sencillo. Consta de un programa principal desde el cual se llama a las diferentes subrutinas que conforman dicho programa en su totalidad. La figura 2.2 muestra el correspondiente diagrama de bloques.

A continuación se describe de forma sucinta cada una de las subrutinas de que consta el programa.

Subrutina Data

Aporta los datos relativos a la discretización de la sección mediante una malla en diferencias finitas definiendo los nodos por su abscisa y su código, el cual indica la superficie a la cual pertenece dicho nodo. Posteriormente se introduce la temperatura inicial para cada uno de los nodos de la malla y las propiedades térmicas y mecánicas del hormigón -conductividad, densidad, calor específico, coeficiente de absorción, emisividad, coeficiente de dilatación térmica y módulo de elasticidad-.

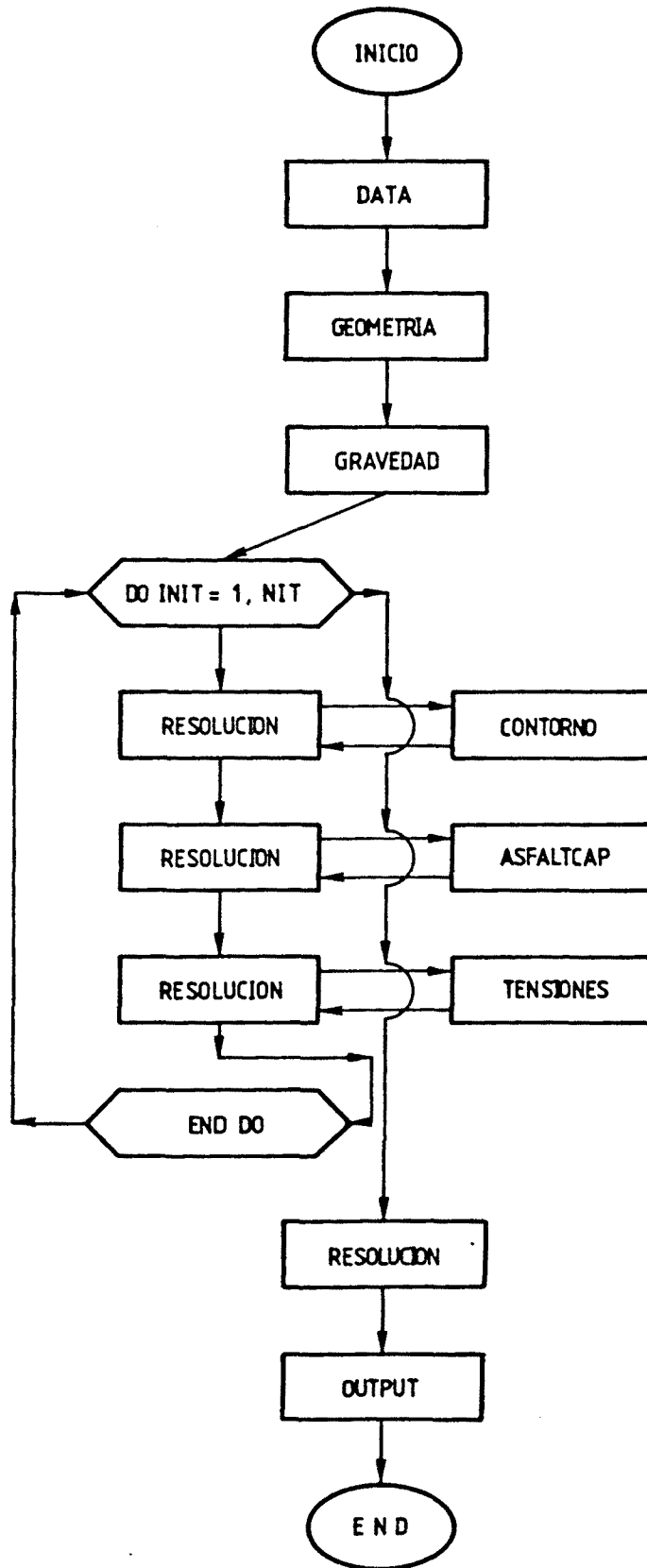


Fig. 2.2.- Diagrama de bloques del programa DTMF utilizado en el estudio térmico y tensional de tableros de puentes de hormigón.

A continuación se introducen como dato los diferentes coeficientes de convección térmica en cada una de las superficies expuestas dependiendo de la velocidad del viento. Los valores adoptados por dichos coeficientes en el presente estudio son los propuestos por Kehlbeck en (53) (ver tabla 1.10).

Por último se introducen los datos necesarios para poder evaluar la radiación solar y la temperatura ambiente en cualquier instante del día. En el apartado siguiente se hablará de ambos parámetros ambientales y de su obtención e implementación numérica.

Si existe capa asfáltica de rodadura deben introducirse las propiedades térmicas del asfalto y su temperatura inicial. Las condiciones a imponer en la interfase asfalto-hormigón se verán con posterioridad en el apartado siguiente del presente capítulo.

Subrutina Geometría

Mediante esta subrutina, básica en el desarrollo del programa, se pueden conocer los nodos que circundan a cada nodo de la malla. La aplicación de esta subrutina permite una entrada de datos muy sencilla -nodo, abscisa del nodo y código del nodo- y acelera de forma considerable la resolución del problema (Peñalva (77)).

Subrutina Gravedad

Dicha subrutina obtiene, en función de la geometría de la sección, las coordenadas del centro de gravedad, el área y momentos de inercia respecto a los ejes principales de inercia. En el caso de secciones celulares o aligeradas dicha subrutina permite conocer el perímetro y volumen de cada una de las células o aligeramientos, datos necesarios para poder evaluar la variación de la temperatura interior; de ello se hablará con posterioridad en el siguiente apartado.

Subrutina Resolución

Esta subrutina calcula la temperatura de todos los no dos de la sección para todo instante. El código asignado a cada nodo direcciona el programa hacia una ecuación en diferencias finitas correspondiente al nodo en cuestión (nodo in terior, nodo perteneciente a superficies exteriores con o sin radiación incidente y nodo perteneciente a superficies interiores). Desde esta subrutina se llama a la subrutina Con torno la cual permite obtener para cada instante las condi ciones de contorno relativas a la radiación y a la temperatu ra ambiente.

En el caso de que exista una capa asfáltica de rodadu ra se llama a la subrutina Asfaltcap, la cual permite intro ducir de forma correcta la condición de contorno en la fibra superior del tablero. De esta forma, conocidos todos los pa rámetros climatológicos y ambientales y habiendo calculado previamente el coeficiente de radiación térmica para cada uno de los nodos emplazados en los contornos exterior o interior de la sección se está ya en disposición de obtener la tempe ratura de todos los nodos de la malla en un instante cual quiera.

Posteriormente se procede a calcular la tensión auto-equilibrada primaria para cada uno de los nodos -tensión inducida por la no linealidad de la distribución de temperaturas- en ese mismo instante. Para ello se llama a la subrutina Tensiones. El procedimiento a seguir para obtener tales tensiones longitudinales a nivel sección es el descrito en el apartado 1.3.2.1 del capítulo anterior. Primeramente se obtienen las curvaturas térmicas según ambos planos princi pales de inercia y la deformación media de la sección los cuales definen un plano de deformaciones equivalente al cam po de deformaciones inducido por la distribución de tempera turas, en general no plana. El hecho de adoptar la hipóte sis de deformación plana hace que la diferencia de deforma-

ciones originadas por la distribución no plana de temperaturas y por el plano de temperaturas genere una distribución de tensiones longitudinales autoequilibradas, que será no lineal

$$\sigma(x,y) = E[\epsilon_0 + \psi_x \cdot y + \psi_y \cdot x - \alpha \cdot T(x,y)] \quad \text{No lineal} \quad |2.7|$$

Subrutina OUTPUT

La salida de resultados presenta varias opciones. En general, ésta ofrece los siguientes:

Para cada intervalo de tiempo:

- Temperaturas en todos los nodos de la sección.
- Tensiones longitudinales autoequilibradas en todos los nodos de la sección.
- En el caso de existencia de aligeramientos o células, temperatura en el interior de éstos.
- Gradientes según los dos planos principales de inercia -curvaturas térmicas impuestas- y temperatura media de la sección -deformación media de la sección-.

Al final del período de tiempo total analizado:

- Máximos gradientes según los dos planos principales de inercia e instantes para los cuales acaecen dichos máximos -máximas curvaturas térmicas impuestas-. Asimismo se presentan las distribuciones de temperaturas y tensiones correspondientes a dichos instantes.

- Máximo incremento relativo diario de la temperatura media de la sección -máximo rango de variación diaria de la temperatura media o, lo que es lo mismo, expansión eficaz diaria del puente por unidad de longitud-.

- Máxima tensión longitudinal autoequilibrada de tracción inducida en el hormigón e instante en el cual aparece dicha tracción máxima. Asimismo se presenta la distribución de tensiones longitudinales autoequilibradas a través de la sección, correspondiente a tal instante.

En el anejo 1 se presenta un listado del programa DTTMF, el cual se encuentra dotado de extensos y minuciosos comentarios para facilitar la comprensión del mismo.

2.3.- IMPLEMENTACION NUMERICA DE DIVERSOS PARAMETROS AMBIENTALES, FISICOS Y ESTRUCTURALES. PARTICULARIDADES

En este apartado se incide en la evaluación e implementación numérica de diversos parámetros de diferente índole los cuales, por su importancia de cara a la respuesta térmica y tensional de los puentes de hormigón, son merecedores de analizarse con mayor profundidad. Estos son:

- La temperatura ambiente
- La radiación solar
- La existencia de capa asfáltica
- La evolución de la temperatura en los huecos de las secciones aligeradas y celulares.

La implementación de tales parámetros es, en algunos casos, novedosa y permite un análisis particularizado del puente frente a los efectos térmicos ambientales, tanto en diseño como en comprobación.

2.3.1.- La temperatura ambiente

Este parámetro climatológico interviene de forma decisiva en las condiciones de contorno a imponer en las superficies exteriores del contorno de la sección. Recordemos que la pérdida de calor por convección y radiación térmica en el perímetro externo de la sección es proporcional a la diferencia de temperaturas existente entre los nodos situados en dicho perímetro y el ambiente exterior (ecuación | 1.30 |).

Las funciones empleadas con más asiduidad para modelizar matemáticamente la variación de la temperatura ambiente a lo largo del día son:

- Funciones bilineales
- Funciones biparabólicas
- Funciones sinusoidales

En cualquiera de los tres casos es necesario introducir como datos de partida las temperaturas ambiente máxima y mínima diaria así como las horas del día para las cuales aparecen dichos máximo y mínimo.

Los dos primeros tipos de funciones son útiles en el caso en el que la temperatura ambiente no evolucione de forma periódica y simétrica a lo largo del día analizado. En general, en los estudios que se presentan a lo largo de la tesis doctoral, se ha adoptado una variación sinusoidal de la temperatura ambiente salvo en aquellos casos en los que se conozca la evolución de la temperatura ambiente mediante toma de datos.

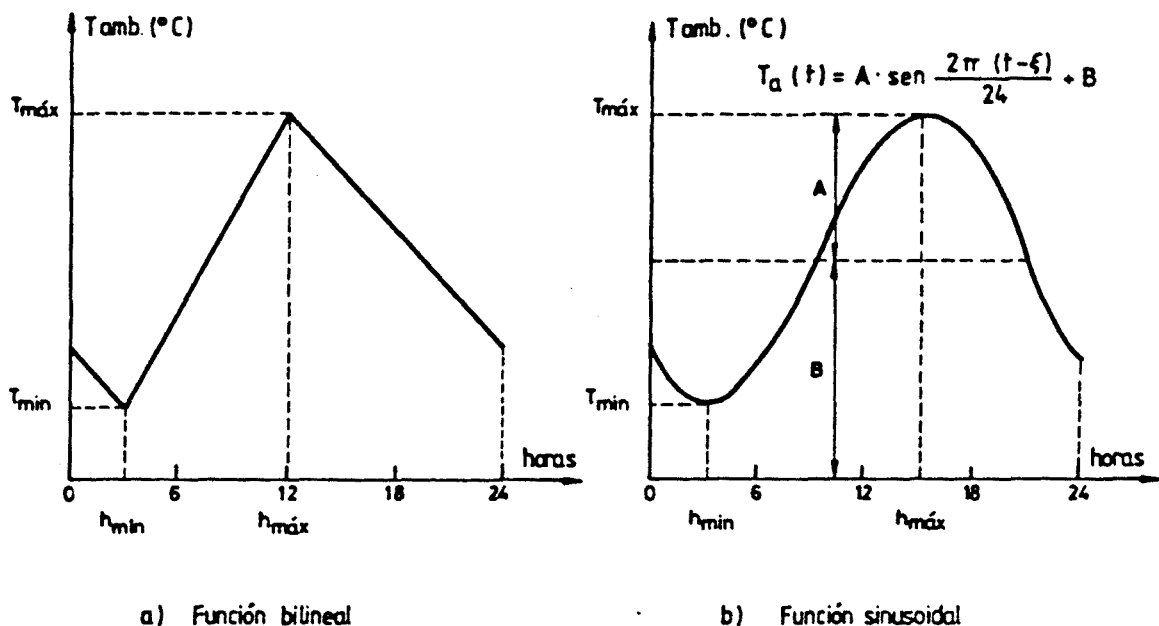


Fig. 2.3.- Funciones de evolución de la temperatura ambiente.

Para el conocimiento de las temperaturas máxima y mínima ambiente que se muestran en la figura 2.3 en diferentes localidades españolas pueden consultarse las publicaciones del Instituto Nacional de Meteorología ((46), (47)).

2.3.2.- La radiación solar

La radiación solar es, lógicamente, uno de los factores climatológicos que, como se verá en siguientes capítulos, muestra una gran influencia sobre la respuesta térmica y tensional de los puentes de hormigón. Es por ello por lo que en el programa confeccionado se han considerado dos opciones en lo que se refiere a la evaluación y evolución de la intensidad de radiación solar incidente sobre el tablero de un puente de hormigón.

La primera opción necesita como datos de partida la radiación solar total diaria sobre superficie horizontal, W , y la duración del día solar T_0 . La intensidad de radiación solar incidente en un instante t puede obtenerse mediante la siguiente expresión.

$$I(t) = \frac{2W}{T_0} \operatorname{sen}^2\left(\frac{\pi \cdot t}{T_0}\right) \quad |2.8|$$

Dicha función ha sido utilizada por diversos investigadores (Serrano (91), Emerson (34)). La aplicación de la ecuación |2.8| es válida para aquellos casos en los que se disponga de medidas experimentales de radiación solar y número de horas de sol.

La segunda opción, desarrollada en este estudio, es más genérica y permite, por un lado, conocer la intensidad de radiación solar para cualquier instante en base a datos objetivos relativos al emplazamiento del puente y, por otro, llevar a cabo un tratamiento más particularizado del análisis térmico y tensional del puente. Así, en función de la geometría de la sección transversal, puede obtenerse la intensidad de radiación solar incidente sobre cualquier superficie externa del puente. A continuación, se exponen todas las expresiones necesarias para poder cuantificar de forma analítica tal factor climatológico.

En primer lugar, la posición de un punto P sobre la esfera terrestre puede fijarse por medio de la longitud λ y la latitud ϕ . La posición del sol respecto de un punto P de la superficie terrestre puede determinarse mediante un sistema de coordenadas horarias. Dichas coordenadas son la declinación solar δ y el ángulo horario h (ver figura 2.4).

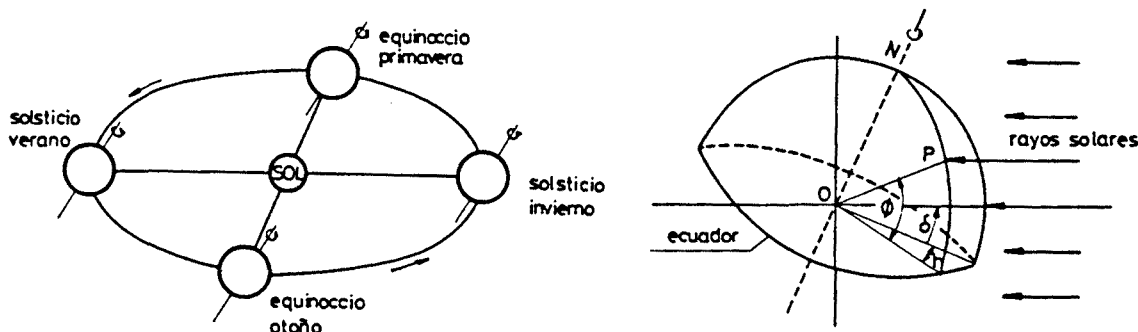


Fig. 2.4.- Movimiento de la tierra alrededor del sol. Latitud ϕ , ángulo horario h y declinación solar δ .

La declinación δ , distancia angular del sol al plano del ecuador, varía a lo largo del año tal como muestra la figura 2.5 pudiendo aproximarse dicha variación mediante la fórmula de Cooper, función únicamente del día del año para el cual se pretende analizar los efectos de la acción térmica sobre el puente de hormigón

$$\delta = 23.45 \text{ sen} \left[360 \frac{284+z}{365} \right] \text{ fórmula de Cooper} \quad |2.9|$$

z = día del año

Adoptando el sistema de coordenadas angulares, utilizado con mucha frecuencia en estudios de radiación solar (ver figura 2.6), puede definirse la trayectoria y posición relativa del sol respecto de un punto P de la superficie terrestre. Las coordenadas son la altitud solar β y el azimut solar α .

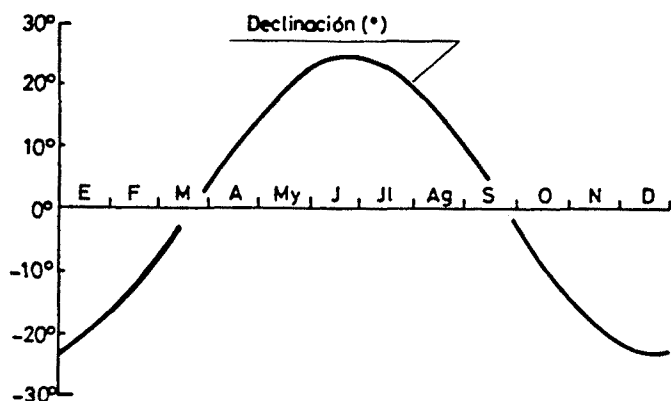


Fig. 2.5.- Variación de la declinación solar a lo largo del año.

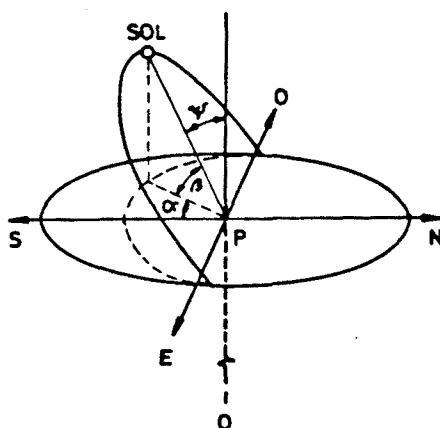


Fig. 2.6.- Trayectoria y posición relativa del sol respecto de un punto de la superficie terrestre. Altitud solar β , aximut solar α y ángulo zenital ψ .

Las relaciones existentes entre las coordenadas horarias y angulares se obtienen mediante las expresiones

$$\begin{aligned} \cos \psi &= \sin \beta = \sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cdot \cos \delta \cos h \\ \sin \alpha &= \frac{\cos \delta \cdot \sin h}{\cos \beta} \end{aligned} \quad |2.10|$$

Dichas expresiones permiten calcular el ángulo horario correspondiente a la puesta de sol sin más que imponer la condición de altitud solar β nula con lo cual resulta que

$$\cos h_s = -\text{tg } \phi \cdot \text{tg } \delta \quad |2.11|$$

Por consiguiente la hora inicial y final del día solar así como su duración vienen perfectamente definidas si se conocen la declinación -función del día del año- y la latitud del emplazamiento del puente

$$\begin{aligned} t_i &= 12 - \frac{1}{15} \text{ arc cos } (-\text{tg } \phi \cdot \text{tg } \delta) \\ t_f &= 12 + \frac{1}{15} \text{ arc cos } (-\text{tg } \phi \cdot \text{tg } \delta) \\ T_o &= \frac{2}{15} \text{ arc cos } (-\text{tg } \phi \cdot \text{tg } \delta) \end{aligned} \quad |2.12|$$

Por otra parte, la cantidad de energía solar incidente sobre una superficie normal a los rayos solares situada en la superficie terrestre viene definida por la expresión

$$I_n = k_T \cdot I_{SC} \quad |2.13|$$

en donde I_{SC} es la constante solar, la cual 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.

La intensidad de radiación solar extraterrestre incidente I_{SC} , fuera de la atmósfera, varía ligeramente a lo largo del año debido a que la tierra describe una trayectoria elíptica alrededor del sol. Dicha variación puede observarse en la figura 2.7.

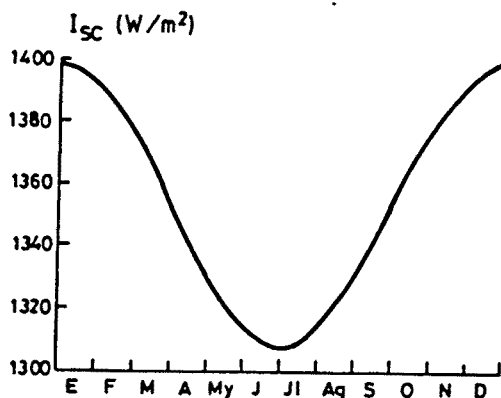


Fig. 2.7.- Variación de la radiación solar extraterrestre a lo largo del año. (Coronas et al. (25).

En general, para todo estudio de radiación solar, dicha constante solar I_{SC} adopta un valor medio de 1353 W/m^2 (Dilger, Ghali et al. (28), Coronas et al. (25)).

El factor de transmitancia k_T que aparece en la fórmula |2.13| expresa la atenuación de la radiación solar debido a la presencia de la atmósfera terrestre. Dicho factor, adimensional, depende 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), dicho factor puede aproximarse mediante la relación

$$k_T = 0.9^{m' \cdot t_u} \quad |2.14|$$

El factor m' depende de la altitud solar β y de la presión atmosférica existente a la altitud A donde quedará emplazado el puente.

La presión atmosférica relativa k_A puede expresarse en función de la altitud del emplazamiento del puente como

$$k_A = -0.000105 \cdot A + 1.0 \quad |2.15|$$

A = altitud de emplazamiento en
; metros

El factor de masa de aire m' puede obtenerse mediante la siguiente relación

$$m' = \frac{k_A}{\text{sen}(\beta + 5^\circ)} \quad |2.16|$$

El factor de turbidez t_u , que aparece en la expresión |2.14|, representa la atenuación de la radiación solar debida a la existencia de nubosidad y de polución ambiental. Elbadry y Ghali (33) y Kehlbeck (53) indican que para cielos des

pejados y ambientes limpios dicho factor varía entre 1.8 y 3.0 mientras que para ambientes urbanos e industriales con alto grado de polución atmosférica este factor puede alcanzar valores próximos a 8.0 y 9.0.

En el caso de que los rayos solares formen un ángulo θ con la normal a la superficie expuesta a radiación (ver figura 2.8), el valor de la intensidad de radiación solar incidente sobre dicha superficie puede determinarse mediante la siguiente expresión

$$I = I_n \cdot \cos \theta \quad |2.17|$$

en donde el ángulo θ viene definido por una ecuación trigonométrica que relaciona diversas coordenadas angulares y horarias

$$\begin{aligned} \cos \theta = & \sin \delta \sin \phi \cos s - \sin \delta \cos \phi \sin s \cos \gamma + \\ & + \cos \delta \cos \phi \cos s \cos h + \cos \delta \sin \phi \sin s \cos \gamma \cos h + \\ & + \cos \delta \sin s \sin \gamma \sin h \end{aligned} \quad |2.18|$$

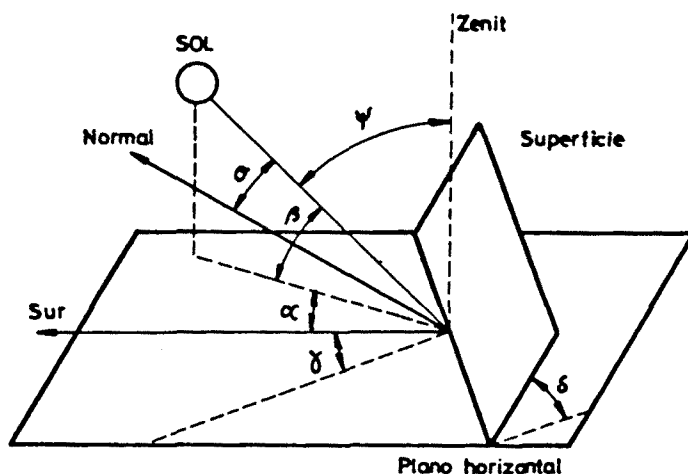


Fig. 2.8.- Posición del sol respecto de una superficie inclinada

En el caso de que la superficie inclinada coincida con la superficie horizontal -éste es el caso más frecuente en tableros de puentes de hormigón ya que su inclinación es mínima- el ángulo de incidencia θ coincide con el ángulo zenital ψ , complementario de la altitud solar β .

En resumen, introduciendo como datos el día del año para el cual se analiza el puente, la latitud y altitud del lugar de emplazamiento del puente y el factor de turbidez puede obtenerse la intensidad de radiación solar incidente sobre el tablero para cualquier instante del día. Debe hacerse hincapié en que la longitud λ correspondiente al lugar de emplazamiento no aparece en ninguna de las fórmulas anteriormente expresadas puesto que el estudio se realiza trabajando con el tiempo solar verdadero. En cualquier caso pueden hacerse las pertinentes correcciones para pasar del tiempo solar verdadero a la hora oficial.

A continuación se muestra cómo obtener la intensidad de radiación solar incidente sobre superficies externas del puente distintas a la superficie superior.

Las expresiones |2.17| y |2.18| permiten conocer la intensidad de radiación solar sobre una superficie cualquiera. Para poder obtener el valor de $\cos \theta$ en cualquier instante es necesario conocer otro dato más, relativo al emplazamiento del puente. Dicho dato es el azimut del eje longitudinal de éste, el cual se puede suponer constante a lo largo de la directriz puesto que, en general, los radios de curvatura en planta de los puentes curvos son elevados.

Así pues conocidos el azimut γ del puente y la inclinación s de los paramentos laterales de la sección transversal puede obtenerse la intensidad de radiación solar incidente sobre éstos -paramentos laterales de los puentes losa, almas de los puentes cajón, vigas extremas de los puentes de

vigas-. Sin embargo, no toda la totalidad de la superficie se ve expuesta a radiación solar lateral puesto que en la mayoría de los casos las secciones transversales se diseñan con voladizos los cuales arrojarán sombra sobre dichos paramentos laterales.

De la observación de la figura 2.9 pueden deducirse las relaciones geométricas necesarias para poder evaluar la longitud de proyección de sombra que arrojan los voladizos sobre los paramentos laterales del puente de hormigón a analizar.

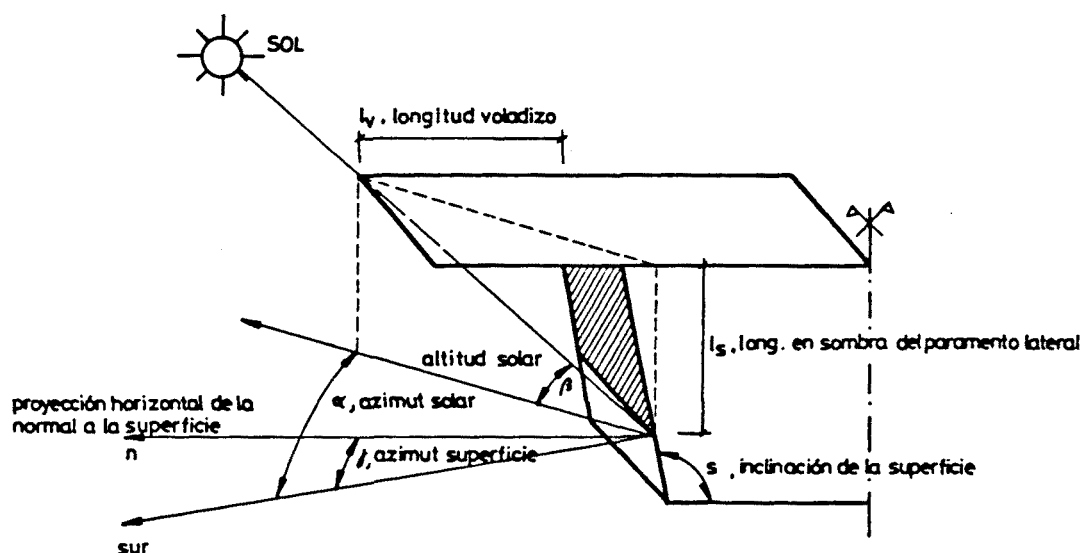


Fig. 2.9.- Determinación gráfica de la longitud en sombra del paramento lateral de una sección transversal genérica de un puente de hormigón.

La ecuación que permite obtener tal longitud en sombra es

$$l_s = l_v \cdot \frac{\operatorname{tg} \beta}{\cos(\alpha - \gamma) - \operatorname{tg} \beta \cdot \operatorname{tg}(s - \frac{\pi}{2})} \quad |2.19|$$

Por consiguiente podremos conocer la situación del nodo a partir del cual el paramento lateral se encuentra expuesto a radiación solar

$$I_{\text{sup.lateral}} = I_{\text{n sup.lateral}} \cdot \cos \theta \quad |2.20|$$

(en nodos no en sombra)

A partir de l_s puede obtenerse un coeficiente de sombra C_s definido por el cociente entre l_s , proyección vertical de la longitud en sombra y h_a , canto del alma, el cual permitirá analizar todos los nodos situados en paramentos laterales como si recibiesen la misma radiación solar incidente, definiéndose ésta como

$$I_{\text{sup.lateral}}^* = (1 - C_s) I_{\text{sup.lateral}} \quad |2.21|$$

$$C_s = \frac{l_s}{h_a}$$

(incide sobre todos los nodos de la superficie lateral)

Por consiguiente, a modo de resumen, puede afirmarse que dada la tipología transversal de un puente de hormigón y en función de datos objetivos relativos al emplazamiento de éste, a saber, latitud, altitud, factor de turbidez y azimut, se está en condiciones de obtener la radiación solar incidente sobre cada una de las superficies expuestas para cualquier día del año.

Ello presenta notables ventajas. La primera, fundamental, es que un planteamiento de este tipo puede ser utilizado para cuantificar la intensidad de radiación solar incidente en cualquier puente de hormigón emplazado en cualquier país. Aunque la presente tesis intenta tener como ámbito primordial de su aplicación nuestro país, la obtención de la radiación solar sobre las superficies externas de un puente de hormigón es general y puede extrapolarse a cualquier otro ám

bito de aplicación. Así pues, en base a las fórmulas presentadas |2.9|...|2.21|, puentes iguales emplazados en longitudes diferentes pero con idénticas latitudes y altitudes e idénticos azimuts y factores de turbidez se verán sometidos a iguales intensidades de radiación solar incidente sobre sus superficies externas. Las posibles discrepancias que aparezcan entre las respuestas térmicas y tensionales de tales puentes vendrán justificadas por otras razones como pueden ser las diferencias existentes entre las temperaturas ambiente o velocidad de viento en uno u otro lugar de emplazamiento.

Otra de las ventajas que ofrece este planteamiento es la posibilidad de contemplar radiación solar incidiendo sobre las superficies laterales. Ello hace necesario el estudiar el comportamiento y respuesta térmica de los puentes de hormigón como dominios bidimensionales -la sección transversal-. El resultado de mayor relevancia relacionado con la posibilidad de contemplar este efecto es la obtención de un gradiente térmico transversal, del cual hablan muy pocas de las normativas nacionales e internacionales, y que, adelantamos, puede ser, en algunos casos y para unas determinadas condiciones de emplazamiento, no despreciable.

2.3.3.- La existencia de capa asfáltica

En general, en los puentes de hormigón se dispone una capa asfáltica de rodadura de pocos centímetros de espesor para mejorar las condiciones de rodadura de los vehículos. Al suponer que ambos medios están íntimamente ligados no tienen lugar los mecanismos de convección y radiación térmica en la interfase. Ello implica la existencia de continuidad de la función de temperaturas pero no de su derivada pues las conductividades térmicas de ambos medios son notablemente distintas.

Para modelizar numéricamente esta condición de contorno no se ha adoptado la hipótesis realista de que en la capa asfáltica el flujo calorífico es unidireccional según la dirección de la normal a la interfase -el espesor de capa de asfalto es pequeño en comparación con las dimensiones de cantos y espesores de las secciones más usuales en las tipologías transversales de los puentes de hormigón-.

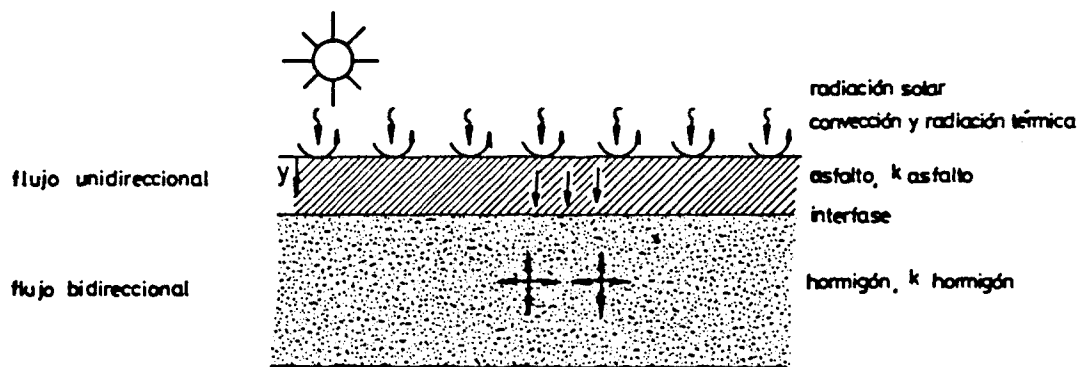


Fig. 2.10.- Existencia de capa asfáltica sobre hormigón estructural.

La condición de contorno a imponer es la continuidad de flujo calorífico en la interfase

$$k_{\text{asfalto}} \cdot \left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_{\text{interfase}} = k_{\text{hormigón}} \cdot \left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_{\text{interfase}} \quad |2.22|$$

Se obtiene así, para cualquier instante, la temperatura en la interfase en función de las temperaturas en los nodos contiguos en el instante anterior.

Para la resolución del problema térmico se hace necesario conocer las características térmicas del asfalto y los correspondientes coeficientes de absorción, emisividad y convección en su superficie externa. Dichos valores, de los cuales se hablará con posterioridad en el siguiente capítulo, han sido extraídos de referencias citadas en el capítulo an-

terior (Kehlbeck (53), Elbadry y Ghali (33), Priestley y Buckle (85), Emerson (34)).

2.3.4.- La evolución de la temperatura en los huecos de las secciones aligeradas y celulares

Para poder determinar de forma precisa la temperatura en cualquier punto de una sección celular de un tablero de puente de hormigón es necesario considerar la presencia de aire ocluído en los huecos interiores.

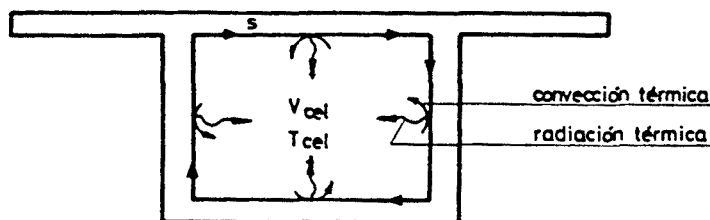


Fig. 2.11.- Volumen de aire ocluído en la célula. Fenómenos de transferencia de calor existentes en la superficie interior.

La condición de contorno a imponer es que el flujo de calor emitido por mecanismos de convección y radiación térmica se invierta en incrementar la temperatura del aire ocluído en el interior de la célula.

$$\int_0^s (h_c + h_r) \cdot (T_s(s,t) - T_{cel}(t)) ds = \rho_{aire} c_{aire} V_{cel} \frac{dT_{cel}}{dt} \quad |2.23|$$

En dicha ecuación h_c y h_r son los coeficientes de convección y radiación térmica de la superficie interior, s es el perímetro total interior, $T_s(s,t)$ es la temperatura en un punto de la superficie en el instante t y $T_{cel}(t)$ es la temperatura del aire de la célula en ese mismo instante t . Discretizando la ecuación diferencial se puede obtener la temperatura de la célula en un instante posterior.

Los valores adoptados por la densidad y calor específico del aire son

$$\rho_{\text{aire}} = 1.228 \text{ kg/m}^3$$

$$c_{\text{aire}} = 716.0 \text{ J/(kg } ^\circ\text{C)}$$

La implementación numérica de la ecuación |2.23| en el programa de ordenador desarrollado presenta múltiples ventajas. A la ya comentada de que ello supone una mayor precisión en los resultados obtenidos se le suma otra de gran interés y es la posibilidad de conocer simultáneamente la evolución de la temperatura ambiente exterior y de la temperatura en el interior de las células o aligeramientos. Como ya se verá con posterioridad en el siguiente capítulo, las diferencias de temperatura existentes son causa de generación de esfuerzos de flexión transversal de considerable valor y que pueden producir fisuras en las almas de secciones en cajón o fuertemente aligeradas.

Una vez presentado, por un lado, el método utilizado en la resolución de la ecuación diferencial de transmisión de calor en puentes de hormigón y las diferentes características del programa desarrollado y, por otro, la implementación numérica de diversos parámetros y sus particularidades se pasa a continuación a exponer una serie de ejemplos, relativos a puentes de hormigón, en donde los resultados obtenidos mediante el modelo analítico desarrollado se comparan con los derivados de mediciones experimentales o de otros estudios analíticos.

2.4.- EJEMPLOS

Los ejemplos que se presentan a continuación tienen como finalidad el verificar la bondad del método expuesto. Para ello, los resultados experimentales y analíticos relativos a la respuesta térmica y tensional de puentes de hormigón obtenidos por otros autores se compararán con los derivados del modelo desarrollado en el presente estudio.

Los puentes analizados, los cuales se presentan en la tabla 2.1, atienden a las tipologías de sección losa maciza y sección cajón, tipologías éstas que se estudiarán en profundidad en los estudios paramétricos del siguiente capítulo.

| Tipología transversal | | |
|-----------------------|--|---|
| Resultados | Sección losa maciza | Sección cajón |
| Analíticos | Adur Bridge-Slip road (Emerson (34)) | Elbadry y Ghali (33) |
| Experimentales | Adur Bridge-Slip road (Emerson (34)) Puente sobre riera de Can Estapé, Rubí (experiencia propia) | Pennsylvania University Bridge (Hoffman et alt. (42)) |

Tabla 2.1.- Puentes analizados para la corroboración del modelo con resultados experimentales y analíticos obtenidos por otros autores.

Los resultados a comparar son los relativos a las distribuciones de temperaturas existentes a través de las secciones transversales de los diferentes puentes analizados si bien, en algún caso, dado que se dispone de resultados referentes a tensiones longitudinales y a curvaturas témicas impuestas, el análisis comparativo se extiende a las distribuciones tensionales autoequilibradas y a las mencionadas curvaturas, asociadas a las distribuciones del campo de temperaturas.

Una vez verificada y mostrada la bondad del método utilizado en el presente estudio, se procederá a analizar un último ejemplo, relativo a la toma de medida de temperaturas en diversos puntos de algunas dovelas del Puente Ingeniero Carlos Fernández-Casado durante su fase constructiva. Como se verá con posterioridad, los resultados obtenidos analíticamente se ajustan con suficiente precisión a los obtenidos experimentalmente a pesar de que, en un principio, el programa numérico confeccionado obtiene la respuesta térmica del puente en su situación final. Las diferencias encontradas atienden, fundamentalmente, al diferente comportamiento térmico del aire de las células cuando el puente se encuentra en fase constructiva o ya construído en su totalidad.

Por último, indicar que en el anejo 2 se presentan las salidas de resultados del ordenador para dos de los ejemplos analizados: Pennsylvania University Bridge y el puente cajón analizado por Elbadry y Ghali.

2.4.1.- Puente Adur Bridge-Slip road

En este ejemplo los resultados obtenidos se comparan con los derivados de la experimentación y de los estudios analíticos llevados a cabo por Emerson (34). El método numérico desarrollado por esta investigadora para la obtención de la distribución de temperaturas en puentes de hormigón se basa en un esquema explícito unidimensional en diferencias finitas, ya citado en el capítulo anterior.

La sección transversal del puente a analizar se presenta en la figura 2.12.

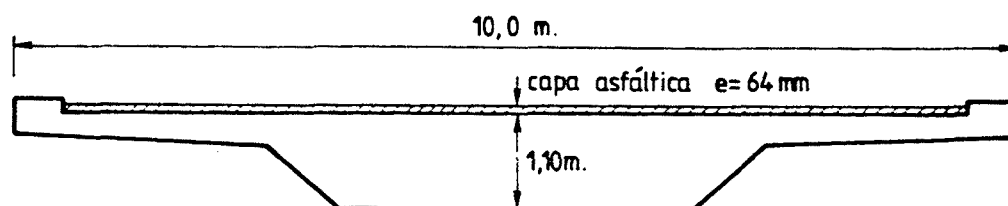


Fig. 2.12.- Sección transversal losa maciza del Adur Bridge.

El análisis térmico se realiza para el día 9 de Julio de 1971 al que corresponden las condiciones meteorológicas que se presentan en la tabla 2.2, algunas de las cuales fueron obtenidas experimentalmente. En esta misma tabla se recogen también los valores asignados a las propiedades físicas y térmicas del hormigón y del asfalto, necesarias para poder obtener las distribuciones de temperatura a través de la sección del puente. Para algunas de estas propiedades el autor de esta tesis ha tenido que adoptar unos valores medios usuales puesto que en las referencias bibliográficas de Emerson ((34) (35)) no se han encontrado datos relativos a tales propiedades.

| Propiedades térmicas | | |
|---|-----------|-----------|
| Material | Hormigón | Asfalto |
| Conductividad térmica (W/m°C) | 1.4 (.) | 0.83 (..) |
| Calor específico (J/kg °C) | 960. (.) | |
| Densidad (kg/m ³) | 2400. (.) | |
| Factor de absorción solar | 0.5 (.) | 0.9 (.) |
| Emisividad | 0.88 (.) | 0.92 (.) |
| Condiciones climatológicas y ambientales | | |
| Radiación solar total diaria (9/7/71) (W.h/m ²) | | 7950. (*) |
| Duración del día solar (horas) | | 18. (*) |
| Temperatura ambiente mínima (°C) | | 12. (*) |
| Temperatura ambiente máxima (°C) | | 33. (*) |
| Velocidad del viento (km/hora) | | 11. (*) |

Tabla 2.2.- Datos necesarios para el análisis comparativo de los resultados relativos al puente Adur.
 (*=valores experimentales, .=valores adoptados por Emerson, ..=valores adoptados en el presente estudio).

La figura 2.13 muestra las distribuciones de temperaturas según el eje de simetría existentes a diferentes instantes del día. En particular solamente se presentan las correspondientes a las 8 horas, 12 horas, 16 horas y 20 horas por ser estos instantes los únicos para los cuales se dispone de resultados experimentales.

En dicha figura puede observarse que los resultados obtenidos mediante el método propuesto en esta tesis se ajustan de forma bastante precisa a los derivados de la experimentación. Cualitativamente los perfiles de las distribuciones de temperaturas son muy similares a los experimentales y cuantitativamente las diferencias de temperaturas para cualquier instante del día y para cualquier fibra de la sección no son excesivas, no superándose en ningún nodo diferencias del orden del 11%.

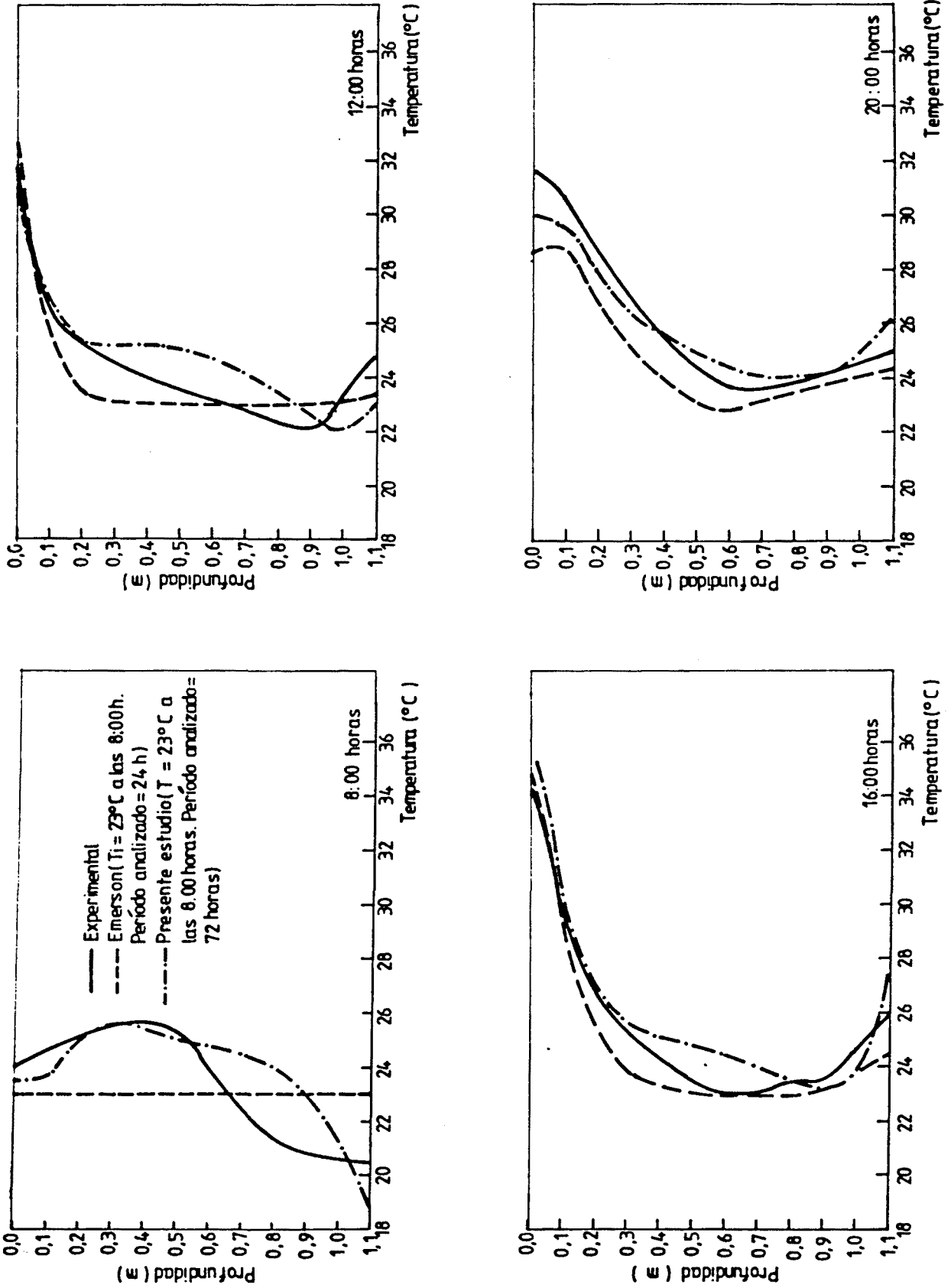


Fig. 2.13.- Distribuciones de temperaturas según el eje de simetría de la sección correspondientes a diferentes instantes del día 9 de Julio de 1971 en el puente Adur.

Analizando comparativamente los resultados analíticos obtenidos por Emerson y por el autor de esta tesis se aprecian diferencias cuantitativas de cierta importancia, las cuales vienen originadas por las diferentes condiciones iniciales de contorno impuestas en los respectivos estudios. Una forma de actuar para paliar este problema, ya ha sido comentada en el capítulo anterior, es la de extender el período de tiempo a analizar imponiendo cíclicamente las condiciones climatológicas y ambientales existentes para el día en el que se pretende obtener la respuesta térmica del puente. Ello, sin embargo, no solventa de forma total el problema puesto que la condición inicial de contorno vendrá regida, en algunos casos, por las condiciones meteorológicas existentes previas al día en el que se lleve a cabo el análisis térmico.

De todas maneras, en el caso de que no se disponga de datos fiables para poder estimar con suficiente aproximación la condición inicial, el extender el período temporal a analizar siempre será una buena medida que se traducirá en la obtención de unos resultados mucho más acordes con la realidad física.

2.4.2.- Puente sobre la riera de Can Estapé, Rubí

Este es un puente de sección losa maciza de hormigón armado de 13 metros de luz que salva la riera de Can Estapé en el término municipal de Rubí, provincia de Barcelona. El autor de esta tesis tuvo la oportunidad de instrumentar dicho puente con objeto de poder llevar a cabo medidas de temperatura en el seno de la masa de hormigón. En el anejo 3 se presenta, con detalle, datos relativos a dicha instrumentación.

La sección transversal del puente así como la situación de los puntos en donde fueron registradas las temperaturas puede observarse en la figura 2.14.

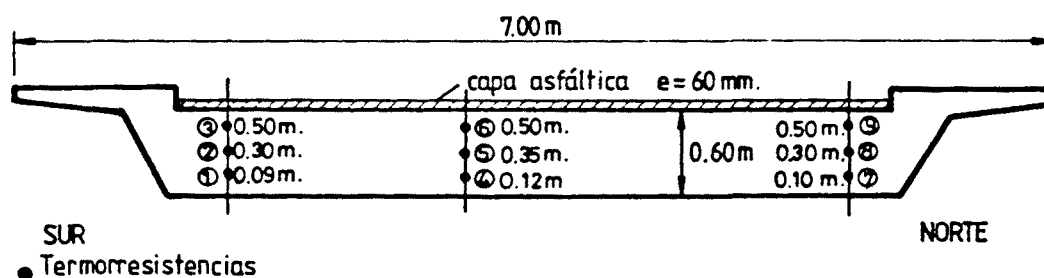


Fig. 2.14.- Sección transversal losa maciza del puente sobre la riera de Can Estapé, Rubí.

La toma de datos experimentales permitió obtener la temperatura en dichos puntos y la evolución de la temperatura ambiente.

El análisis comparativo de los resultados experimentales y numéricos se lleva a cabo para el día 13 de Julio de 1985. Las condiciones climatológicas existentes ese día, y los previos al día del análisis, correspondían a un día caluroso, con una velocidad de viento pequeña y con cierta bruma lo que originaba el que el día no fuera excesivamente claro y despejado.

En lo que se refiere a las propiedades térmicas del hormigón y del asfalto, a falta de mediciones experimentales, se les asignaron unos valores considerados como medios usuales.

Dado que, por otra parte, no se llevó a cabo la medición experimental de la radiación solar total diaria el análisis térmico debía plantearse en su forma general introduciendo como datos de partida los datos relativos al emplazamiento del puente obteniendo el programa numérico la radiación solar incidente para cada instante del día analizado. Para la obtención de dicha radiación es necesario conocer a priori el valor que adopta el factor de turbidez, el cual refleja de alguna forma, el índice de nubosidad y de polución

ambiental. Dadas las condiciones climatológicas existentes en el lugar de emplazamiento del puente para el día analizado -observadas por el autor de esta tesis- y dado que el puente se ubica en una zona interurbana en la que se sitúan diversas industrias se adoptó para el factor de turbidez un valor de 5, valor media de los extremos superior e inferior del intervalo en el que se mueve dicho parámetro (Kehlbeck (53), Dilger et al. (28)).

En resumen, los datos de partida necesarios para poder obtener la respuesta térmica del puente son los que se presentan en la tabla 2.3.

| Propiedades térmicas | | |
|---|--------------|----------|
| Material | Hormigón | Asfalto |
| Conductividad térmica (W/m °C) | 1.5 (*) | 0.83 (*) |
| Calor específico (J/kg °C) | 960. (*) | |
| Densidad (kg/m ³) | 2400. (*) | |
| Factor de absorción solar | 0.5 (*) | 0.9 (*) |
| Emisividad | 0.88 (*) | 0.92 (*) |
| Condiciones climatológicas y ambientales | | |
| Día del año | 13 de Julio | |
| Velocidad del viento (m/seg) | 4.0 | |
| Temperatura ambiente mínima (°C) | 19.8 | |
| Temperatura ambiente máxima (°C) | 36.3 | |
| Factor de turbidez | 5.0 | (*) |
| Datos relativos al emplazamiento del puente | | |
| Latitud (°N) | 41.4 | |
| Altitud (m) | 45. | |
| Azimut (°) | 0. (eje E-O) | |

Tabla 2.3.- Datos necesarios para el análisis comparativo de los resultados relativos al puente sobre la riera de Can Estapé. (*=valores estimados).

La figura 2.15 muestra las evoluciones diarias de las temperaturas en los tres puntos situados en la vertical más próxima al eje de simetría de la sección obtenidas experimentalmente y mediante el modelo numérico expuesto.

En dicha figura puede observarse que los perfiles de las evoluciones de las temperaturas en los puntos analizados son muy similares a los obtenidos experimentalmente. Por otra parte, las diferencias existentes entre los resultados analíticos y experimentales no superan en ningún caso el 10%.

Tales diferencias pueden ser atribuibles al hecho de que en el modelo numérico desarrollado se adopta una velocidad de viento constante para todo el día y una variación sinusoidal de la temperatura ambiente a lo largo del ciclo climatológico, hipótesis éstas que en algunos casos pueden no ajustarse de forma precisa a las condiciones climatológicas existentes para cada instante del día.

A continuación, la figura 2.16 muestra la evolución diaria de las temperaturas de los puntos 2 y 8 obtenida experimentalmente y mediante el modelo numérico desarrollado. Dado que la inclinación de los rayos solares es alta para esta época del año -13 de Julio- y que el azimut del eje longitudinal del puente es nulo, la respuesta térmica obtenida mediante el modelo es perfectamente simétrica, no existiendo fuentes de calor en los paramentos laterales de la sección losa maciza debido a una posible radiación solar incidente. Por consiguiente, las evoluciones diarias de las temperaturas en los puntos 2 y 8 son idénticas.

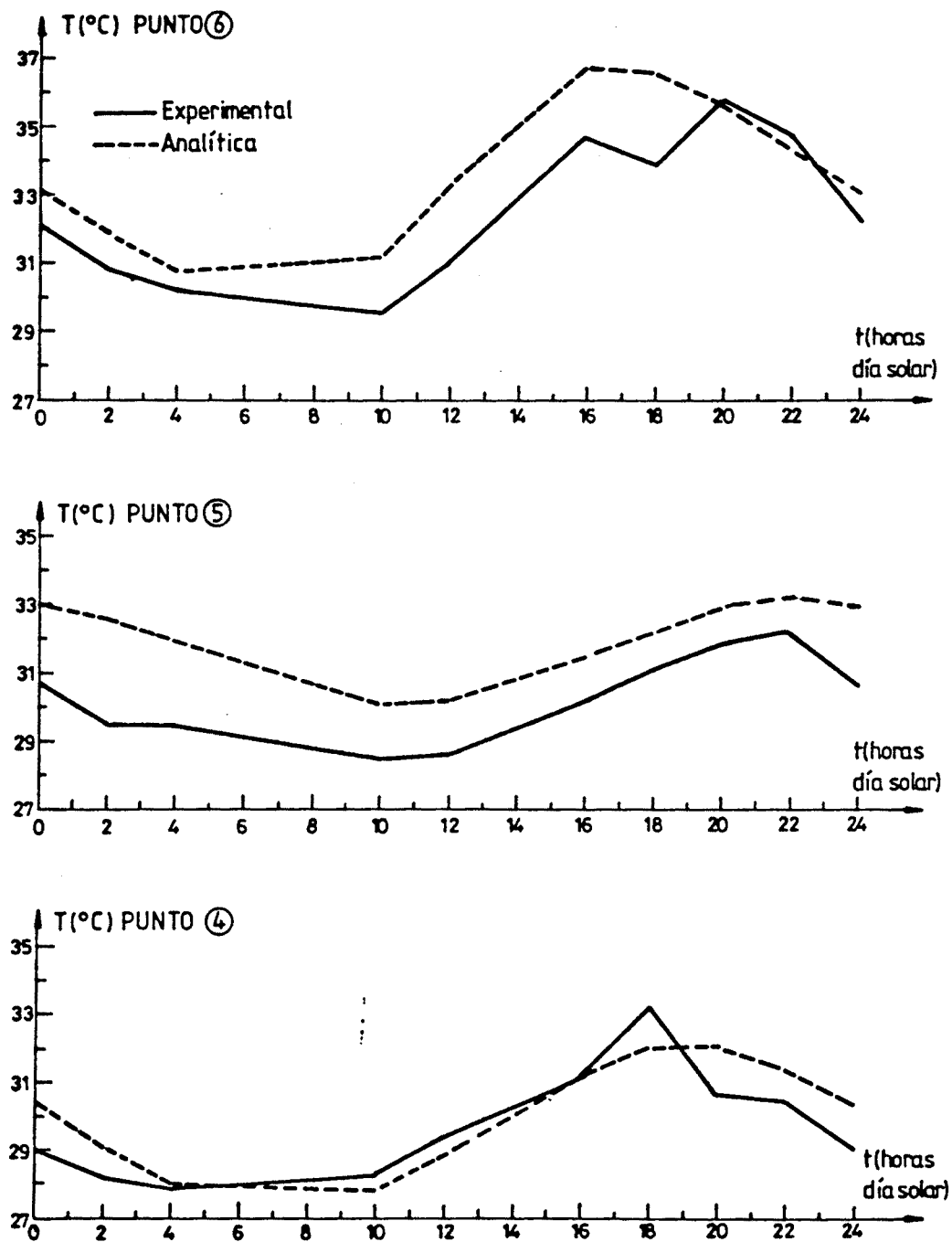


Fig. 2.15.- Evoluciones diarias experimentales y analíticas de las temperaturas en los puntos 4, 5 y 6 (para la posición de los puntos ver figura 2.14).

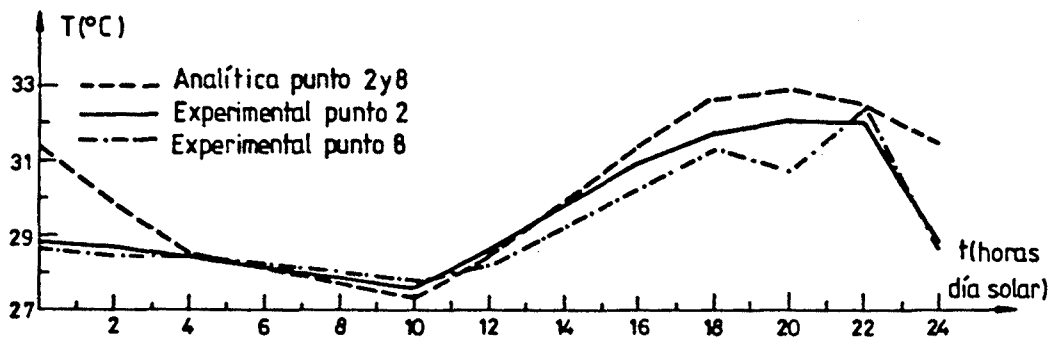


Fig. 2.16.- Evoluciones diarias experimentales y analíticas de las temperaturas en los puntos 2 y 8 (para la posición de los puntos ver figura 2.14).

A la vista de los resultados presentados en esta figura puede observarse que la evolución diaria de la temperatura de dichos puntos obtenida analíticamente se ajusta bien a la obtenida mediante la experimentación no apreciándose diferencias superiores al 9%.

Por otra parte, si se comparan las evoluciones diarias experimentales de los puntos 2 y 8 se observa que las diferencias son prácticamente despreciables lo cual nos hace pensar que en puentes losa maciza la posible existencia de un gradiente transversal térmico es prácticamente nula, por lo menos en esta época de verano.

2.4.3.- Puente cajón analizado por Elbadry y Ghali

Elbadry y Ghali desarrollan un modelo para obtener la respuesta térmica y tensional a nivel sección de puentes de hormigón sometidos a la acción térmica ambiental. El programa numérico confeccionado por dichos investigadores se basa en el método de los elementos finitos utilizando la técnica

de los residuos ponderados de Galerkin para la integración de la ecuación diferencial en el tiempo.

En este ejemplo los resultados obtenidos por Elbadry y Ghali ((32), (33)) relativos al puente cajón unicelular cuya sección transversal se muestra en la figura 2.17 se comparan con los resultados derivados del presente estudio.

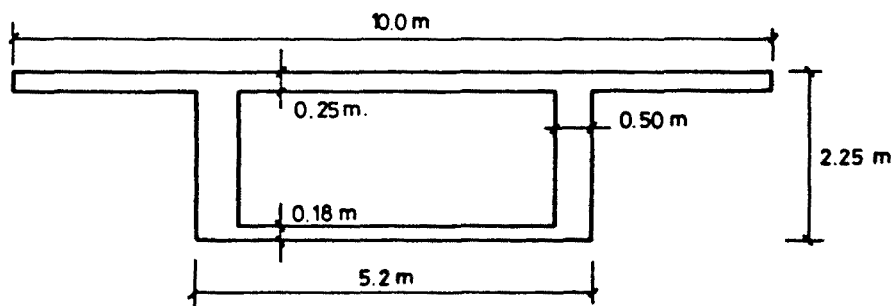


Fig. 2.17.- Sección transversal del puente cajón a analizar.

Los datos de partida para poder llevar a cabo el análisis térmico y tensional han sido extraídos de las referencias anteriormente citadas y se presentan en la tabla 2.4.

La figura 2.18 muestra las distribuciones de temperatura según el eje vertical de simetría del alma derivadas del presente estudio y del estudio realizado por Elbadry y Ghali (33). Tales distribuciones corresponden, en ambos casos, al instante en el que se inducen los máximos gradientes térmicos verticales -máximas curvaturas térmicas impuestas-. Hay que señalar que, en ambos estudios, dicho instante prácticamente coincide y ocurre próximo a las 16 horas.

| Propiedades físicas y térmicas del hormigón | |
|--|--------------------|
| Conductividad térmica (W/m °C) | 1.5 |
| Calor específico (J/kg °C) | 960. |
| Factor de absorción solar | 0.5 |
| Emisividad | 0.88 |
| Coef. dilatación térmica (°C ⁻¹) | 8x10 ⁻⁶ |
| Densidad (kg/m ³) | 2400. |
| Módulo de elasticidad (kp/cm ²) | 273860. |
| Condiciones climatológicas y ambientales | |
| Día del año | 21 de Marzo |
| Velocidad del viento (m/seg) | 1.0 |
| Temp. ambiente mínima (°C) | -15.0 |
| Temp. ambiente máxima (°C) | 5.0 |
| Factor de turbidez | 1.8 |
| Datos relativos al emplazamiento del puente | |
| Latitud (°N) | 51.03 |
| Altitud (m) | 1050. |
| Azimut (°) | 0. (eje E-O) |

Tabla 2.4.- Datos necesarios para el análisis comparativo de resultados relativos al puente cajón analizado.

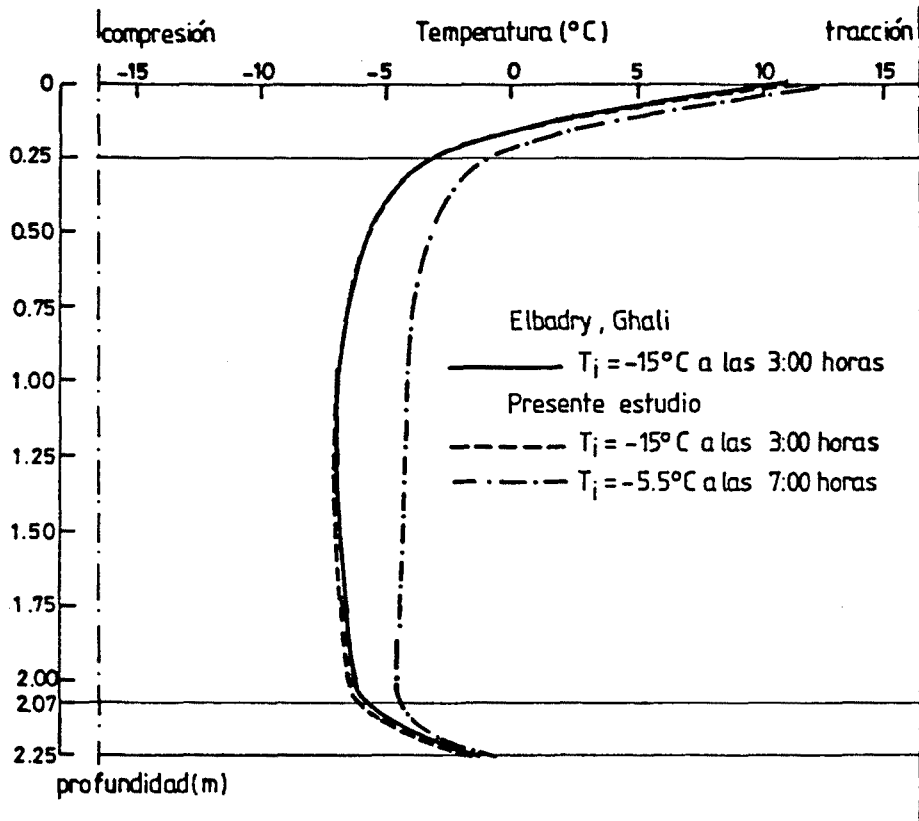


Fig. 2.18.- Distribuciones de temperatura según el eje vertical de simetría del alma correspondientes al instante de máxima curvatura térmica impuesta (condiciones de primavera, Calgary, Canadá)

Como puede apreciarse en la figura, si comparamos las curvas continua y discontinua, las diferencias existentes entre los resultados son mínimas, si bien se observa que la temperatura de los nodos situados en la losa superior obtenida según el presente estudio es ligeramente más alta. Ello es debido al hecho de que, en este caso, la máxima curvatura térmica impuesta se alcanza a las 15.40 horas mientras que en el estudio realizado por Elbadry y Ghali dicho instante tiene lugar a las 16 horas ya que el incremento de tiempo adoptado es de 1 hora; en el presente estudio dicho incremento es de 0.4 horas.

Por otra parte se ha obtenido la distribución de temperaturas correspondiente al instante de máxima curvatura térmica impuesta pero imponiendo como condición inicial que la temperatura a las 7 horas sea igual para todos los nodos

y de valor -5.5°C . Dicha condición inicial, mucho más acorde con la realidad física del fenómeno, introduce algunos cambios en la distribución de temperaturas. Estos son por un lado, el que la temperatura en todos los nodos alcanza valores algo más elevados y, por otro, el que la zona o nodos de la sección que se encuentran a menor temperatura se sitúan a mayor profundidad.

Ello demuestra que la influencia de la condición inicial debe ser analizada para poder conocer con mayor precisión la respuesta térmica de los puentes.

Las distribuciones de tensiones longitudinales asociadas a las distribuciones de temperaturas se presentan en la figura 2.19.

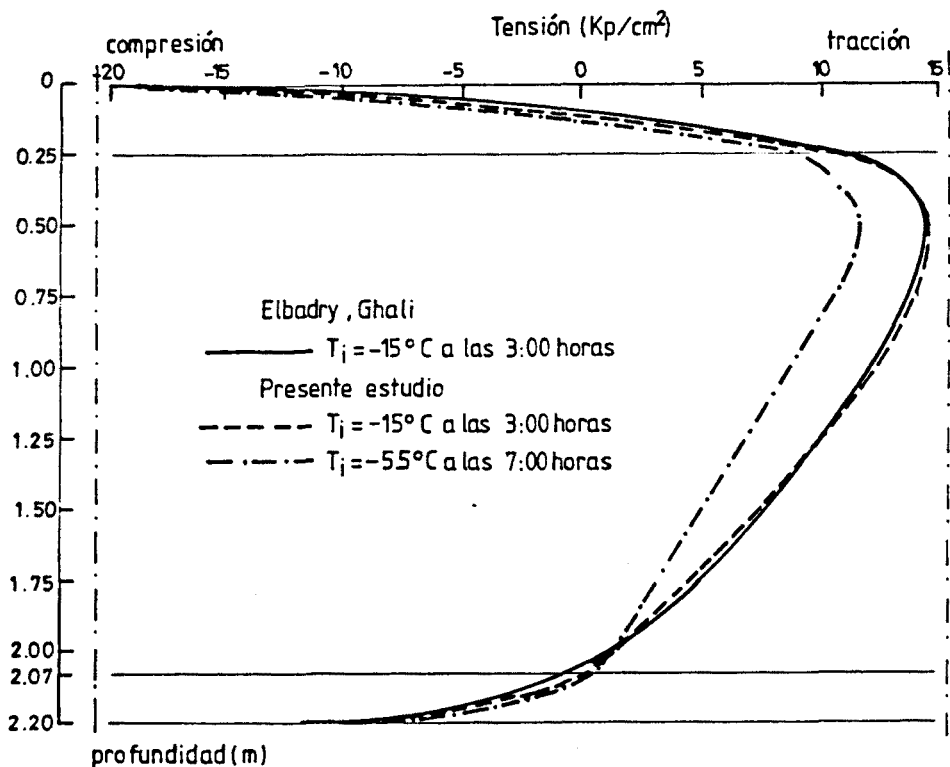


Fig. 2.19.- Distribuciones de tensiones longitudinales autoequilibradas según el eje vertical de simetría del alma correspondientes al instante de máxima curvatura térmica impuesta (condiciones de primavera, Calgary, Canadá).

De nuevo puede apreciarse que, si se impone la misma condición inicial, existe una casi total coincidencia entre los resultados derivados del presente estudio y los obtenidos por Elbadry y Ghali (curvas discontinua y continua, respectivamente). Si dicha condición se ajusta más a la realidad vemos que la distribución de tensiones varía de forma notable, sobre todo en la zona de almas. En este caso se observa una clara disminución de las tensiones máximas de tracción. Así, una distribución inicial de temperaturas uniforme a través de la sección cuyo valor sea inferior al que existe en realidad favorece la no linealidad de la distribución del campo de temperaturas lo cual hace que el valor de las tensiones longitudinales de tracción en instantes próximos al de máxima curvatura térmica sea más elevado.

Por último, la figura 2.20 muestra las evoluciones diarias de la curvatura térmica vertical impuesta para los diferentes estudios.

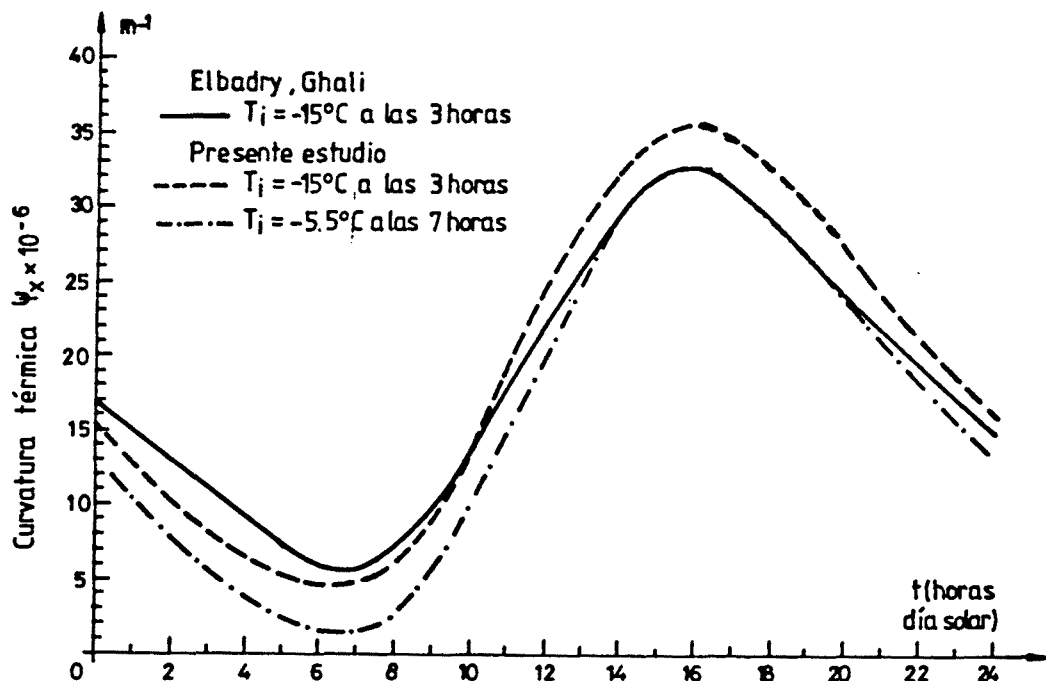


Fig. 2.20.- Evoluciones diarias de la curvatura térmica impuesta según el plano vertical (condiciones de primavera, Calgary, Canadá).

Comparando las curvas obtenidas imponiendo la misma condición inicial se observa que los perfiles evolutivos de la curvatura térmica son muy similares alcanzándose el máximo para las 15.60 horas y las 16.0 horas y el mínimo, en ambos estudios, para las 6.60 horas. Las diferencias relativas entre estos máximos o mínimos no superan el 12%.

De nuevo se aprecia que un mejor ajuste de la condición inicial de contorno hace variar de forma sensible la evolución diaria de la curvatura térmica que, en este caso, se traduce en una traslación del perfil hacia la zona de menores curvaturas térmicas impuestas.

2.4.4.- Puente Pennsylvania University Bridge

Hoffman, McClure y West (42) llevan a cabo un profundo análisis experimental sobre las distribuciones de temperaturas existentes en un puente sección cajón construido en el recinto de la Universidad de Pennsylvania.

En este ejemplo los resultados obtenidos mediante la aplicación del modelo expuesto se comparan con resultados experimentales, a diferencia de lo realizado en el ejemplo anterior.

Los investigadores mencionados instrumentaron la sección centro vano del puente cajón de inercia constante que se presenta en la figura 2.21 con 24 termopares distribuidos a través de las alas y almas de la sección.

La medición de temperaturas se inició en Octubre de 1978 y finalizó en Octubre del año siguiente. A lo largo de todo este período, además de medir temperaturas en los termopares dispuestos en el seno de la masa de hormigón, se llevaron a cabo paralelamente mediciones experimentales de

radiación solar total incidente sobre superficie horizontal, temperatura ambiente y velocidad media diaria del viento en un observatorio metereológico situado a unos 8 Km. al sur del lugar de emplazamiento del puente.

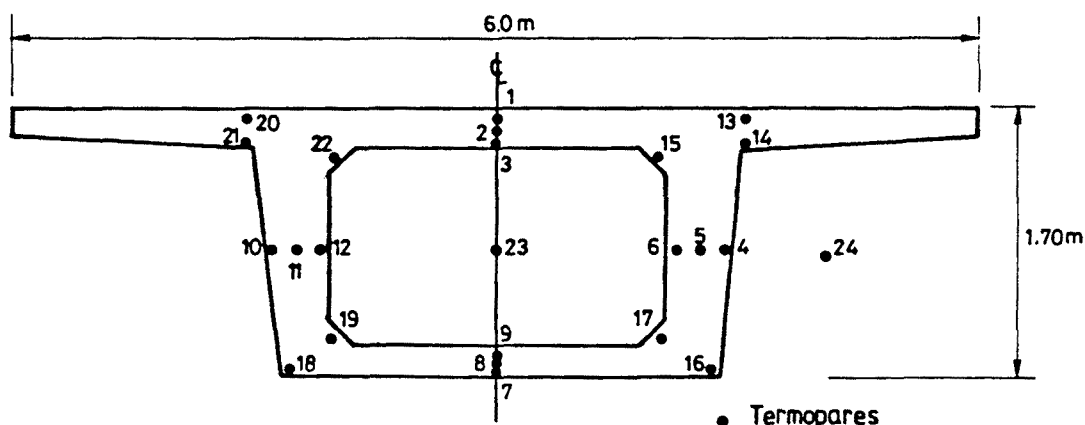


Fig. 2.21.- Sección transversal del puente Pennsylvania University Bridge. Disposición de los termopares.

A continuación se comparan los resultados experimentales de temperaturas correspondientes al 16 de Julio de 1979 con los derivados del presente estudio.

Los datos necesarios para poder obtener la respuesta térmica del puente se presentan en la tabla 2.5. En dicha tabla se indica cuáles han sido los valores de los diversos parámetros climatológicos obtenidos experimentalmente en el observatorio metereológico próximo al lugar de emplazamiento y cuáles han sido los valores adoptados por el autor de esta tesis para poder llevar a cabo el análisis.

| Propiedades físicas y térmicas del hormigón | |
|---|---------------------|
| Conductividad térmica (W/m °C) | 1.5 |
| Calor específico (J/kg °C) | 960. |
| Factor de absorción solar | 0.5 |
| Emisividad | 0.88 |
| Coef. de dilatación térmica (°C ⁻¹) | 10x10 ⁻⁶ |
| Densidad (kg/m ³) | 2400. |
| Módulo de elasticidad (kp/cm ²) | 351786. |
| Condiciones climatológicas y ambientales | |
| Radiación solar total diaria (16/7/79) (Wh/m ²) | 4710. (*) |
| Duración del día solar (horas) | 16. (*) |
| Temperatura ambiente mínima (°C) | 20.0 (*) |
| Temperatura ambiente máxima (°C) | 31.8 (*) |
| Velocidad del viento (m/seg) | 1.0 (*) |

Tabla 2.5.- Datos necesarios para el análisis comparativo de los resultados relativos al puente analizado, correspondientes al 16 de Julio de 1979 (*=valores experimentales).

La figura 2.22 muestra las diferentes distribuciones de temperatura, a través de un eje vertical de la sección correspondientes a distintos instantes del día, que se derivan de la experimentación y de la aplicación del modelo numérico desarrollado en este estudio. Dichas distribuciones vienen definidas por la unión, mediante líneas quebradas, de la temperatura existente en los puntos, 1, 2, 3, 5, 9, 8 y 7, ya que así se presentan los resultados experimentales de Hoffman et al. (42). Hay que señalar, por un lado, que el perfil de las distintas distribuciones de temperatura es un perfil no lineal continuo y, por lo tanto, no es quebrado y, por otro, que las líneas que conectan las temperaturas de los termopares 3, 5 y 9 tienen únicamente un fin ilustrativo y, de ninguna manera, atienden a una distribución de temperaturas observada entre dichos puntos.

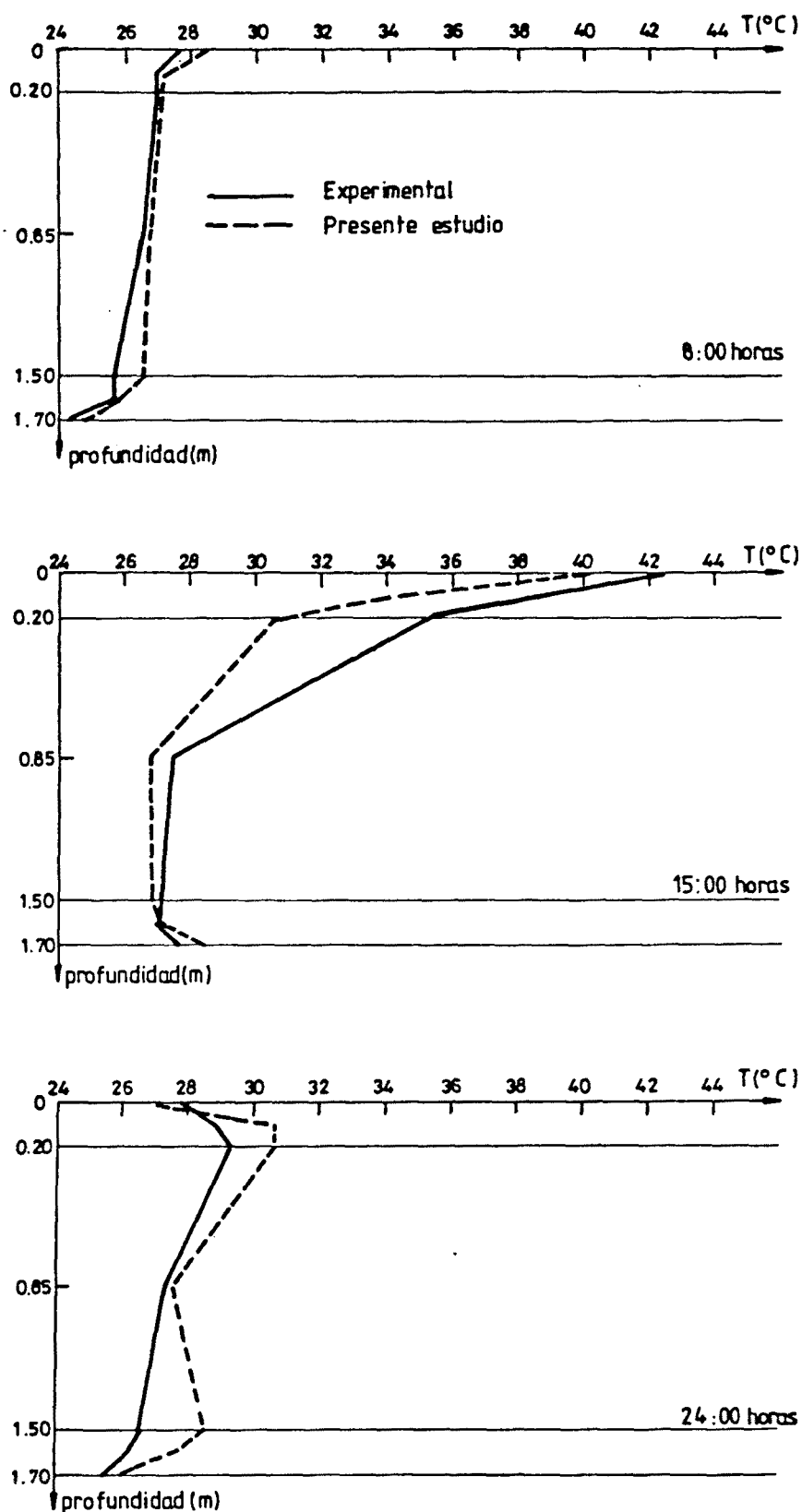


Fig. 2.22.- Distribuciones de temperaturas según un eje vertical imaginario que conecta los termopares 1, 2, 3, 5, 9, 8 y 7 a diferentes instantes del día 16 de Julio de 1979.

En dicha figura puede apreciarse que los perfiles y evolución de la distribución de temperaturas obtenida mediante la aplicación del modelo son muy similares a los derivados de la experimentación.

En concreto, los resultados relativos a las 8.00 horas y 24.00 horas se ajustan de forma precisa a los resultados experimentales, no observándose diferencias superiores al 7%. Sin embargo, a las 15.00 horas, dichas diferencias aumentan hasta casi un 13% y tienen lugar en los nodos próximos a la fibra superior del tablero del puente. Por otra parte, puede observarse que las temperaturas experimentales de dichos nodos son, en horas en las que existe radiación solar incidente sobre la superficie superior, sensiblemente superiores a las obtenidas mediante el modelo analítico. Todo ello nos hace pensar que la intensidad de radiación solar incidente sobre el tablero del puente era ligeramente superior a la adoptada, la cual venía determinada por la medición llevada a cabo en el observatorio meteorológico situado a 8 Km. del lugar de emplazamiento del puente.

Posteriormente se lleva a cabo un análisis comparativo entre los resultados experimentales y los resultados analíticos derivados del presente estudio correspondientes al día 2 de Mayo de 1979.

Dicho análisis tiene interés por dos razones. La primera de ellas es que se contrastará de nuevo el modelo numérico, pero adoptando en este caso la opción genérica que permite obtener la intensidad de radiación solar incidente sobre las superficies expuestas en función de datos objetivos relativos al emplazamiento del puente. La segunda es que los resultados experimentales correspondientes a este día en cuestión muestran que existe radiación solar incidente sobre una de las almas del cajón lo que origina la aparición de un gradiente térmico transversal. El modelo numérico de-

sarrollado, como se verá a continuación, permitirá visualizar este efecto.

Para llevar a cabo el análisis es necesario conocer, por un lado, la latitud y altitud del lugar de emplazamiento del puente y, por otro, el azimut de éste. La figura 2.23 muestra una planta del puente analizado. En ella puede observarse que el alma que recibe radiación solar, dada la trayectoria que el sol describe con respecto al puente, es la situada en el lado oeste.

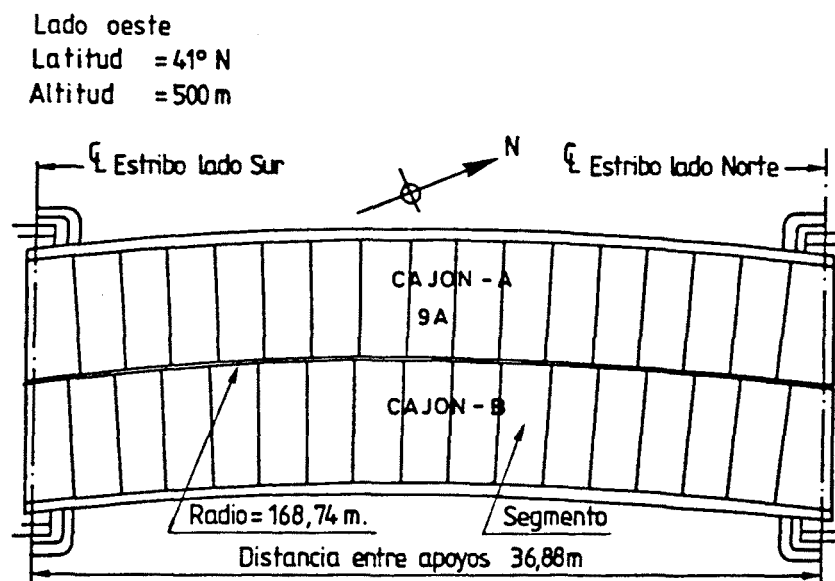


Fig. 2.23.- Planta del puente instrumentado. Dóvela instrumentada 9A.

Por último hay que definir el factor de turbidez. Dicho factor, como ya se ha comentado con anterioridad, refleja el índice de nubosidad y el índice de polución ambiental existentes en la zona de emplazamiento. En este caso, dadas las condiciones de emplazamiento, una vasta llanura en la que el sol incide de forma clara sobre el tablero del puente sin observarse ningún accidente geográfico ni forestal que lo impida -fotografía aérea del emplazamiento (Hoffman

et alt (42))-, y las condiciones ambientales correspondientes al 2 de Mayo de 1979 se adopta para dicho factor el valor de 1.8, cota inferior de su rango de variación.

La velocidad del viento y la evolución de la temperatura ambiente han sido extraídas de las mediciones experimentales llevadas a cabo en el observatorio metereológico próximo al puente.

En resumen, los datos necesarios para obtener la respuesta térmica del puente y posteriormente poder compararla con la obtenida experimentalmente se recogen en la tabla 2.6.

| Propiedades físicas y térmicas del hormigón | |
|--|---------------------|
| Conductividad térmica (W/m °C) | 1.5 |
| Calor específico (J/kg °C) | 960. |
| Factor de absorción solar | 0.5 |
| Emisividad | 0.88 |
| Coef. dilatación térmica (°C ⁻¹) | 10x10 ⁻⁶ |
| Densidad (kg/m ³) | 2400. |
| Módulo de elasticidad (kp/cm ²) | 351786. |
| Condiciones climatológicas y ambientales | |
| Día del año | 2 de Mayo |
| Velocidad del viento (m/seg) | 1.0 |
| Temp. ambiente mínima (°C) | 4.4 |
| Temp. ambiente máxima (°C) | 15.0 |
| Factor de turbidez | 1.8 |
| Datos relativos al emplazamiento del puente | |
| Latitud (°N) | 41.0 |
| Altitud (m) | 500. |
| Azimut (°) | +80. |

Tabla 2.6.- Datos necesarios para el análisis comparativo de los resultados relativos al puente analizado, correspondientes al 2 de Mayo de 1979.

La figura 2.24 muestra las distribuciones de temperaturas según un eje vertical que conecta los termopares situados en 1, 2, 3, 5, 9, 8 y 7 (ver figura 2.21) obtenidas analítica y experimentalmente. Las distribuciones presentadas corresponden, en ambos casos, a las 15.0 horas, instante muy próximo al de máxima curvatura térmica impuesta según el eje vertical.

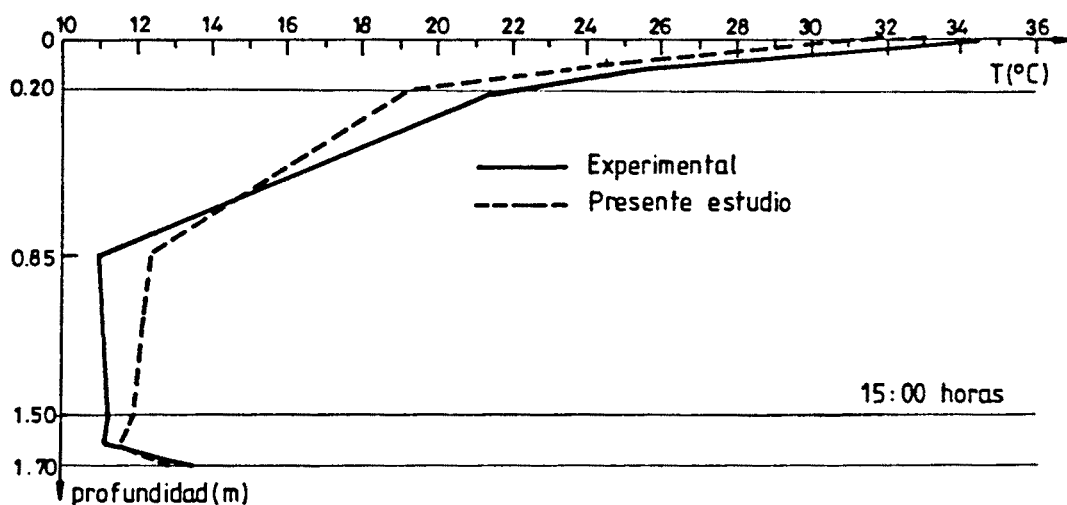


Fig. 2.24.- Distribuciones de temperaturas según un eje vertical que conecta los termopares 1,2,3,5,9,8 y 7, correspondientes a las 15.0 horas del día 2 de Mayo de 1979.

En dicha figura puede apreciarse que las temperaturas obtenidas mediante la aplicación del modelo difieren en muy poco de las obtenidas experimentalmente -la diferencia máxima alcanzada es del 12%-.

A continuación, en la figura 2.25 se presentan las distribuciones de temperatura según un eje horizontal que conecta los termopares 10, 11, 12, 8, 6, 5 y 4 (ver figura 2.21) correspondientes a diferentes instantes del día 2 de Mayo.

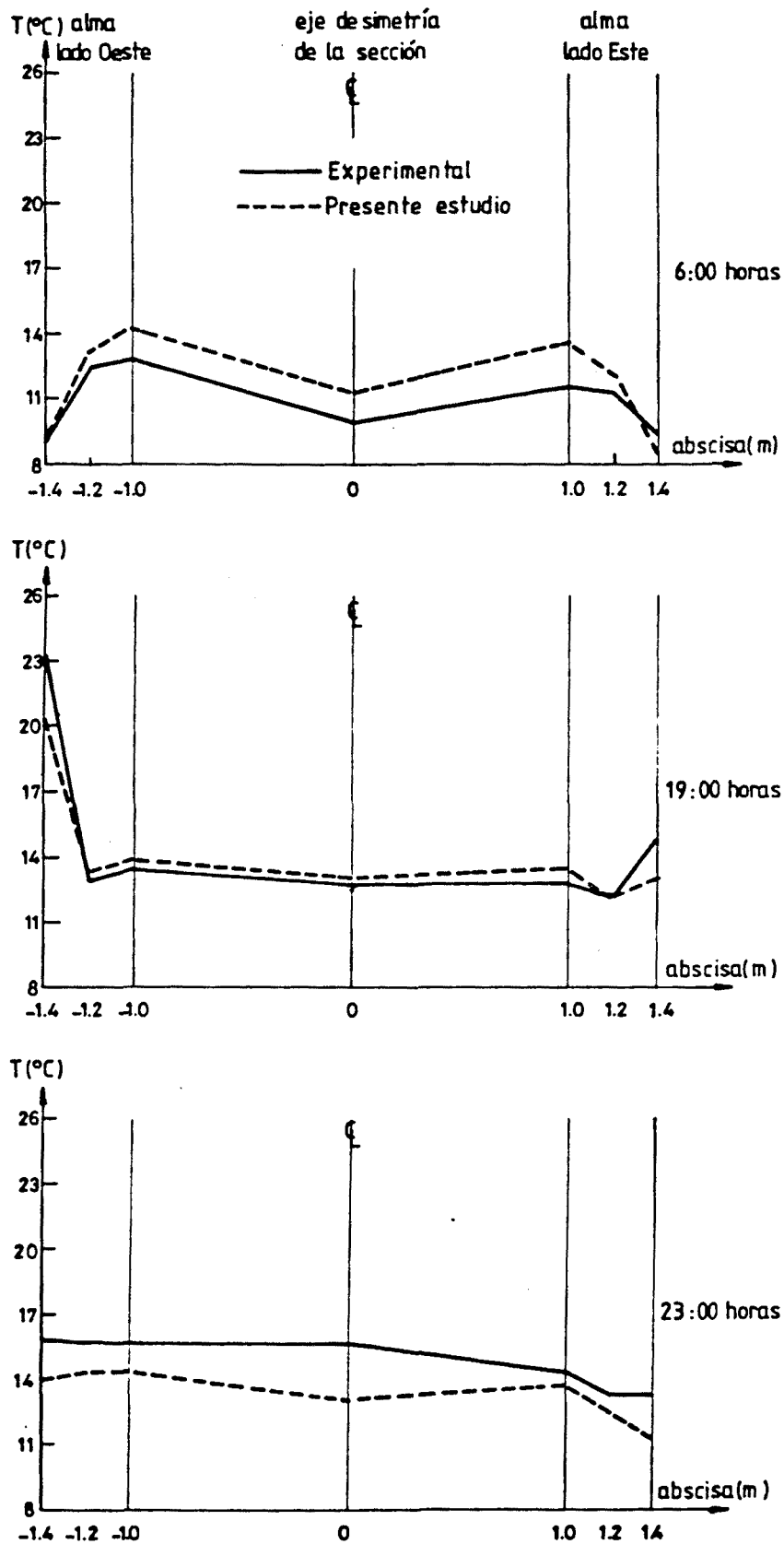


Fig. 2.25.- Distribuciones de temperaturas según un eje horizontal imaginario que conecta los termopares 10, 11, 12, 8, 6, 5 y 4 a diferentes instantes del día 2 de Mayo de 1979.

En ella puede observarse que, cualitativamente, los perfiles y la evolución de las distribuciones de temperaturas obtenidas analítica y experimentalmente son muy similares. Desde un punto de vista cuantitativo la diferencia máxima observada para un nodo es de un 17%. Estas diferencias son lógicas puesto que, por una parte, el modelo numérico no contempla la posibilidad de existencia de peralte en los puentes con planta curva y, por otra, determinados parámetros climatológicos han sido implementados numéricamente adoptando ciertas hipótesis simplificativas las cuales, para algunos instantes del día, no permitirán reflejar con gran precisión las condiciones reales existentes.

Por otra parte, es de interés señalar que la influencia de la radiación solar incidente sobre una de las almas puede ser, y lo es en este caso, significativa, observándose que la temperatura en el punto 10, situado en el paramento lateral exterior del alma lado oeste, aumenta de forma apreciable, lo cual se traduce en curvaturas térmicas impuestas según el plano horizontal -en el puente que nos ocupa el gradiente térmico horizontal máximo es de 2.5°C y acaece en instantes próximos a las 19.0 horas-.

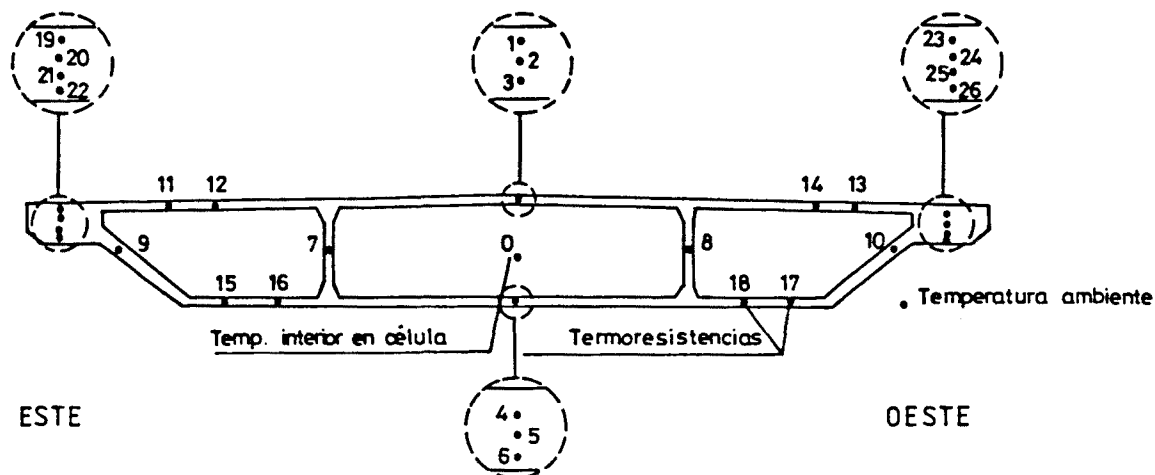
2.4.5.- Puente Ingeniero Carlos Fernández-Casado

Durante la construcción de este puente, emplazado en el Embalse de Barrios de Luna, se llevó a cabo la instrumentación de diversas dovelas para facilitar y controlar el procedimiento constructivo de la obra. Ello permitió conocer, a lo largo del período de tiempo en el que se construyó el puente, la temperatura del hormigón y su evolución en numerosos puntos de la sección transversal de dichas dovelas instrumentadas.

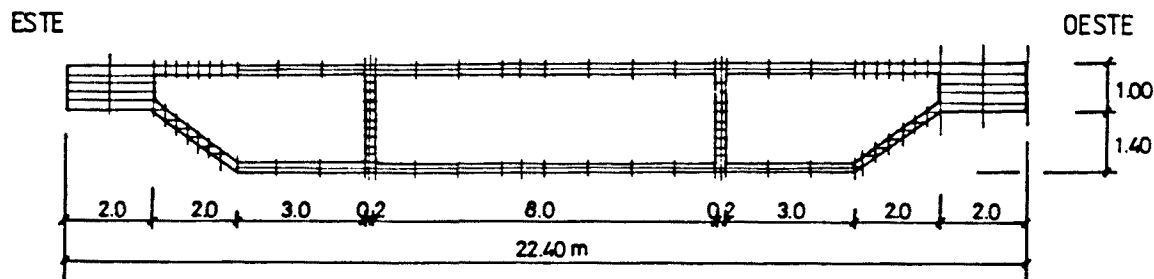
En este ejemplo, los resultados obtenidos experimentalmente se compararán con los obtenidos mediante la aplicación del modelo y programa numérico desarrollados. Aunque este último no contempla la posibilidad de obtener la respuesta térmica de un puente durante su período de construcción -influencia del calor de fraguado y, en el caso de secciones celulares o aligeradas, influencia de la existencia de flujo de aire en los aligeramientos o células-, los resultados obtenidos son, como se verá con posterioridad, similares a los obtenidos experimentalmente.

La figura 2.26 muestra la sección transversal del puente analizado así como la situación aproximada de las termoresistencias, deducida de una representación gráfica a escala no acotada. Ello puede traducirse en diferencias apreciables entre los valores experimentales y analíticos de las temperaturas -recordemos que en los ejemplos anteriores se pueden observar variaciones de temperatura significativas en pocos centímetros de espesor, ya sea en las alas, almas o voladizos-. También en esta misma figura se presenta la sección analizada y su correspondiente malla de discretización.

En este ejemplo se ha llevado a cabo el análisis térmico de una de las dovelas situadas entre la pila Sur y la sección centro luz del vano central del puente. El día del año para el cual se ha obtenido la respuesta térmica corresponde al 28 de Junio. Para dicho día se dispone de resultados experimentales de temperaturas en diversos puntos de la sección transversal y a diferentes instantes.



a) Sección transversal. Disposición aproximada de termoresistencias



b) Sección transversal simplificada. Malla de discretización

Fig. 2.26.- Sección transversal real y simplificada para el análisis del Puente Ingeniero Carlos Fernández-Casado.

Los datos necesarios para afrontar el análisis se regocen en la tabla 2.7.

| Propiedades físicas y térmicas del hormigón | |
|--|---------------------|
| Conductividad térmica (W/m°C) | 1.5 |
| Calor específico (J/kg°C) | 960. |
| Factor de absorción solar | 0.5 |
| Emisividad | 0.88 |
| Coef. dilatación térmica (°C ⁻¹) | 10x10 ⁻⁶ |
| Densidad (kg/m ³) | 2400. |
| Módulo de elasticidad (kp/cm ²) | 350000. |
| Condiciones climatológicas y ambientales | |
| Día del año | 28 de Junio |
| Velocidad del viento (m/seg) | |
| - Superficies exteriores | 6.0 |
| - Superficies interiores | 2.0 |
| Temperatura ambiente mínima (°C) | 9.1 |
| Temperatura ambiente máxima (°C) | 23.4 |
| Factor de turbidez | 2.5 |
| Datos relativos al emplazamiento del puente | |
| Latitud (°N) | 42.8 |
| Altitud (m) | 1200. |
| Azimut (°) | ~-90. |

Tabla 2.7.- Datos necesarios para el análisis comparativo de los resultados relativos al puente analizado, correspondientes al 28 de Junio de 1982.

Los valores adoptados por las propiedades físicas y térmicas del hormigón son valores que, a falta de ensayos de información, pueden ser considerados como valores medios corrientes en este tipo de estructuras.

En lo referente a las condiciones climatológicas, se ha adoptado un valor de velocidad de viento de 6.0 m/seg para las superficies exteriores y un valor de 2.0 m/seg para las superficies interiores de las células. Dado el lugar de emplazamiento del puente y habiendo observado en las referencias bibliográficas del Instituto Nacional de Meteorología (Atlas Climático de España (47)) las frecuencias y velocidades de viento de la zona parece adecuado el haber adoptado tales valores. En cuanto al factor de turbidez, se ha asignado a este un valor de 2.5 el cual refleja el pequeño índice de polución atmosférica existente y el número medio de horas de sol en dicha zona en el mes de Junio, próximo a las 11 horas (Guía resumida del Clima en España (46)).

La figura 2.27 muestra las distribuciones de temperaturas obtenidas analítica y experimentalmente según el eje de simetría de la sección. Los instantes para los cuales se presentan dichas distribuciones corresponden a aquellos tiempos para los cuales se dispone de resultados experimentales.

En dicha figura puede observarse que los resultados obtenidos son similares a los experimentales si bien, en algún caso, pueden apreciarse diferencias relativas próximas al 22%. Estas diferencias que, en un primer análisis, pueden considerarse algo elevadas, son achacables a diversas razones.

La primera de ellas, ya comentada con anterioridad, es el desconocimiento del lugar exacto de ubicación de las termorresistencias en la medición experimental de temperaturas, lo cual puede acarrear el que se estén comparando valores de temperaturas que corresponden a puntos distintos de la sección transversal del puente.

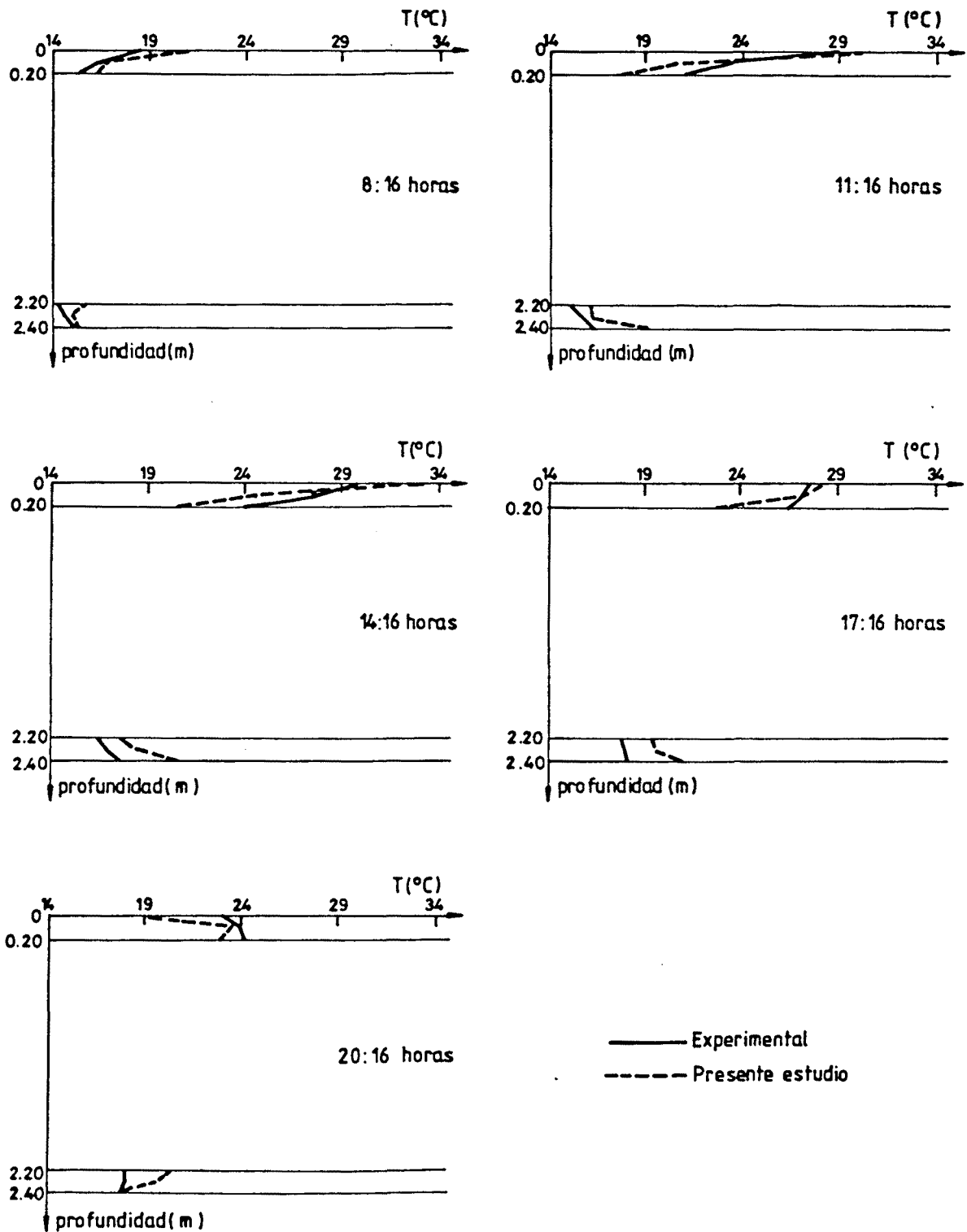


Fig. 2.27.- Distribuciones de temperaturas según el eje de simetría de la sección para diferentes instantes del día 28 de Junio de 1982 (hora solar).

Una segunda razón puede deducirse de la propia observación de la citada figura 2.27. Los resultados derivados del presente estudio generan mayores gradientes térmicos en la losa superior del tablero y muestran una menor velocidad de cambio de la temperatura en los nodos interiores -evolución de la temperatura del nodo situado a 0.10 metros de la fibra superior del tablero-. Ambas circunstancias nos hacen pensar que la difusividad térmica del hormigón ejecutado en obra sería algo mayor que la supuesta en el análisis térmico.

Una última razón fundamental que justifica tales diferencias es la propia evolución de la temperatura en el interior de las células. La figura 2.28 muestra las evoluciones de la temperatura ambiente y de la temperatura interior de las células obtenidas analítica y experimentalmente.

De la observación de las gráficas presentadas en dicha figura se desprende que la evolución analítica de la temperatura en el interior de la célula difiere de la obtenida experimentalmente.

Así, por una parte, puede apreciarse que, mediante la aplicación del modelo numérico expuesto, el máximo de la temperatura interior de la célula se alcanza en un instante próximo a las 20 horas mientras que, experimentalmente, dicho máximo tiene lugar a las 14 horas. Por otra parte, también puede apreciarse que, según los resultados experimentales, la temperatura en el interior de la célula ofrece un perfil evolutivo muy similar al de la temperatura ambiente exterior teniendo lugar los máximos de ambas funciones en instantes muy próximos mientras que de los resultados derivados del presente estudio se desprende que la evolución de la temperatura en el interior de la célula sufre un retraso temporal próximo a las 6 horas con respecto a la de la temperatura ambiente. Todo ello influye de forma notable en los valores de la temperatura de los nodos situados en las su-

perfiles interiores de las células y en los de los nodos próximos a éstos y contribuye a disminuir los gradientes térmicos en las losas superior e inferior del tablero del puente. A pesar de todas estas circunstancias, se puede concluir que los resultados analíticos se ajustan con suficiente precisión a los obtenidos experimentalmente.

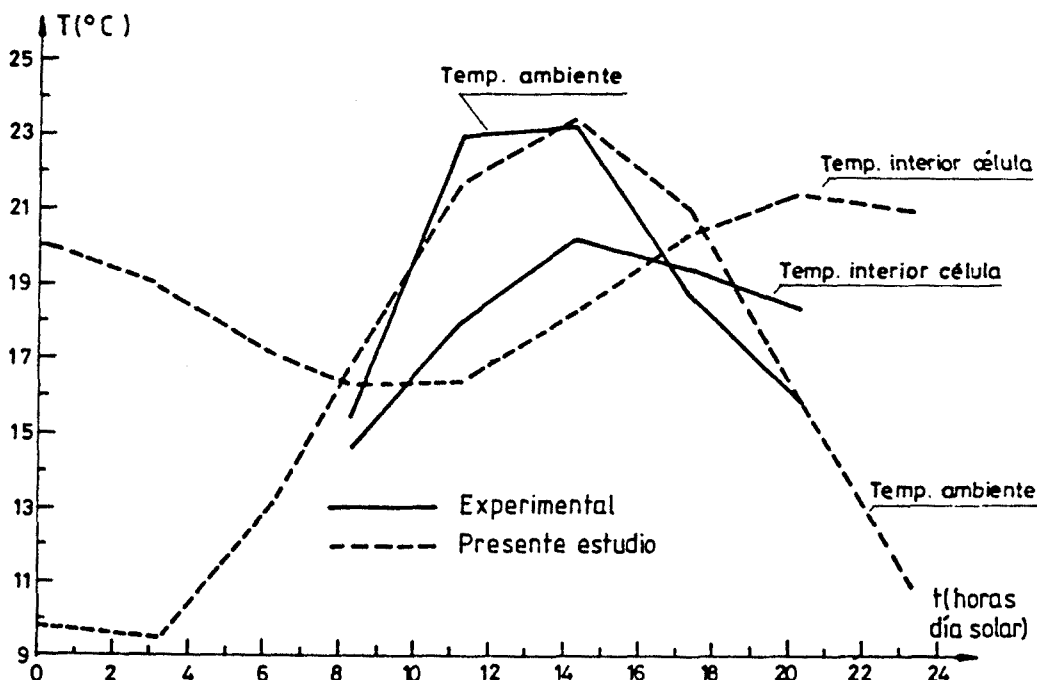


Fig. 2.28.- Evoluciones analíticas y experimentales de las temperaturas ambiente e interior de las células para el día 28 de Junio de 1982 en el puente analizado.

Por último, en base a los resultados observados, puede afirmarse que para obtener la respuesta térmica de un puente cajón durante su fase constructiva es necesario considerar las células como superficies abiertas, y no como volúmenes cerrados como ocurre en el caso de que se analice el puente

en su situación definitiva, imponiendo como condición de con
torno la existencia de una temperatura ambiente interior. Es
ta debería presentar un perfil evolutivo a lo largo del día
muy similar al de la temperatura ambiente exterior aunque
con menor rango de variación.

C A P I T U L O 3

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

3.1.- INTRODUCCION

Una vez desarrollado y expuesto de forma amplia el modelo numérico para poder llevar a cabo el análisis térmico y tensional a nivel sección se pasa, a continuación, a realizar diversos estudios paramétricos de las variables que influyen en el fenómeno de la transmisión de calor para las diferentes tipologías transversales comúnmente utilizadas en el campo del diseño de los puentes de hormigón armado y hormigón pretensado.

Las secciones transversales de los puentes de hormigón construídos en España, preferentemente pretensados, pueden englobarse, en la mayoría de los casos, en una de las siguientes tipologías:

- Puentes losa maciza
- Puentes losa aligerada
- Puentes de sección cajón unicelular
- Puentes de sección cajón multicelular
- Puentes de vigas

Ello viene corroborado por la bibliografía existente relativa a las realizaciones españolas de puentes de hormigón pretensado (ATEP. Realizaciones españolas (9)).

Desde un punto de vista térmico y atendiendo, fundamentalmente, al fenómeno de la transmisión de calor y a la propia geometría de la sección transversal, dichas tipologías pueden reagruparse de la siguiente forma:

- Puentes en los que no existan huecos interiores: puentes losa maciza.
- Puentes en los que existan huecos interiores: puentes losa aligerada y puentes de sección en cajón unicelular y pluricelulares.
- Puentes de vigas.

Según esta clasificación se llevarán a cabo los estudios paramétricos correspondientes a cada una de las variables que influyen en el fenómeno de la transmisión de calor en puentes de hormigón.

Los objetivos que persiguen tales estudios paramétricos son, fundamentalmente, dos:

- Analizar la respuesta térmica y tensional a nivel sección observando la influencia de cada una de las variables -estructurales, ambientales y de emplazamiento- sobre las distribuciones de temperaturas y, tensiones autoequilibradas y sobre las acciones térmicas -gradientes térmicos e incrementos relativos de temperatura media-. Ello se recoge en el presente capítulo.
- Obtener un conjunto de resultados que sean punto de partida para poder dar recomendaciones de diseño relativas a la incidencia de la acción térmica ambiental en la respuesta estructural de los puentes de hormigón. Dichas recomendaciones se plantearán y analizarán en posteriores capítulos.

La metodología seguida para realizar los estudios paramétricos parte de un estudio de referencia en el que todas las variables y parámetros que influyen en la respuesta térmica y tensional a nivel sección del puente de hormigón poseen valores conocidos. Posteriormente cada estudio paramétrico se realiza manteniendo constantes todas las variables excepto la variable que se analice, la cual adoptará diversos valores en función de su rango de variación.

Los valores adoptados por los diversos parámetros en el estudio de referencia generarán situaciones algo desfavorables en lo que se refiere a las acciones térmicas impuestas y a estados tensionales asociados. Por ello no es de extrañar que algunos de los resultados obtenidos correspondien

tes a gradientes térmicos o a tensiones autoequilibradas de máxima tracción sean de una magnitud considerable.

Los resultados obtenidos para cada uno de los parámetros analizados son ciertamente numerosos; no obstante, para no hacer tediosa la exposición y sistematizar la misma, aquéllos se presentarán, en general, de la siguiente forma:

- Resultados relativos a las distribuciones de temperaturas y de tensiones autoequilibradas correspondientes a los instantes de máximas curvaturas térmicas impuestas.
- Resultados relativos a la evolución diaria de los gradientes térmicos lineales equivalentes -curvaturas térmicas impuestas- y de la temperatura media de la sección.
- Resultados relativos a la influencia del parámetro analizado sobre los gradientes térmicos lineales máximos -máximas curvaturas térmicas impuestas- y sobre los incrementos relativos máximos de temperatura media -expansión eficaz diaria entendida ésta como la diferencia entre la temperatura media máxima y la temperatura media mínima de la sección-.
- Resultados relativos a las distribuciones de tensiones autoequilibradas correspondientes a los instantes en que se genera la máxima tensión de tracción.

Tal presentación de resultados permitirá visualizar de forma clara la influencia de cada uno de los parámetros analizados. No obstante, en algunos casos, será aconsejable ampliar la exposición de resultados y, en otros, disminuirla debido a la relevancia o no del factor analizado respectivamente.

3.2.- ESTUDIO PARAMETRICO DE LA SECCION LOSA MACIZA

La sección losa maciza analizada corresponde a la sección transversal de un puente de hormigón armado de 13 metros de luz situado sobre la riera de Can Estapé en el término municipal de Rubí, provincia de Barcelona. A dicho puente ya se ha hecho referencia en el capítulo anterior de la presente tesis. La sección transversal y la discretización adoptada para llevar a cabo el estudio paramétrico utilizando el modelo numérico expuesto en el capítulo 2º se presentan en la figura 3.1.

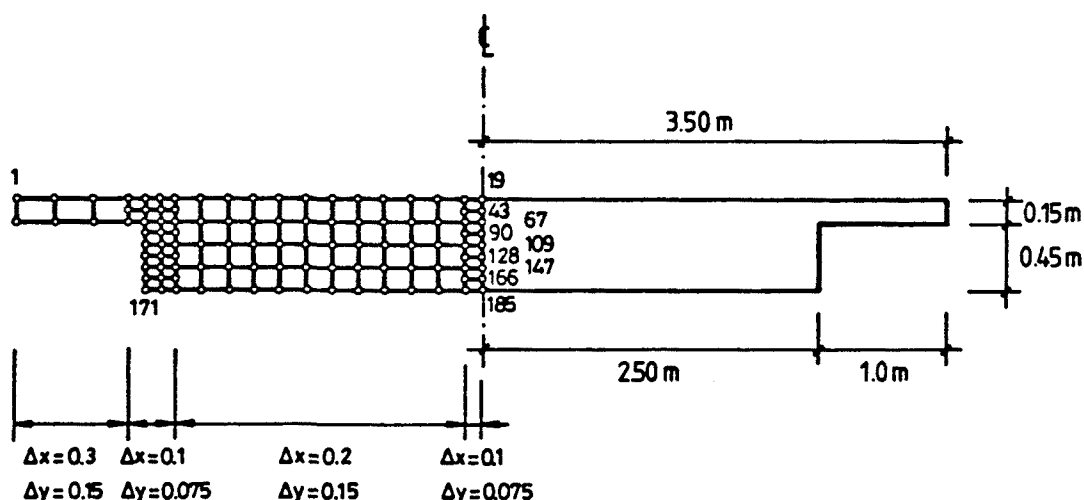


Fig. 3.1.- Sección losa maciza analizada paraméricamente. Discretización en diferencias finitas.

El hecho de que se estudie esta sección transversal y no otra es debido a que se tiene conocimiento de alguna de las variables que influyen en la respuesta térmica del puente y a que, como se indicó con anterioridad en el capítulo 2º, dicho puente fue instrumentado por el autor de esta tesis con objeto de obtener resultados experimentales relativos a las distribuciones de temperaturas. Ello, evidentemente, no resta generalidad al análisis y a las conclusiones derivadas de éste, máxime cuando uno de los parámetros a analizar es el canto total de la losa maciza.

El estudio básico de referencia es el definido por la adopción de los valores de las propiedades estructurales y térmicas de los materiales y las condiciones ambientales y localización y orientación del puente que se presentan en la tabla 3.1.

| | | |
|---|--|---------------------|
| Propiedades térmicas y estructurales | Conductividad (W/m°C) | 1.5 |
| | Calor específico (J/kg°C) | 960. |
| | Densidad (kg/m ³) | 2400. |
| | Absorción solar hormigón | 0.5 |
| | Emisividad hormigón | 0.88 |
| | Coef. dilatación térmica (°C ⁻¹) | 10.10 ⁻⁶ |
| | Módulo de elasticidad (Kp/cm ²) | 3.10 ⁵ |
| | Capa asfáltica de rodadura | --- |
| | Canto total (m) | 0.60 |
| Condiciones ambientales | Temperatura ambiente media (°C) | 10.5 |
| | Rango variación temp. amb. (°C) | 9.0 |
| | Velocidad viento (m/seg) | 1.0 |
| | Factor de turbidez | 1.8 |
| | Día analizado | 21 Marzo=81. |
| Localización y orientación | Latitud (°N) | 41.40 |
| | Altitud (m) | 45. |
| | Azímüt (°) | eje E-O=0. |

Tabla 3.1.- Valores adoptados en el estudio de referencia.

Es conveniente incidir en el hecho de que el día analizado en el estudio de referencia es el 21 de Marzo al cual corresponden unas determinadas condiciones ambientales de radiación solar y temperatura.

A continuación, se analiza de forma paramétrica cada una de las variables que se muestran en la tabla 3.1.

Conductividad

De los tres parámetros o propiedades que intervienen en la ecuación diferencial de transmisión de calor (ecuación |1.15|), es decir, en el valor que adopta la difusividad térmica del hormigón, es la conductividad la que ofrece un mayor rango de variación manteniéndose prácticamente constantes los valores de la densidad y el calor específico. Debido a ello el estudio paramétrico se centrará en el análisis de la conductividad térmica del hormigón.

El valor adoptado por esta propiedad varía desde 1.3 a 2.2 W/m^oC cubriéndose de esta forma un amplio abanico de valores posibles.

Los resultados relativos a las distribuciones de temperaturas y de tensiones autoequilibradas correspondientes a instantes de máxima curvatura térmica impuesta indican que existen pocas variaciones entre tales distribuciones al ir variando el valor de la conductividad térmica del hormigón. Dichas variaciones, comparando los resultados obtenidos para los valores extremos del rango de variación de la conductividad, son inferiores al 13%.

Algo similar ocurre con la evolución diaria del gradiente térmico y de la temperatura media de la sección. La tabla 3.2 permite comparar algunos de los valores obtenidos para diferentes instantes del día y para dos valores de la conductividad sensiblemente diferentes. En dicha tabla puede apreciarse que las diferencias no son significativas.

Para valores de la conductividad comprendidos entre 1.5 y 2.2 las temperaturas medias y gradientes térmicos que se obtienen se encuentran comprendidos entre los valores presentados en la tabla 3.2.

| Instante del día (hora solar) | Conductividad (W/m°C) | | | |
|----------------------------------|-----------------------|------------------|----------------|------------------|
| | 1.50 W/m°C | | 2.20 W/m°C | |
| | Gradiente (°C) | Temp. media (°C) | Gradiente (°C) | Temp. media (°C) |
| 2:0 | 0.5 | 13.6 | -0.2 | 13.7 |
| 8:0 | 0.5 | 12.5 | 0.3 | 12.5 |
| 14:0 | 15.0 | 16.9 | 14.2 | 16.8 |
| 20:0 | 6.3 | 16.1 | 5.5 | 16.2 |

Tabla 3.2.- Evolución diaria del gradiente térmico y de la temperatura media para dos valores de la conductividad.

En lo relativo a la influencia de la conductividad sobre los gradientes máximos e incrementos relativos de temperatura media puede observarse que aquélla no es significativa apreciándose en la figura 3.2 que el gradiente térmico disminuye a medida que aumenta la conductividad; sin embargo, tal variación es, ciertamente, poco notable.

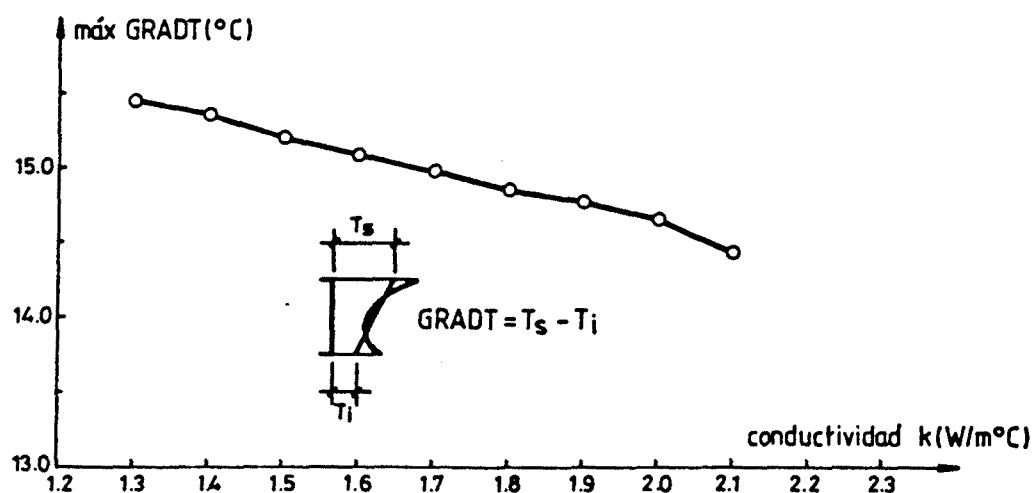


Fig. 3.2.- Influencia de la conductividad del hormigón sobre los gradientes térmicos máximos.

Cabe señalar que estudios realizados por diversos autores que han investigado en el campo de los efectos térmicos ambientales en puentes de hormigón no consideran la conductividad térmica como una variable sino que ésta permanece constante en torno a un valor de $1.5 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ (Emerson (37), Elbadry y Ghali (33), Dilger et al. (28)). Si bien el rango de variación de la conductividad térmica del hormigón puede ser amplio, puede adoptarse, para un hormigón ordinario, un valor constante de 1.5 para tal propiedad térmica.

A la vista de lo expuesto con anterioridad puede concluirse que la conductividad térmica del hormigón no incide en los perfiles de distribuciones térmicas y tensionales ni tampoco en las acciones térmicas a las que se ve sometida la sección analizada. Por otra parte, en base a los resultados obtenidos en el estudio paramétrico y a los obtenidos por otros autores, se considerará que la conductividad adopta un valor constante no analizándose tal propiedad del hormigón como variable en los estudios paramétricos de las diferentes tipologías transversales. Así pues, las conclusiones extraídas de este estudio paramétrico, relativas a un puente losa maciza, pueden ser extrapoladas a puentes con otras tipologías.

Canto de la sección

En secciones transversales en losa maciza, la longitud de voladizos y la inclinación de los paramentos laterales tienen poca incidencia en la forma y magnitud de las distribuciones del campo térmico. Ello es así debido al hecho de que dichas secciones no poseen cantos elevados y, si existen voladizos, éstos proyectarán sombra sobre los costales de la sección. En el caso de que no fuera así, existirían fuentes de calor en dichos paramentos; no obstante, los efectos de éstas se ven fuertemente amortiguados debido a la gran masa de hormigón existente en dirección horizontal, tal como se mostrará con posterioridad. De ahí que, en lo que se refiere a la geometría de la sección transversal en losa maciza, únicamente se

lleve a cabo el estudio paramétrico del canto de la sección. Este adopta los valores de 0.90, 0.75, 0.60, 0.45 y 0.30 metros, cantos éstos que son elegidos en el diseño de puentes losa maciza de sección constante o variable para salvar luces pequeñas o medias, próximas a los 20 metros.

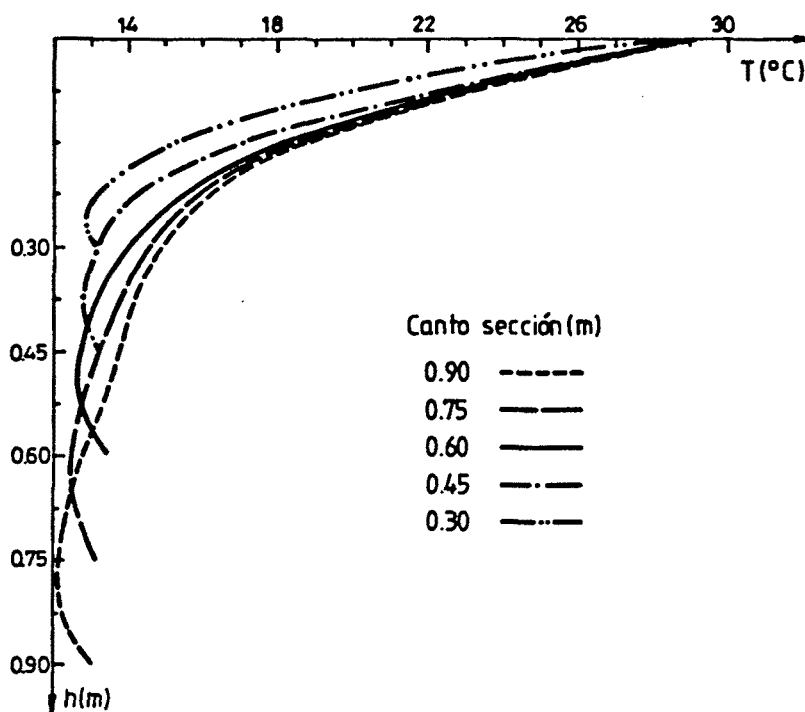
Las figuras 3.3.a y 3.3.b muestran, respectivamente, las distribuciones de temperaturas y tensiones según el eje vertical de simetría de la sección correspondientes al instante en el que tiene lugar el máximo gradiente térmico positivo para cada una de las losas analizadas.

Analizando las gráficas presentadas en estas figuras se observa que las distribuciones de temperaturas correspondientes a máximos gradientes térmicos, es decir, máximas curvaturas térmicas impuestas, poseen un aspecto similar si bien las distribuciones de temperaturas que tienen lugar en secciones de cantos pequeños -0.30 ó 0.45 metros- no presentan una no linealidad del campo térmico tan acusada como en el caso de losas de cantos superiores.

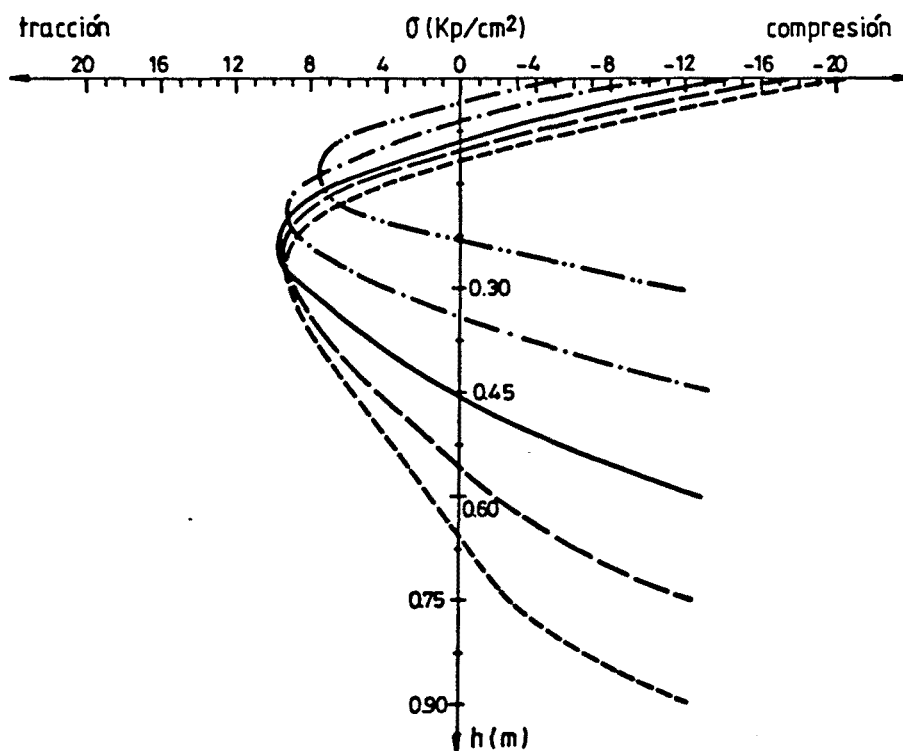
Ello nos lleva a la conclusión de que a medida que aumenta el canto total de la sección mayores serán las tensiones internas autoequilibradas inducidas por la no linealidad del campo de temperaturas. Dicha conclusión se ve perfectamente reflejada en la figura 3.3.b.

La evolución del gradiente térmico a lo largo de las veinticuatro horas del día para las diferentes losas analizadas puede observarse en la figura 3.4.

Del análisis comparativo de dichas gráficas pueden hacerse algunos comentarios. Por una parte, las secciones de pequeño canto experimentan un rango de variación del gradiente térmico más amplio que las secciones de canto más elevado. Como puede verse en la figura 3.4, la losa de 0.30 metros de canto alcanza el máximo gradiente positivo y el máximo gradiente negativo.



a) Distribución de temperaturas



b) Distribución de tensiones

Fig. 3.3.- Distribuciones de temperaturas y tensiones en losa maciza para diversos valores del canto y correspondientes a instantes de máximo gradiente térmico.

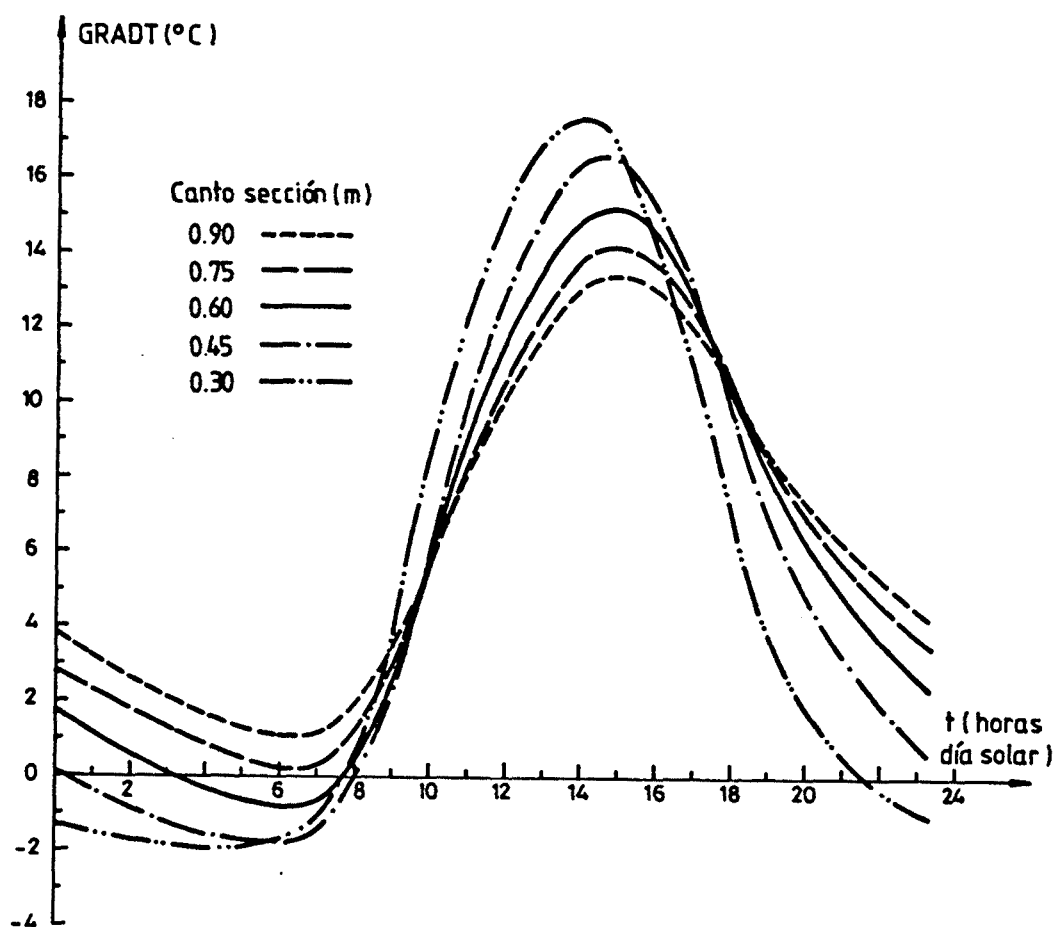


Fig. 3.4.- Evolución del gradiente térmico a lo largo del día para las diferentes losas analizadas.

Por otra parte, puede apreciarse que, bajo condiciones normales de ambiente, las diferentes losas analizadas se ven sometidas a curvaturas térmicas negativas en horas de madrugada. Los gradientes térmicos negativos alcanzan valores relativamente pequeños si se comparan con los de máximos gradientes positivos, observándose un ligero aumento de aquéllos a medida que el espesor de la losa va disminuyendo. Los gradientes positivos máximos se alcanzan en torno a las 14 horas.

En cuanto a la evolución diaria de la temperatura media, en la figura 3.5 puede observarse que ésta sigue una variación de tipo periódico, alcanzándose el máximo con un desfase de 1 a 2 horas con respecto al instante en el que se genera el máximo gradiente térmico positivo. Así, las tempera-

turas medias máximas tienen lugar alrededor de las 16 horas de la tarde mientras que las temperaturas medias mínimas ocurren en torno a las 7 horas de la mañana. Es en el intervalo de tiempo comprendido entre las 7 horas y las 16 horas cuando es de esperar que el puente experimente su expansión diaria observándose que la velocidad con la que se calienta el puente es mayor que la de enfriamiento lo que indica claramente que la principal fuente de calor es la radiación solar absorbida. En la figura 3.5 puede apreciarse este hecho viéndose que la dilatación total del puente ocurre en un intervalo de tiempo de 9 horas mientras que la contracción total diaria ocurre en un intervalo de 15 horas aproximadamente.

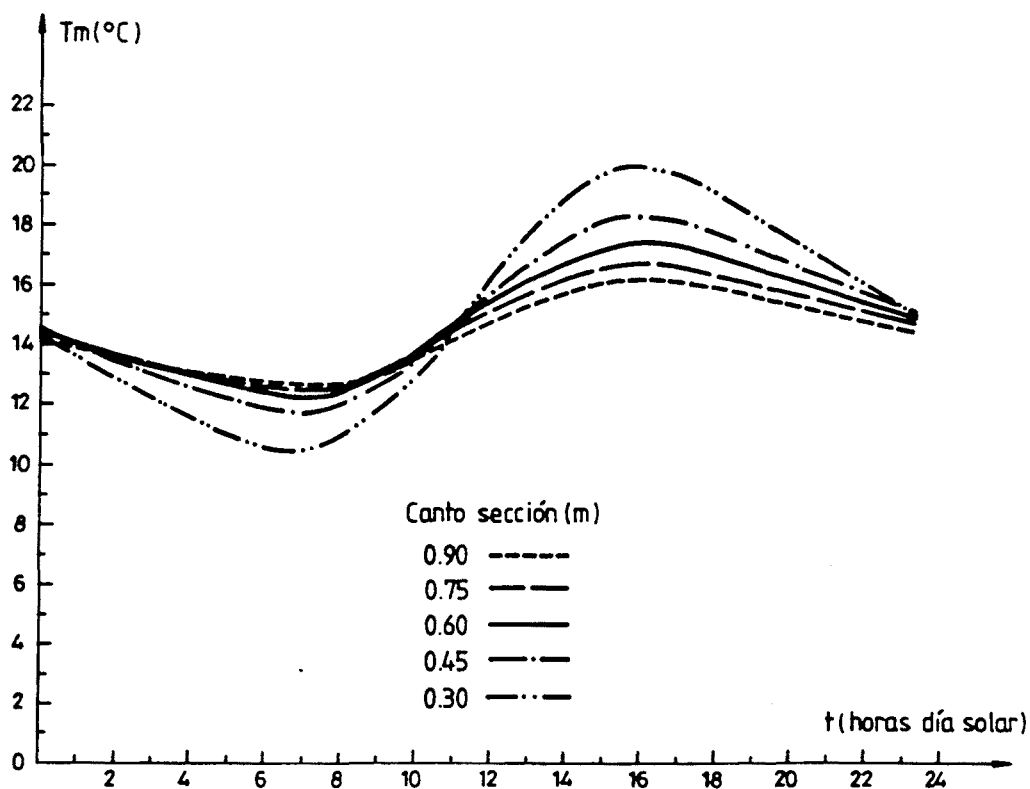
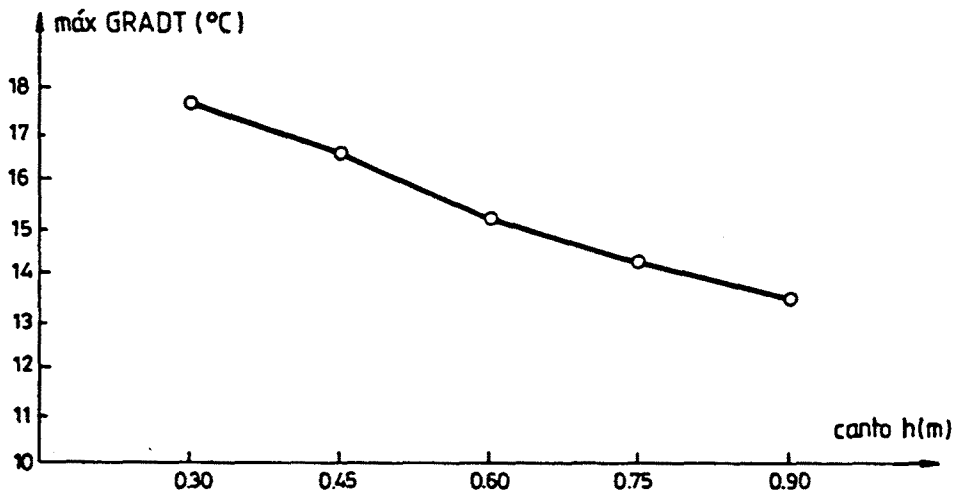
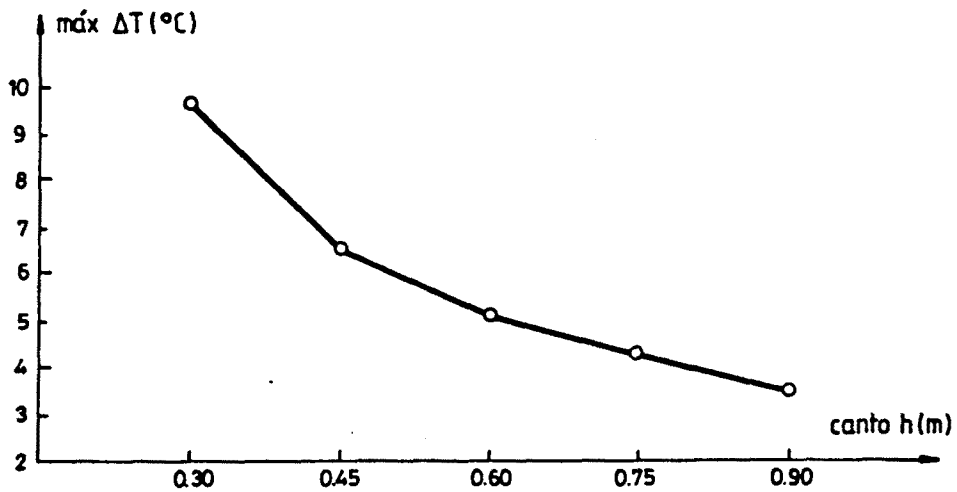


Fig. 3.5.- Evolución de la temperatura media a lo largo del día para las diferentes losas analizadas.

Las figuras 3.6.a y 3.6.b muestran respectivamente la influencia del parámetro analizado -canto de la losa- sobre los máximos gradientes térmicos y los incrementos relativos máximos de temperatura media alcanzados por cada una de las losas analizadas.



a) Máximos gradientes térmicos positivos



b) Máximos incrementos relativos de temperatura media

Fig. 3.6.- Influencia del canto de la losa maciza sobre los valores máximos de gradientes térmicos e incrementos relativos de temperatura media.

La figura 3.6.a refleja la ya comentada tendencia de que losas de pequeño canto experimentan mayores gradientes térmicos y, por consiguiente, mayores curvaturas térmicas impuestas.

Algo similar ocurre con el incremento diario de temperatura media experimentado por la losa. En la figura 3.6.b queda reflejado que secciones de pequeño espesor se encuentran sometidas a una mayor oscilación diaria de la temperatura media. Es decir, de alguna forma, puentes losa de pequeños cantos se enfrían y calientan más que puentes losa maciza con cantos más elevados. La oscilación o rango diario de variación de la temperatura media del puente dará una idea de cuál va a ser la magnitud del movimiento de dilatación experimentado por aquél.

Se analizan, a continuación, los resultados obtenidos relativos a tracciones máximas para cada una de las losas macizas analizadas. En primer lugar, cabe señalar que existen dos instantes a lo largo del día para los cuales se producen tensiones autoequilibradas de tracción de un valor considerable con respecto a la resistencia a tracción de un hormigón ordinario.

En horas de madrugada, comprendidas entre la 1 hora y las 5 horas, los paramentos superior e inferior de la sección se encuentran, en general, a menor temperatura que las fibras interiores de la misma sección. De la obtención del plano lineal equivalente de temperaturas se desprende que ambos paramentos se encuentran sometidos a tensiones de tracción mientras que la zona interior de la sección se ve sometida a tensiones de compresión.

La figura 3.7 refleja las distribuciones de tensiones autoequilibradas según el eje de simetría de la sección correspondientes a los instantes para los cuales se generan las máximas tracciones en las fibras superior e inferior.

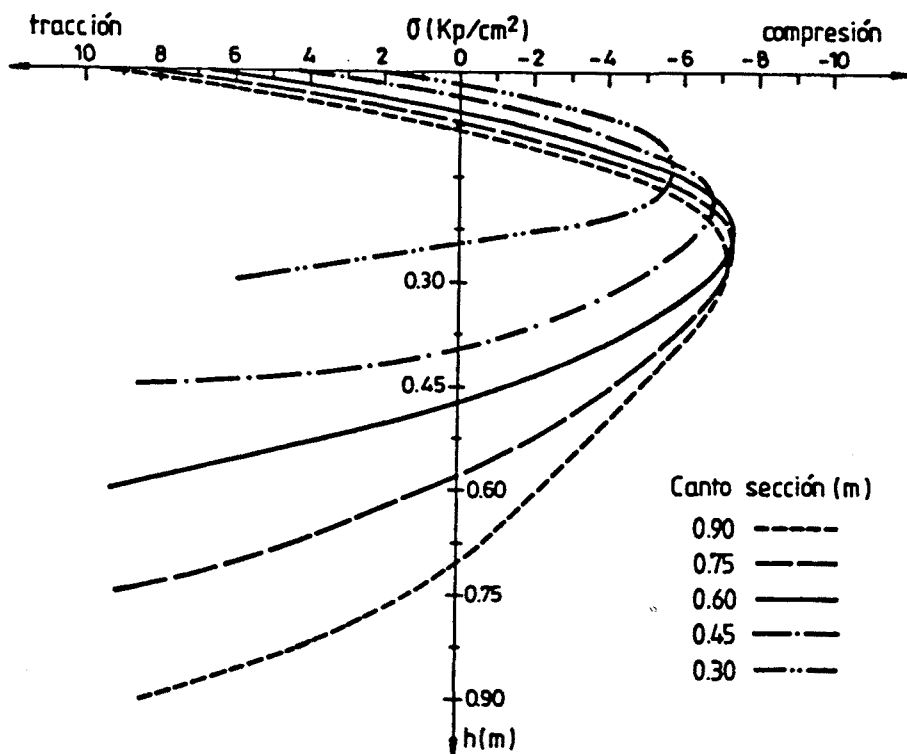


Fig. 3.7.- Tensiones autoequilibradas de tracción máxima para las diferentes losas analizadas.

Observando las gráficas de esta figura se aprecia, de nuevo, que las tensiones inducidas por la distribución no lineal de temperaturas son menores en magnitud a medida que el canto de la sección va disminuyendo. Por otra parte, hay que indicar que, si bien las tensiones de tracción alcanzan unos valores considerables, éstos se generan en instantes para los cuales la curvatura térmica impuesta es mínima, en valor absoluto, y, por consiguiente, las tensiones de continuidad originadas por la hiperestaticidad de la estructura del puente se ven muy reducidas.

Contrariamente a la situación descrita para horas de madrugada, en horas posteriores al mediodía solar y próximas a los instantes para los cuales se generan los máximos gradientes térmicos positivos, las fibras pertenecientes a la zona intermedia de la sección se encuentran sometidas a las máximas tracciones siendo las zonas superior e inferior de la

losa las que se encuentran comprimidas (ver figura 3.3.b). Las fibras que se ven sometidas a dichas tracciones se encuentran situadas a una profundidad de 15 a 25 cms. por debajo del paramento superior de la sección de hormigón y dicha distancia es independiente del canto; sin embargo, sí depende de éste la magnitud de tales tensiones, la cual aumenta a medida que aumenta el canto de la losa maciza a analizar.

Cabe señalar que la posibilidad de contemplar flujo bidireccional a través de la sección permite visualizar cualitativa y cuantitativamente las diferencias existentes entre distribuciones de temperaturas y de tensiones según diversos ejes verticales de la losa.

Así, la figura 3.8 muestra las distribuciones de temperaturas y de tensiones correspondientes a tres ejes verticales de la losa de 0.60 metros de canto para el instante en el que se genera el máximo gradiente térmico.

A la vista de los resultados presentados en la figura 3.8 se desprende que, debido al salto térmico existente entre el centro de la sección y las zonas próximas a los paramentos laterales, las distribuciones de temperaturas y tensiones autoequilibradas son diferentes dependiendo del eje vertical analizado.

Dichas diferencias son incluso más acusadas en horas de madrugada. En efecto, debido a la pérdida de calor por convección y radiación térmica existente en el contorno de la sección y, en particular, en los paramentos laterales, éstos se enfrían rápidamente sin que varíe la temperatura media del puente de forma apreciable. Ello origina tensiones de tracción considerables en las zonas próximas a los contornos laterales de la sección. La tabla 3.3 muestra algunos de los valores obtenidos relativos a tensiones máximas de tracción correspondientes a horas de madrugada y a diferentes profundidades por debajo de la fibra superior de la sección de hormigón.

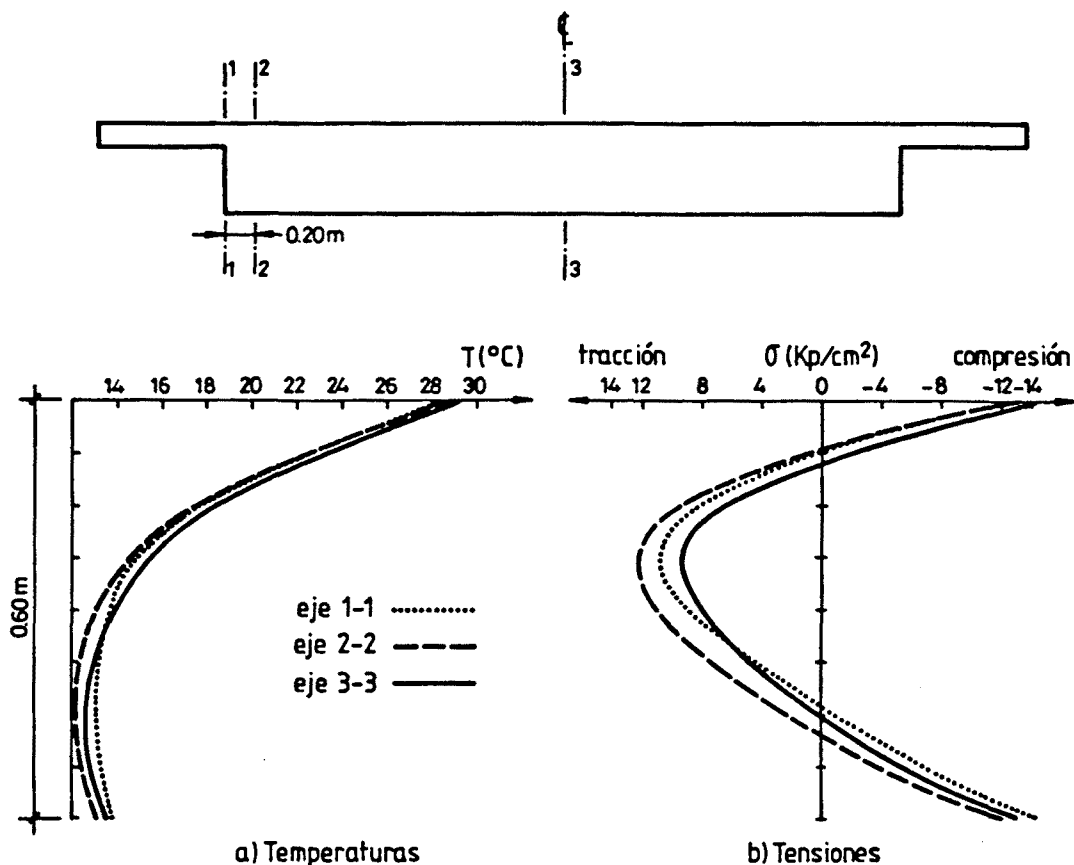


Fig. 3.8.- Distribuciones de temperaturas y de tensiones según diversos ejes verticales correspondientes al instante de máximo gradiente térmico positivo (14.87 horas) en la losa de 0.60 metros de canto.

| Profundidad (cm) | Tracciones (Kp/cm ²) (+ tracción, - compresión) | | |
|------------------|--|-----------------------------------|-------------------------------|
| | Eje vertical en extremo del voladizo | Eje vertical en paramento lateral | Eje de simetría de la sección |
| 0.0 | 16.6 | 10.1 | 6.6 |
| 15.0 | 16.4 | 4.0 | -5.9 |
| 30.0 | -- | 8.2 | -6.5 |
| 45.0 | -- | 11.3 | -1.1 |
| 60.0 | -- | 16.0 | 9.3 |

Tabla 3.3.- Valores de máximas tracciones en horas de madrugada (3.54 horas) según diversos ejes verticales en la losa de canto 0.60 metros.

Las diferencias entre las distribuciones de tensiones son notables observándose que en la zona cercana al eje de simetría de la sección existen compresiones en las fibras intermedias mientras que en las zonas próximas a los paramentos dichas fibras se ven sometidas a tracción. Todo ello parece indicar que, en aquellos instantes del día en los que no existe radiación solar incidente sobre el tablero del puente, la respuesta térmica no es uniforme a lo ancho de la sección, haciéndose necesario el utilizar un modelo numérico que contemple la posibilidad de flujo bidireccional.

De todo lo expuesto con anterioridad, relativo al estudio paramétrico del canto en secciones de puente losa maciza, se desprende que éste es uno de los parámetros que tiene una clara incidencia en el perfil y magnitud de las distribuciones de temperaturas y tensiones autoequilibradas así como en los valores del gradiente térmico y del incremento de temperatura. Del análisis de los resultados pueden extraerse las siguientes conclusiones:

- Cuanto mayor es el canto de la losa mayores son las tensiones internas autoequilibradas.
- Cuanto menor es el canto de la losa mayores son los gradientes térmicos y los incrementos relativos máximos de temperatura media.

Superficie de rodadura de hormigón. Factor de absorción solar y factor de emisividad

La superficie de rodadura del puente puede ser el propio hormigón estructural o una capa asfáltica de un determinado espesor dispuesta para tal fin. En un principio se supondrá que la superficie de rodadura es de hormigón. En este caso, se llevarán a cabo los estudios paramétricos relativos al factor de absorción solar y al factor de emisividad.

El factor de absorción solar del hormigón juega un papel importante de cara a la cantidad de calor que puede absorber el puente debido a la radiación solar incidente sobre el tablero. Dicho factor presenta un cierto rango de variación dependiendo del tipo de cemento y del tipo de árido utilizados, de la edad del hormigón y del estado y color de la superficie.

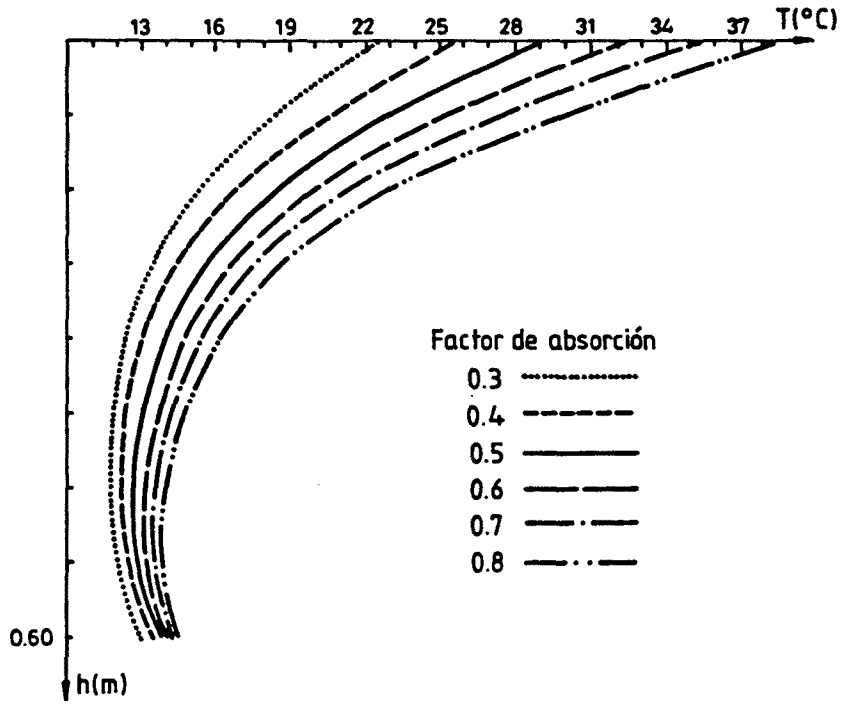
En el estudio paramétrico, el factor de absorción adopta los valores de 0.3, 0.4, 0.45, 0.5, 0.55, 0.6, 0.65, 0.7 y 0.8 cubriéndose de forma sobrada la totalidad de su rango de variación.

Las figuras 3.9.a y 3.9.b muestran, respectivamente las distribuciones de temperaturas y de tensiones según el eje vertical de simetría de la sección correspondientes a los instantes en que se generan los máximos gradientes térmicos positivos para cada uno de los valores adoptados por el factor de absorción solar.

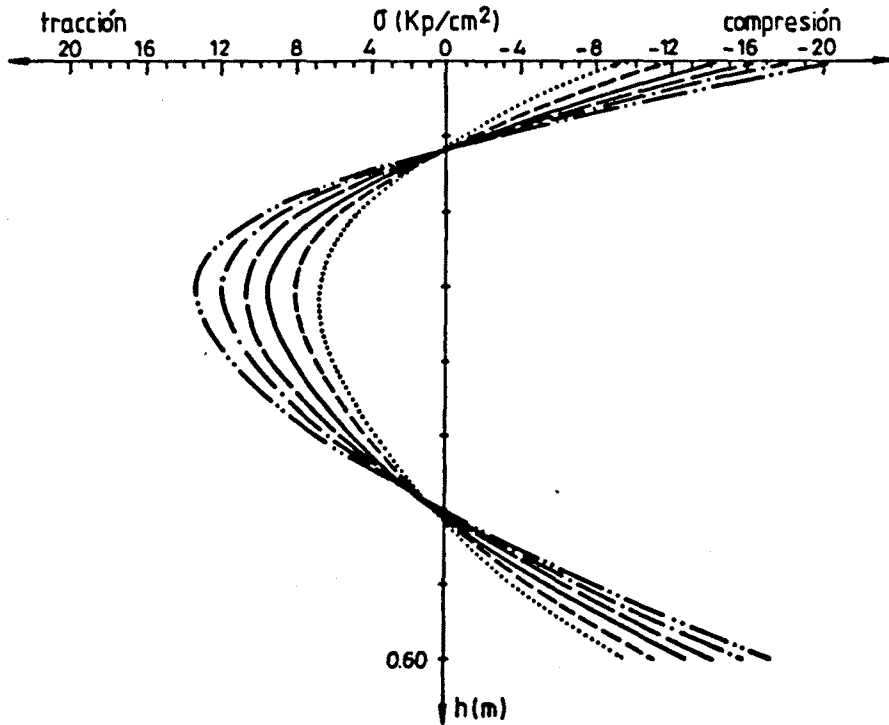
Las distribuciones de temperaturas y tensiones presentadas en la figura 3.9 muestran un aspecto similar entre sí pudiéndose observar que los cambios de temperatura y de tensión experimentados por cada una de las fibras longitudinales en las que se discretiza la sección (las fibras experimentan incrementos o decrementos distintos entre sí) son directamente proporcionales al incremento en el valor del coeficiente de absorción.

A medida que aumenta el valor del factor de absorción solar la no linealidad del campo de temperaturas se hace más acusada y debido a ello las tensiones autoequilibradas asociadas a dichas distribuciones aumentan en magnitud.

A continuación, en las figuras 3.10 y 3.11 puede observarse respectivamente la evolución diaria del gradiente térmico equivalente lineal y de la temperatura media de la sección analizada.



a) Distribución de temperaturas



b) Distribución de tensiones

Fig. 3.9.- Distribuciones de temperaturas y tensiones en la losa de canto 0.60 metros correspondientes a instantes de máximo gradiente térmico para diferentes valores del factor de absorción solar.

Comparando entre sí las gráficas correspondientes a cada uno de los valores adoptados por el factor de absorción solar puede deducirse que a mayor valor de dicho factor mayores son los rangos diarios de variación del gradiente y temperatura media a que se ve sometido el puente. Por otra parte, también puede observarse que a medida que aumenta el valor del parámetro analizado ambas acciones térmicas -gradiente e incremento de temperatura- son de mayor magnitud.

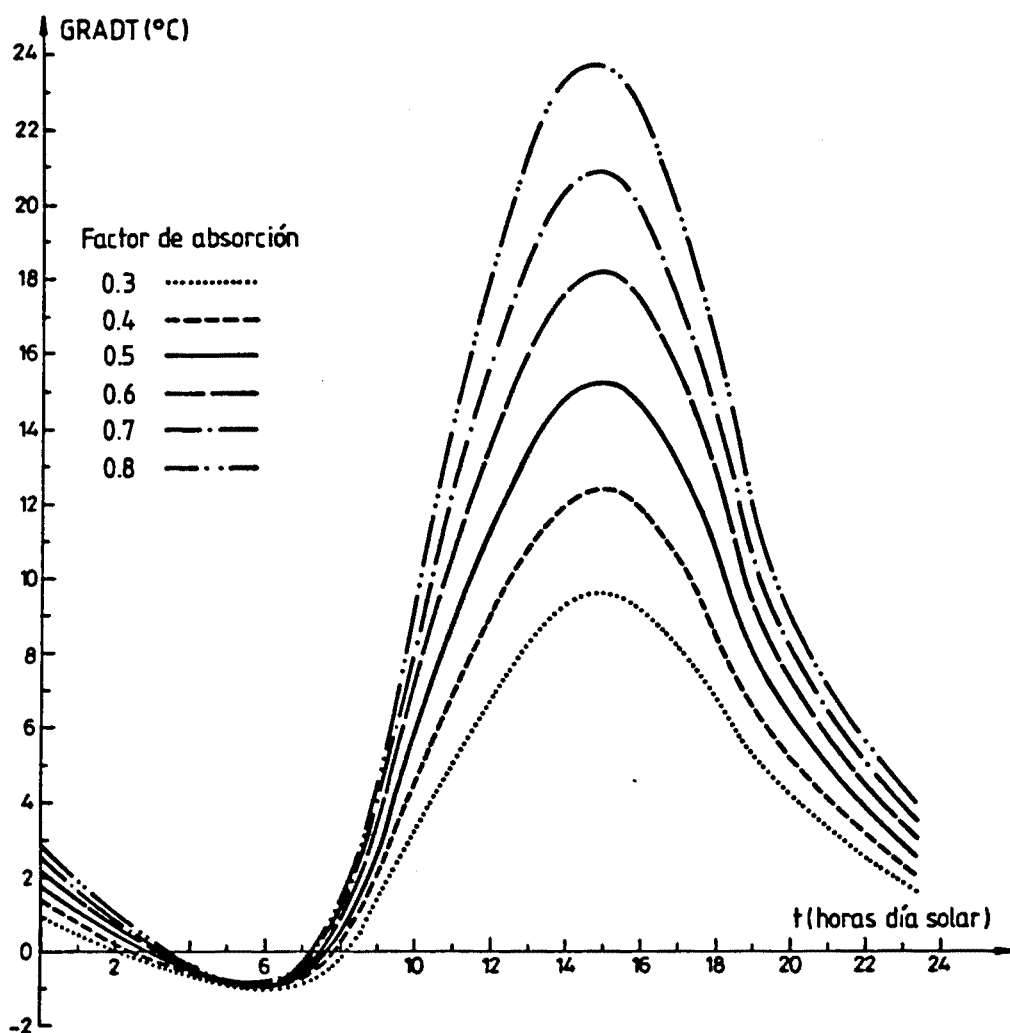


Tabla 3.10.- Evolución del gradiente térmico a lo largo del día para diferentes valores del coeficiente de absorción.

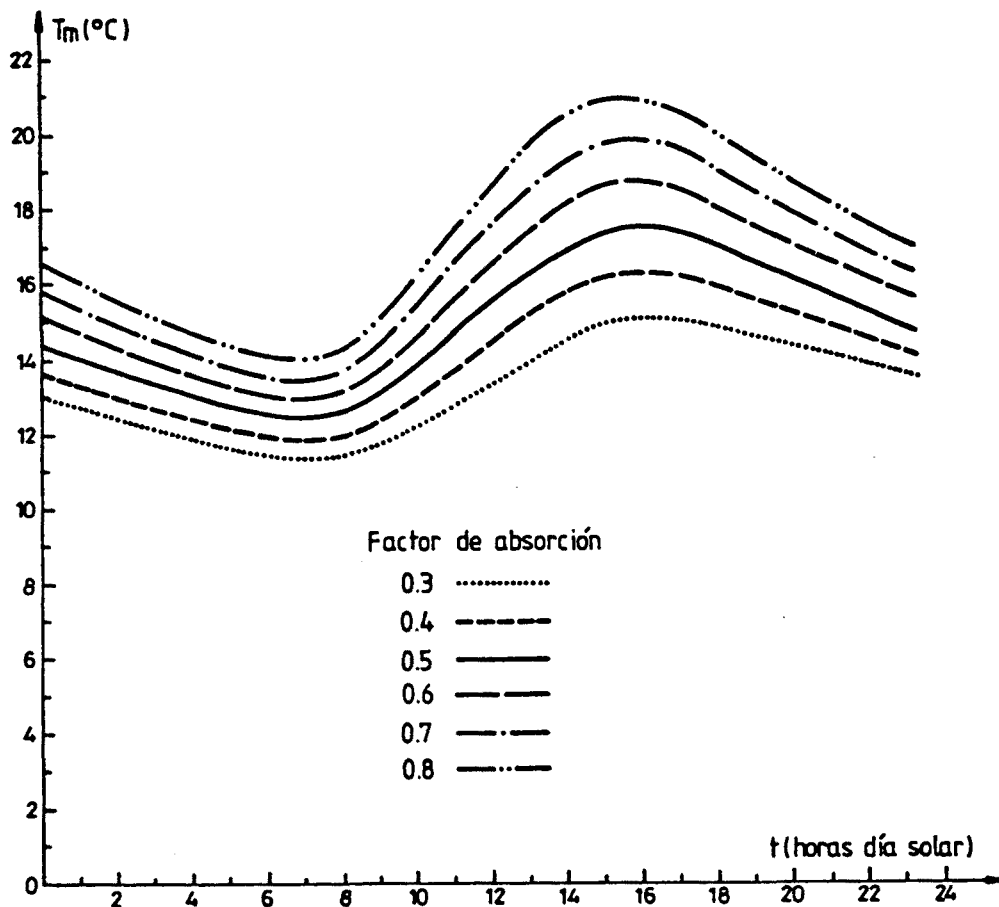
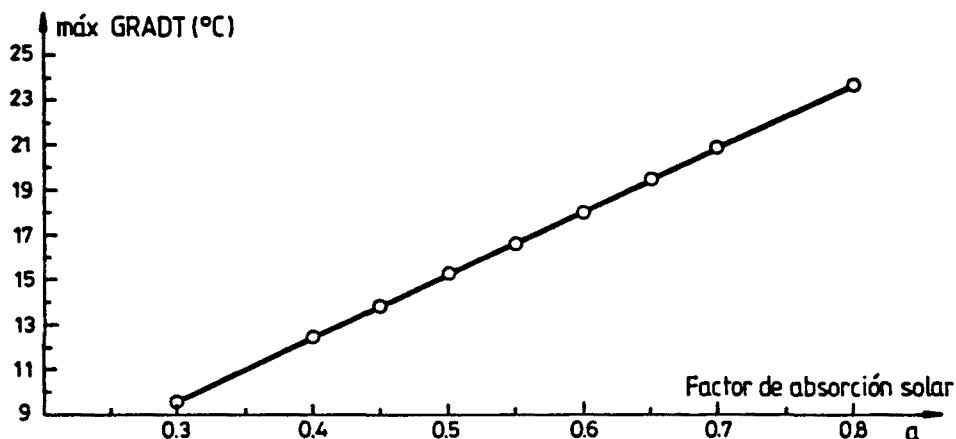


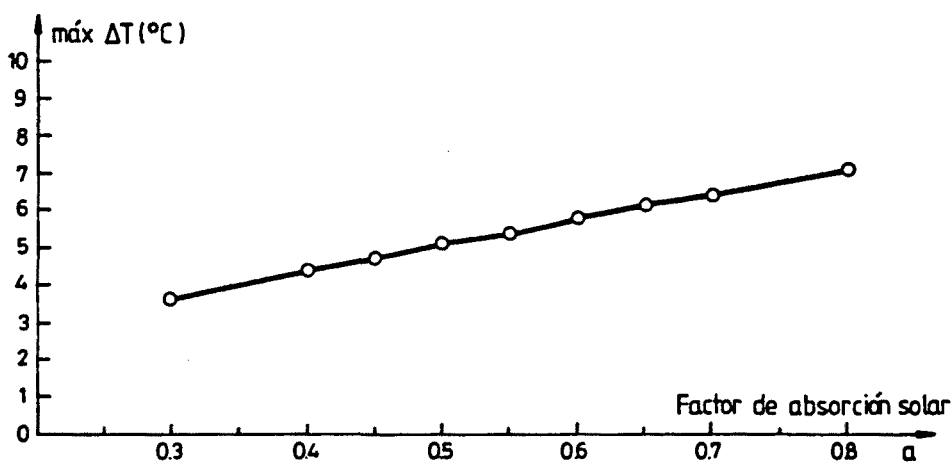
Fig. 3.11.- Evolución de la temperatura media a lo largo del día para diferentes valores del factor de absorción.

Las funciones gradiente e incremento de temperatura son funciones de tipo periódico y alcanzan sus máximos en instantes cercanos a las 15 horas y 16 horas respectivamente. De nuevo se aprecia en estas figuras el desfase horario existente entre los máximos de ambas funciones. Los mínimos gradientes tienden a aparecer en torno a las 6 horas de la mañana mientras que las mínimas temperaturas medias acaecen en instantes próximos a las 7 horas.

Las gráficas recogidas en las figuras 3.12.a y 3.12.b muestran la influencia del factor de absorción solar sobre los máximos alcanzados por el gradiente térmico lineal equivalente y por el incremento relativo de temperatura media.



a) Máximos gradientes térmicos positivos



b) Máximos incrementos relativos de temperatura media

Fig. 3.12.- Influencia del factor de absorción solar sobre los valores máximos de gradientes térmicos e incremento de temperatura media.

En dichas figuras puede observarse que los máximos gradientes térmicos y los máximos incrementos de temperatura media son cuasi directamente proporcionales al valor del coeficiente de absorción solar del hormigón.

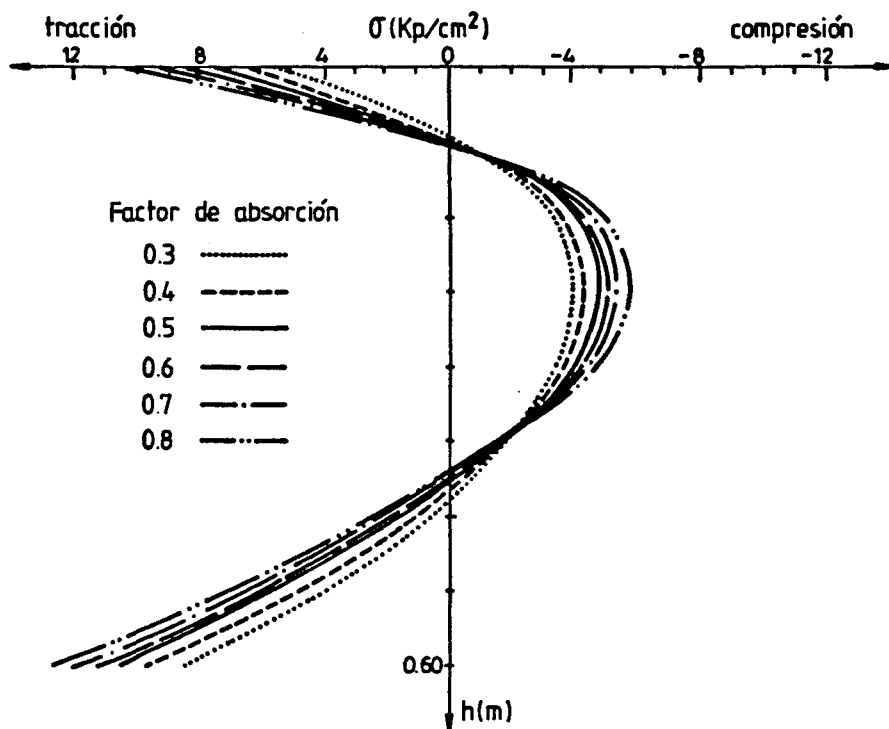
En cuanto al análisis tensional, de nuevo se vislumbran dos instantes para los cuales las tracciones son máximas. En horas de madrugada comprendidas entre las 2 horas y las 5 horas se generan las tensiones máximas de tracción en las fibras superior e inferior de la sección mientras que en horas comprendidas entre las 13 horas y la hora de máximos

gradientes térmicos se generan tensiones de tracción considerables en el tercio central de la sección. La figura 3.13 muestra las distribuciones de tensiones correspondientes a los instantes en que, para cada uno de los valores que adopta el factor de absorción solar, se inducen las tracciones máximas. Estas aparecen, de nuevo, en los voladizos alcanzándose valores del orden de los 22 Kp/cm² para un coeficiente de absorción de 0.8 y del orden de los 13 Kp/cm² para un coeficiente de 0.3, lo que supone una diferencia del 40% aproximadamente.

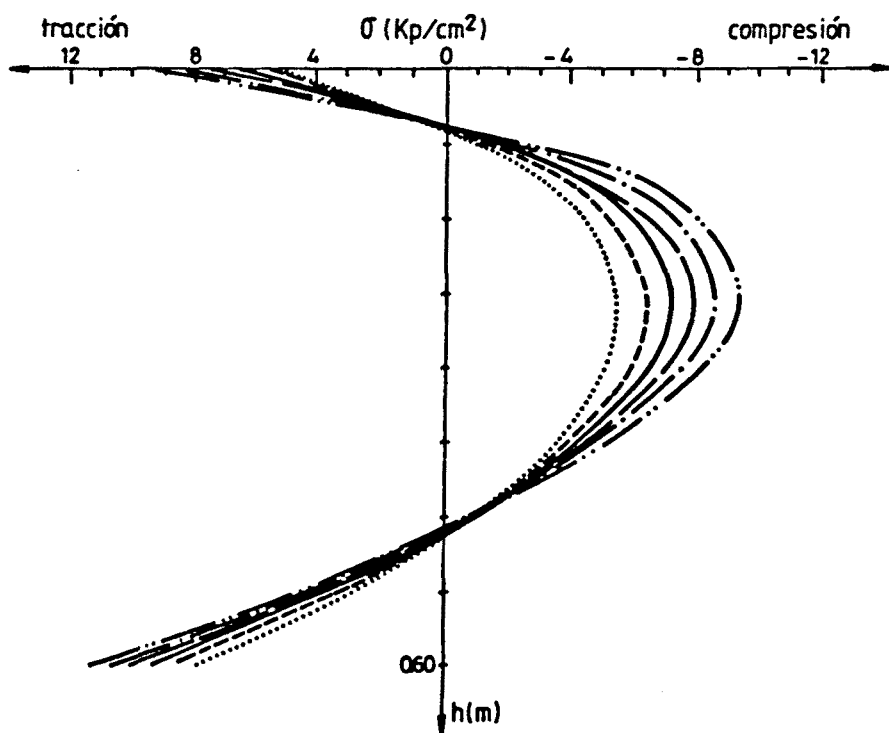
El análisis de los resultados derivados del estudio paramétrico permite concluir que el factor de absorción influye de forma notable en la distribución del campo de temperaturas. Asimismo pueden extraerse algunas conclusiones de interés:

- Cuanto mayor es el factor de absorción solar del hormigón más acusada es la no linealidad de la distribución de temperaturas y, por lo tanto, mayor es el nivel de tensiones autoequilibradas.
- Cuanto mayor es el factor de absorción mayores son los gradientes térmicos y los incrementos relativos de temperatura manteniéndose una relación directamente proporcional entre los máximos de ambas funciones y el valor adoptado por el factor de absorción.

Por consiguiente, en tableros de losa maciza en los que la superficie de rodadura tenga un color claro o se vea cubierta por una capa de nieve de pequeño espesor -lo que equivale a un valor del factor de absorción comprendido entre 0.2 y 0.35-, los niveles inducidos de tensiones y las acciones térmicas asociadas -gradiente e incremento de temperatura- son de menor magnitud que en el caso de que la superficie de rodadura sea vieja y se encuentre oscurecida por la existencia de marcas de neumáticos y de manchas de aceite -el factor de absorción en este caso, se encontraría comprendido entre los valores de 0.8 y 0.9-.



a) Tensiones según el eje vertical situado a 20 cm del paramento lateral.



b) Tensiones según el eje vertical de simetría de la sección.

Fig. 3.13.- Tensiones autoequilibradas correspondientes a los instantes en que se generan las máximas tracciones para diferentes valores del factor de absorción.

Siendo la superficie de rodadura el propio hormigón es tructural, otro factor que puede influir en el perfil y magnitud de la distribución del campo de temperaturas es el coeficiente de emisividad del hormigón. Este regula los cambios de temperatura experimentados por los paramentos exteriores de la sección debidos a la existencia de transferencia de calor por radiación térmica de onda larga.

En el estudio paramétrico llevado a cabo, dicho coeficiente, de valor siempre inferior a la unidad, adopta los valores de 0.6, 0.65, 0.7, 0.75, 0.8, 0.85, 0.88 y 0.95 cubriéndose ampliamente el posible rango de variación de tal parámetro en función de la longitud de onda. El valor de 0.88 es el comúnmente adoptado por la gran mayoría de investigadores.

La figura 3.14 muestra las distribuciones de tensiones correspondientes a los instantes en que se generan los máximos gradientes térmicos positivos para cada uno de los valores adoptados por el coeficiente de emisividad del hormigón según el eje vertical de simetría de la sección.

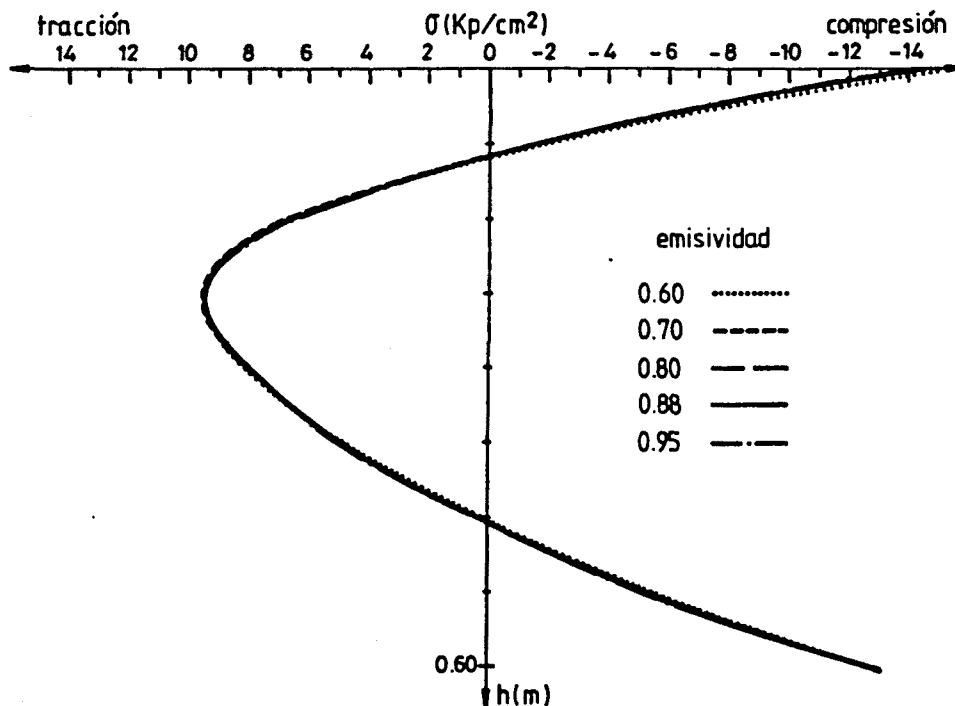
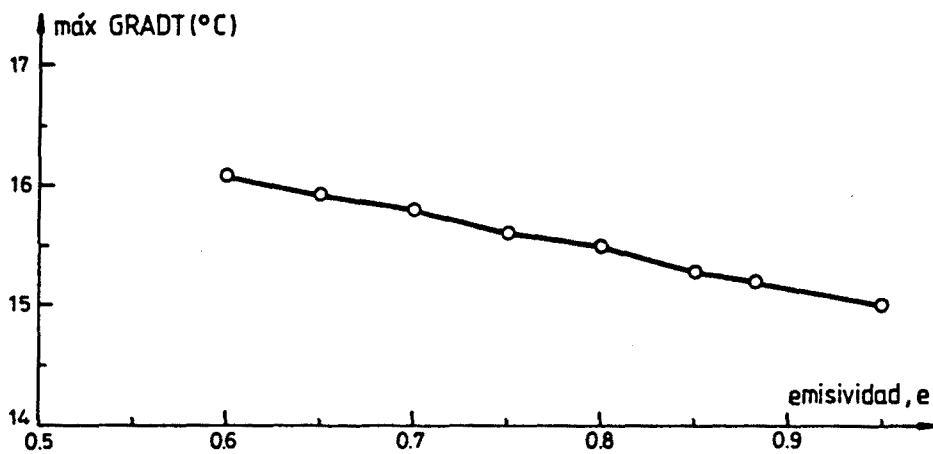


Fig. 3.14.- Distribuciones de tensiones en la losa de $h=0.60$ metros correspondientes a instantes de máximo gradiente térmico para diferentes valores del coeficiente de emisividad.

Un análisis de los resultados presentados en estas gráficas lleva a la conclusión de que la influencia del coeficiente de emisividad sobre la distribución de temperaturas es prácticamente despreciable puesto que, para valores del parámetro iguales a los extremos del rango de variación -0.6 y 0.95- se originan, a lo sumo, decrementos de tensión del orden de 1 Kp/cm². Se llega a idéntica conclusión si se analizan las figuras 3.15.a y 3.15.b en las cuales puede observarse la variación del gradiente térmico máximo y del incremento de temperatura media máximo con el valor del coeficiente de emisividad.



a) Maxisimos gradientes térmicos positivos



b) Maxisimos incrementos relativos de temperatura media

Fig. 3.15.- Influencia del coeficiente de emisividad sobre los gradientes e incrementos de temperatura media máximos.

De todo lo expuesto con anterioridad, relativo al factor de emisividad del hormigón, puede concluirse que la influencia de este parámetro en el perfil y magnitud de las distribuciones de tensiones y en el valor de las acciones térmicas no es significativa. Tal conclusión puede extrapolarse a otras tipologías transversales y de ahí que, en lo sucesivo, dicho parámetro se supondrá constante y no se tendrá en cuenta en los estudios paramétricos de tipologías transversales diferentes a los de puente losa maciza.

Superficie de rodadura de asfalto. Difusividad térmica, factor de absorción solar y coeficiente de emisividad del asfalto. Espesor de la capa asfáltica

Al ser la superficie de rodadura de asfalto, varias son las propiedades de este material que influyen en la distribución de temperaturas. El tener que analizar, para este caso, un medio bicapa -capa asfáltica y hormigón estructural- conlleva la necesidad de conocer y evaluar la influencia de la difusividad, o conductividad, térmica del aglomerado asfáltico.

Se ha realizado un estudio paramétrico de la conductividad de este material y se observa que, si bien su influencia sobre la distribución del campo de temperaturas es poco notable, la variación de dicho parámetro dentro del rango habitual de valores en el que se mueve origina cambios en las distribuciones de temperaturas más acusados que al variar la conductividad del hormigón.

La figura 3.16 muestra la influencia de la conductividad térmica del asfalto sobre los gradientes térmicos máximos alcanzados para la losa de referencia de 0.60 metros de canto suponiendo que el espesor de la capa asfáltica es de 12 cms. El estudio paramétrico se ha llevado a cabo para valores de la conductividad de 0.72, 0.78, 0.83, 0.89 y 0.95 W/m°C manteniéndose constante la capacidad calorífica.

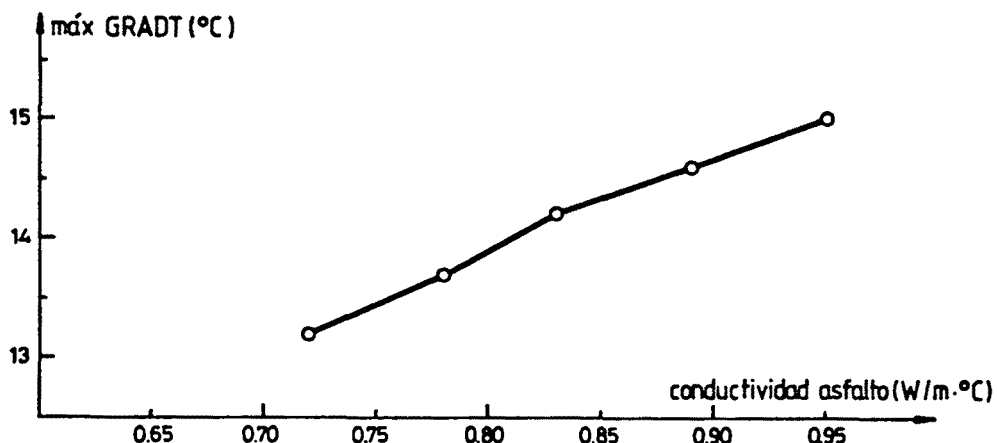


Fig. 3.16.- Influencia de la conductividad del asfalto en los gradientes térmicos máximos.

Como puede observarse la variación del valor de la conductividad del asfalto no origina cambios substanciales en los valores de los máximos gradientes térmicos ni tampoco en el aspecto y magnitud de las distribuciones de temperaturas. Además, aunque aquí se ha llevado a cabo un extenso estudio paramétrico, el valor de la conductividad térmica del asfalto no presenta, en general, tan amplio rango de variación.

Algo similar ocurre con el factor de absorción solar y el coeficiente de emisividad del asfalto. Su rango de variación es pequeño y es común adoptar para ambos factores los valores de 0.9 y 0.92 respectivamente. De ahí el que no se realicen para dichas propiedades estudios paramétricos ya que éstos no tendrían un sentido físico real.

De todos los factores que introduce la existencia de una capa asfáltica de rodadura en la resolución numérica del problema de la transmisión de calor, es el espesor de dicha capa el que posee una mayor influencia sobre las distribuciones de temperaturas y de tensiones y sobre los gradientes térmicos e incrementos de temperatura media.

Los valores del espesor de la capa asfáltica adoptados en el estudio paramétrico son 5, 8, 10, 12, 15 y 18 cms.

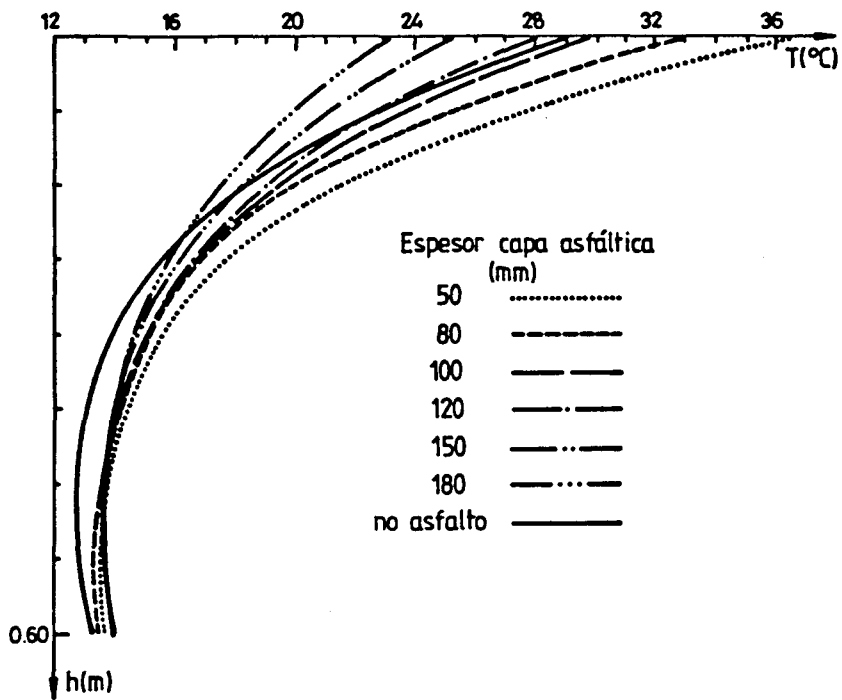
Espesores cercanos a los 15 y 18 cms. son muy elevados; no obstante, aquí se han analizado estos casos para conocer mejor la influencia de este parámetro sobre el fenómeno de la transmisión de calor en puentes losa maciza.

Las figuras 3.17.a y 3.17.b muestran, respectivamente, las distribuciones de temperaturas y de tensiones según el eje vertical de simetría de la sección correspondientes a los instantes en que se generan los máximos gradientes térmicos positivos para una misma losa con diferentes espesores de capa asfáltica.

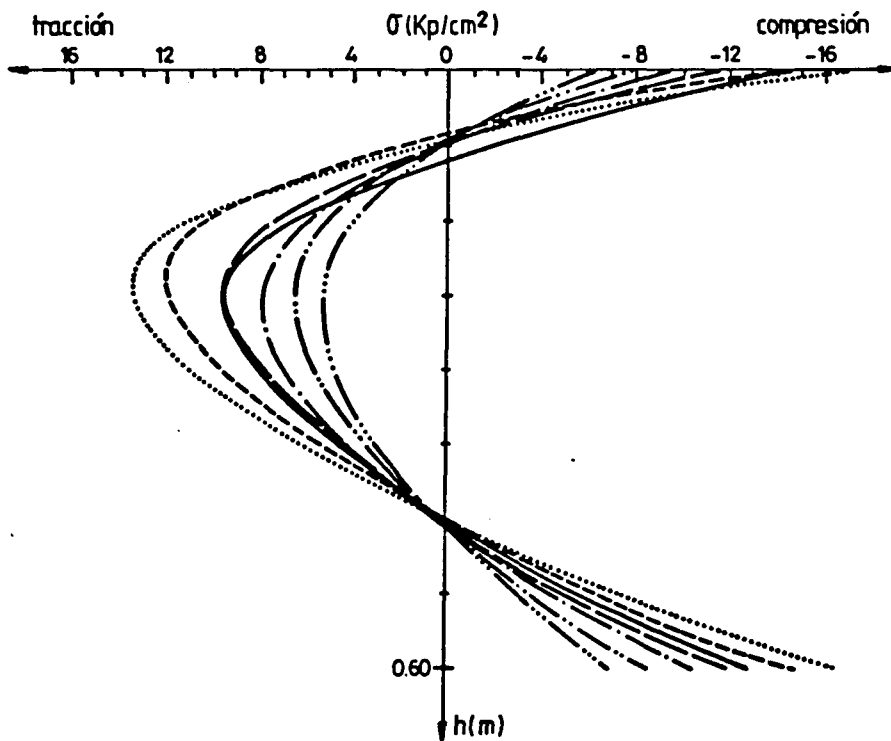
De dichas figuras se deducen algunas conclusiones que tienen una cierta relevancia. En primer lugar, a medida que aumenta el espesor de la capa asfáltica de rodadura menor es la temperatura en la fibra superior de la losa tablero de hormigón. La baja conductividad térmica del asfalto con respecto a la del hormigón hace que la capa de rodadura se comporte como un aislante térmico y ello se acentúa más cuanto mayor es el espesor de la capa asfáltica.

No obstante, puede observarse que si dicha capa posee poco espesor la temperatura de la fibra superior aumenta; ello es a consecuencia del elevado factor de absorción solar que posee el asfalto con respecto al hormigón.

A la vista de los resultados obtenidos puede concluirse que para que la capa asfáltica de rodadura tenga un cierto carácter aislante es necesario disponer de un mínimo espesor. Si comparamos las distribuciones de temperaturas obtenidas para diferentes espesores de capa asfáltica con la distribución correspondiente a la misma losa suponiendo que no existe capa asfáltica (ver figura 3.17) se observa que la temperatura en la fibra superior del tablero de hormigón es similar entre ellas cuando el espesor de la capa de rodadura se encuentra próximo a los 10 cms.



a) Distribución de temperaturas



b) Distribución de tensiones

Fig. 3.17.- Distribuciones de temperaturas y de tensiones en la losa de canto 0.60 metros correspondientes a instantes de máximo gradiente térmico para diferentes valores de espesor de capa asfáltica.

En resumen, para espesores de capa asfáltica menores que 10 cms. la influencia del factor de absorción solar es más importante que la de la baja conductividad del asfalto mientras que para secciones con espesores de capa de rodadura superiores a los 10 cms. la respuesta térmica viene gobernada, de forma preponderante, por la conductividad térmica del asfalto comportándose este material como un aislante.

Por otra parte, el hecho de que el coeficiente de absorción solar del asfalto sea elevado hace que la cantidad de calor transferido por radiación solar aumente con respecto al caso en el que se analizara la losa sin capa asfáltica. Ello supondrá un mayor valor de la temperatura en las fibras intermedias de la sección lo cual originará una distribución de temperaturas más cercana a una distribución plana. Debido a este hecho puede observarse que, si se comparan las distribuciones de tensiones correspondientes a los casos de losa sin capa asfáltica y losa con capa asfáltica de 10 cms. de espesor, se alcanzan para la primera niveles de tensión algo más elevados.

Las figuras 3.17.a y 3.17.b evidencian el hecho de que cuanto más pequeño es el espesor de la capa asfáltica más acusada es la no linealidad del campo de temperaturas y, por consiguiente, mayores son las tensiones autoequilibradas asociadas.

La evolución diaria del gradiente térmico lineal equivalente de la sección para los diferentes espesores de capa asfáltica se ve reflejada en la figura 3.18.

A la vista de las gráficas presentadas en esta figura, puede deducirse que el rango de variación diario del gradiente térmico disminuye a medida que aumenta el espesor de la capa asfáltica. Así, para la losa con capa asfáltica de 18 cms. el máximo gradiente térmico alcanzado es de 9.6°C y el mínimo de 4.0°C mientras que para la losa con capa asfáltica

de 5 cms.de espesor el máximo alcanza el valor de 22.3°C y el mínimo es de 0.3°C. De ahí que para pequeños espesores de capa asfáltica se obtengan gradientes térmicos lineales equivalentes más elevados.

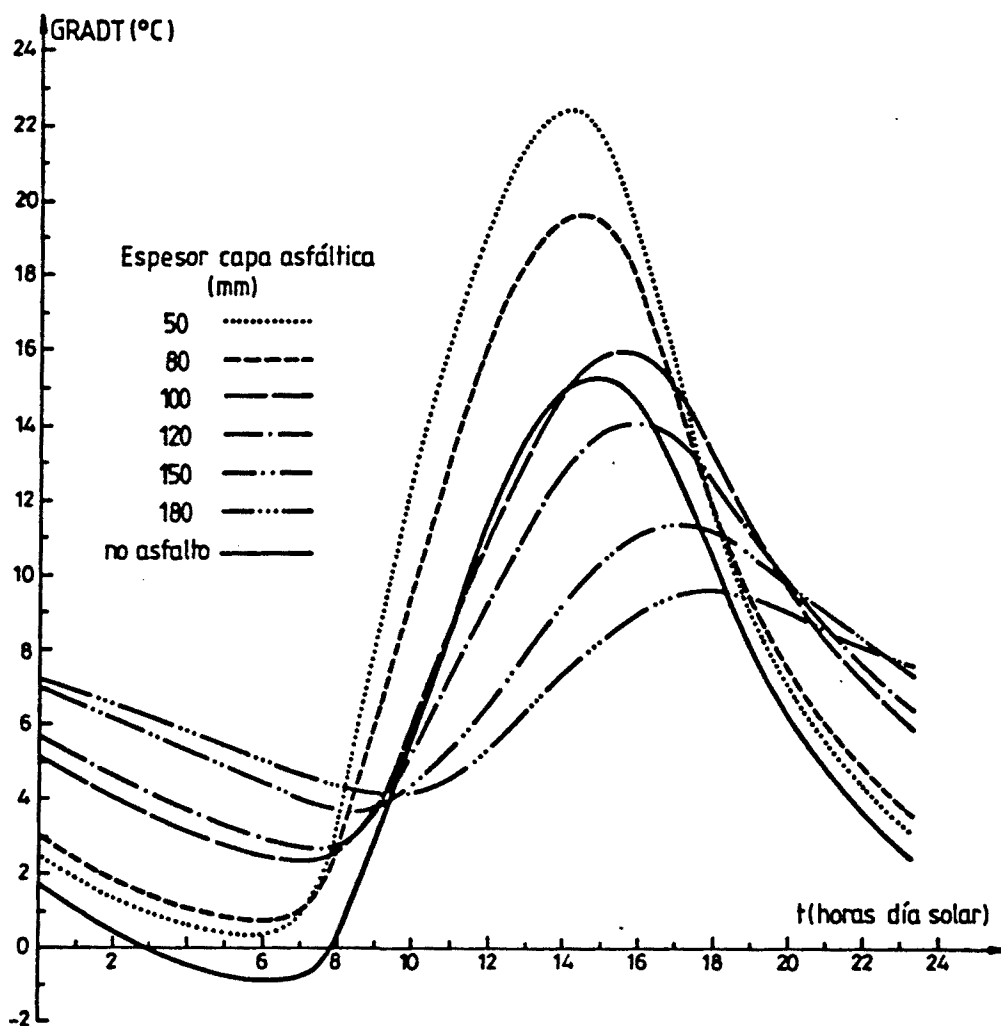


Fig. 3.18.- Evolución del gradiente térmico a lo largo del día para diferentes valores del espesor de la capa asfáltica.

Por otra parte, la presencia de capa asfáltica confiere a la sección de hormigón un cierto carácter de aislante térmico en la zona superior; de ahí que, en general, losas sobre las cuales se disponga asfalto serán menos susceptibles de verse solicitadas con gradientes térmicos inversos.

Es interesante señalar que a medida que la capa de asfalto presenta un mayor espesor, mayor es la influencia de la baja conductividad térmica del material y ello se traduce en un retraso temporal en lo que se refiere al instante para el cual se alcanzan los máximos gradientes térmicos. Así pues, para el caso estudiado, la losa con 5 cms. de espesor de capa asfáltica alcanza su máximo gradiente a las 13.7 horas mientras que la losa con 18 cms. lo alcanza a las 17.9 horas.

La figura 3.19 muestra la evolución de la temperatura media de la sección a lo largo del día analizado para diferentes espesores de capa asfáltica.

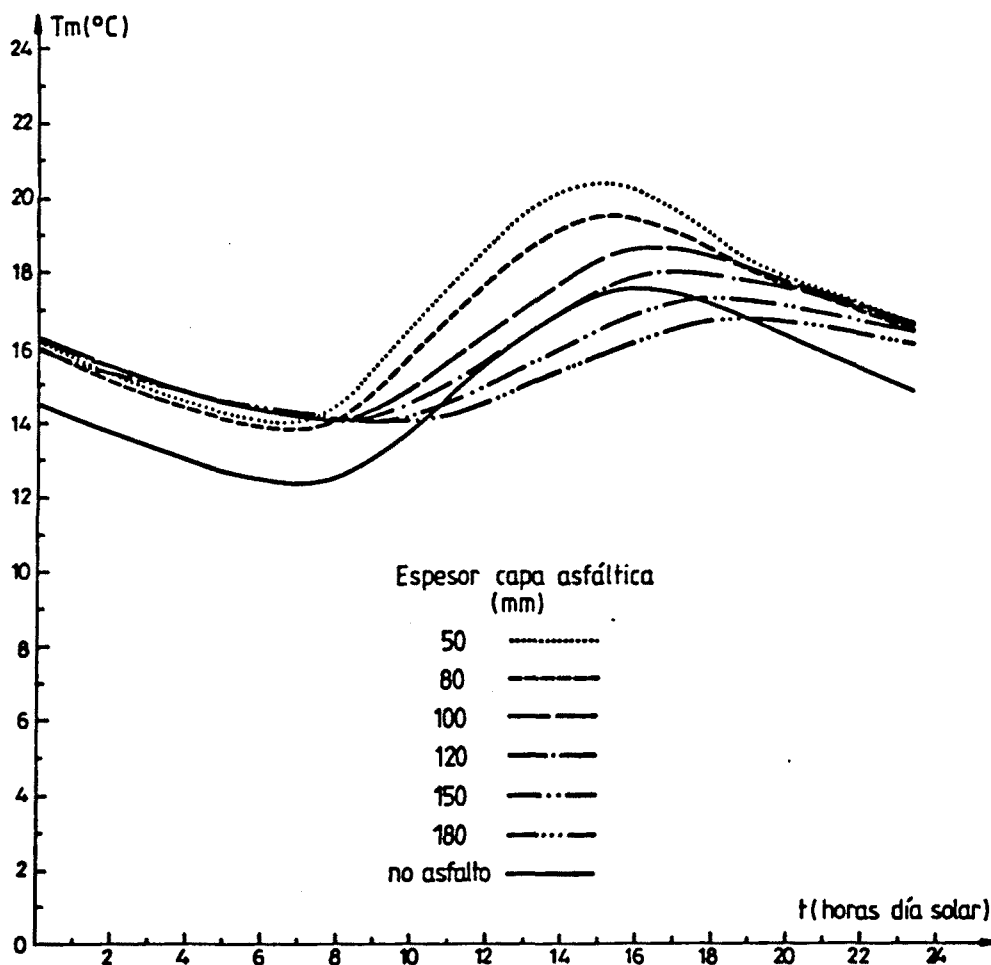


Fig. 3.19.- Evolución de la temperatura media a lo largo del día para diferentes espesores de la capa asfáltica.

El análisis de las gráficas presentadas denota que la temperatura media mínima es similar para todas las losas independientemente del espesor de la capa asfáltica; ello es debido al carácter aislante del asfalto que impide liberar calor por la superficie superior durante las horas nocturnas y las horas de madrugada. No ocurre así con las temperaturas medias máximas ya que éstas aumentan a medida que el espesor de capa asfáltica disminuye. Es por ello por lo que secciones en losa maciza con capa de rodadura de elevados espesores presentan rangos de variación diarios de temperatura media más pequeños que las losas con capa asfáltica de pequeños espesores.

De nuevo se aprecia un retraso en el instante para el que se alcanza la máxima temperatura media, retraso éste más acusado cuánto mayor es el espesor de la capa asfáltica de rodadura.

Si se comparan los instantes para los cuales se alcanzan los máximos gradientes térmicos y las máximas temperaturas medias, se observa que éstas últimas acaecen con un desfase horario de aproximadamente 1 hora, hecho éste que se repite independientemente del parámetro analizado y que es propio del fenómeno de transmisión de calor y de cómo la sección va adquiriendo temperatura en las fibras intermedias.

Por último, puede apreciarse, en general, que las temperaturas medias de losas macizas con espesores de capa asfáltica menores que 12 cms.-espesores usuales- son mayores que las correspondientes a la losa sin capa asfáltica; este incremento de temperatura tiene un límite superior y puede cifrarse en un valor de 3°C aproximadamente.

Las figuras 3.20.a y 3.20.b muestran, respectivamente, la influencia del espesor de la capa asfáltica sobre los valores que adoptan los máximos gradientes térmicos positivos lineales equivalentes y los máximos incrementos relativos de temperatura media.

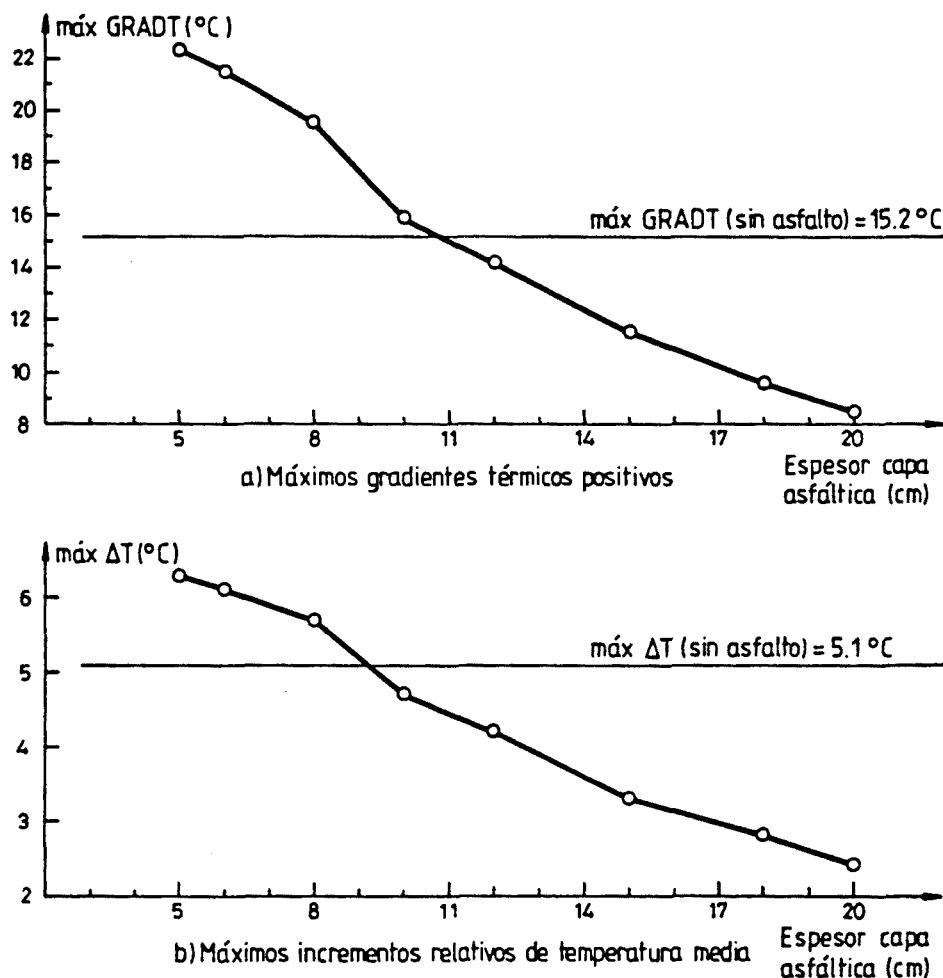
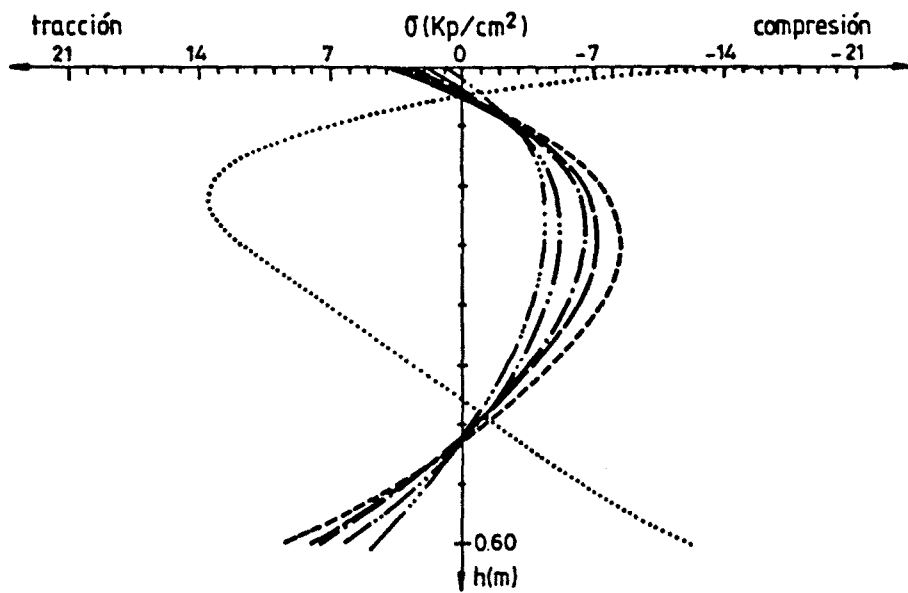


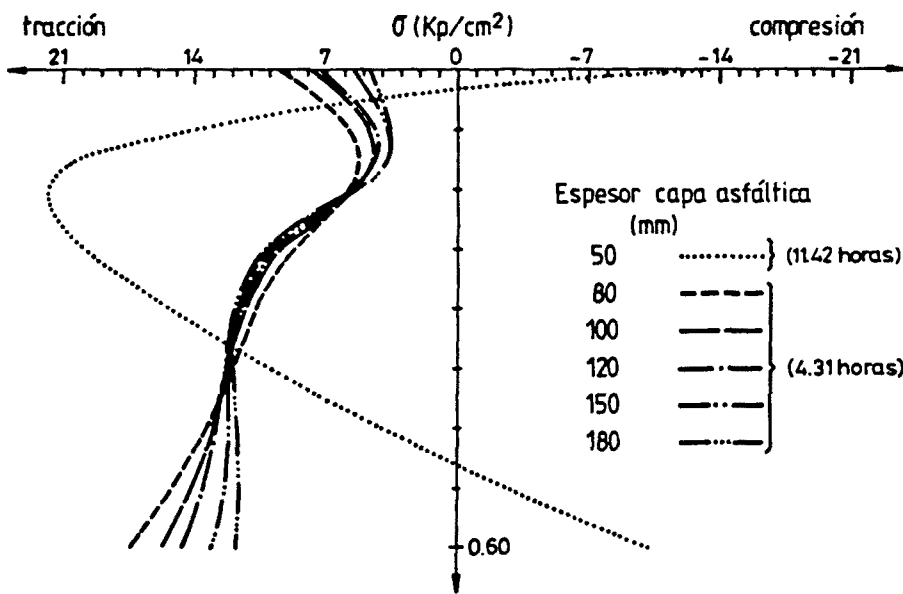
Fig. 3.20.- Influencia del espesor de la capa asfáltica sobre los gradientes e incrementos relativos de temperatura media máximos.

En dichas figuras se observa que cuanto mayor es el espesor de capa asfáltica menores son los gradientes e incrementos máximos térmicos a imponer. También puede apreciarse que, a partir de un cierto espesor, las acciones térmicas máximas impuestas son menores que las correspondientes a la losa sin capa asfáltica; dicho espesor se encuentra, de nuevo, próximo a los 10 cms.

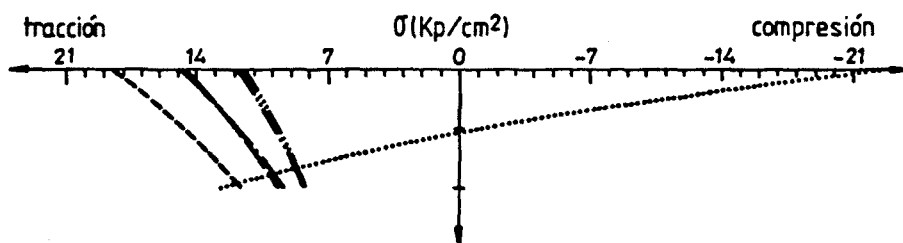
A continuación, las figuras 3.21.a, 3.21.b y 3.21.c muestran las distribuciones de tensiones, según diversos ejes verticales, correspondientes a los instantes en que tiene lugar la máxima tracción para cada uno de los valores que adopta el parámetro analizado.



a) Tensiones según el eje de simetría de la sección



b) Tensiones según el eje que contiene el paramento lateral de la sección



c) Tensiones según el eje que contiene el borde lateral del voladizo de la sección (15 cm)

Fig. 3.21.- Tensiones autoequilibradas de tracción máxima correspondientes a diferentes espesores de capa asfáltica.

Un análisis del estado tensional autoequilibrado permite vislumbrar dos instantes para los cuales las tensiones de tracción son máximas. El primer instante tiene lugar en el intervalo de tiempo comprendido entre las 4 horas y las 5 horas de la mañana generándose las tracciones máximas en las fibras superior e inferior de la sección. En concreto, la zona más solicitada es la fibra superior de los voladizos alcanzándose valores de tracción máxima cercanos a los 19 Kp/cm^2 . El otro instante tiene lugar en horas próximas al mediodía solar y las tracciones máximas aparecen a lo largo de los paramentos laterales de la sección; tales tracciones alcanzan valores próximos a los 22 Kp/cm^2 .

En el caso particular que nos ocupa, el valor de la tracción máxima se alcanza, para losas con espesor de capa asfáltica de 5 ó 6 cms., a las 11.40 horas y tiene lugar a una profundidad de 15 cms. por debajo de la fibra superior de la sección de hormigón, justamente en el nodo que idealiza la unión voladizo-paramento lateral de la losa mientras que para losas con capa asfáltica de espesor igual o superior a 8 cms. dicho máximo se alcanza en torno a las 4.30 horas de la mañana y tiene lugar en la esquina superior de los voladizos o en las esquinas inferiores de la sección.

En la figura 3.21 anteriormente citada, puede apreciarse también lo ya expuesto al analizar resultados derivados del estudio paramétrico del canto de la sección. En efecto, las distribuciones de tensiones autoequilibradas según diferentes ejes correspondientes a horas de madrugada o a primeras horas de la mañana reflejan diferencias notables entre sí mientras que para horas próximas al mediodía solar el perfil y magnitud de tales distribuciones son muy similares entre sí, independientemente del eje que se contemple. Este hecho evidencia, de forma clara, el que el puente, en fase de calentamiento, originado éste por la incidencia de radiación solar en el tablero, muestra una respuesta térmica uniforme a lo ancho de la sección mientras que en fase de enfriamiento -la pérdida de calor por convección y radiación térmi

ca tiene lugar exclusivamente en el contorno de la sección- la respuesta térmica y tensional no es uniforme y depende del eje analizado.

En resumen, del estudio paramétrico llevado a cabo para el espesor de capa asfáltica pueden extraerse algunas conclusiones:

- Cuanto menor sea el espesor de capa asfáltica más acusada es la no linealidad de las distribuciones de temperaturas y, por consiguiente, mayores son las tensiones internas autoequilibradas.
- Cuanto menor sea el espesor de capa asfáltica mayores son los gradientes térmicos, los incrementos relativos de temperatura media y los respectivos rangos de variación.
- En general, losas sobre las cuales se disponga capa asfáltica serán menos susceptibles de verse solicitadas con gradientes térmicos inversos (o negativos).
- Se aprecia la existencia de un espesor umbral de capa asfáltica por encima del cual las magnitudes de las tensiones autoequilibradas y de las acciones térmicas impuestas son inferiores a las que corresponderían a la losa sin capa asfáltica.

Por todo ello, puentes de hormigón en losa maciza sobre los cuales se disponga una capa asfáltica de rodadura de espesor igual o superior a ese espesor umbral se encontrarán en condiciones más favorables frente a la acción térmica ambiental que puentes en los que la superficie de rodadura sea el propio hormigón estructural o una capa asfáltica de espesor igual o inferior a tal espesor umbral. Este podrá presentar un determinado rango de variación atendiendo a los diferentes condicionantes ambientales y climatológicos en los que se encuentre inmerso el puente aunque, en general, dicho rango siempre será pequeño. Para este estudio, en concreto, el espesor umbral se encuentra comprendido entre los 8 y los 10 cms.

Temperatura ambiente media diaria

Uno de los factores o parámetros climatológicos que define las condiciones ambientales en los que se encuentra inmerso el puente de hormigón es la temperatura ambiente media existente en el día analizado.

Aunque, efectivamente, a cada día del año le corresponde una temperatura ambiente media, la cual podría obtenerse con suficiente aproximación en función de los datos de la historia de temperaturas recogidas en estaciones meteorológicas cercanas al emplazamiento del puente, el estudio paramétrico se lleva a cabo para un vasto conjunto de valores de dicha variable. Ello evidenciará la posible influencia de tal parámetro en las distribuciones de temperaturas y en las acciones térmicas a imponer en el análisis estructural del puente, objetivo final del estudio paramétrico.

Los valores que adopta el parámetro temperatura ambiente media diaria son -15.0, -10.0, -5.0, 0.0, 5.0, 10.0, 15.0, 20.0, 25.0, 30.0, 35.0 y 40.0°C. Las gráficas presentadas en la figura 3.22.a y 3.22.b muestran la influencia de la temperatura ambiente media diaria sobre los valores máximos que alcanzan, respectivamente, los gradientes térmicos y los incrementos relativos de temperatura media de la sección.

Como puede observarse, dicha influencia es prácticamente despreciable y puede concluirse que las distribuciones de temperaturas y de tensiones autoequilibradas así como las acciones térmicas impuestas -gradientes térmicos e incrementos relativos de la temperatura media de la sección- son independientes del valor que adopte la media de la temperatura ambiente.

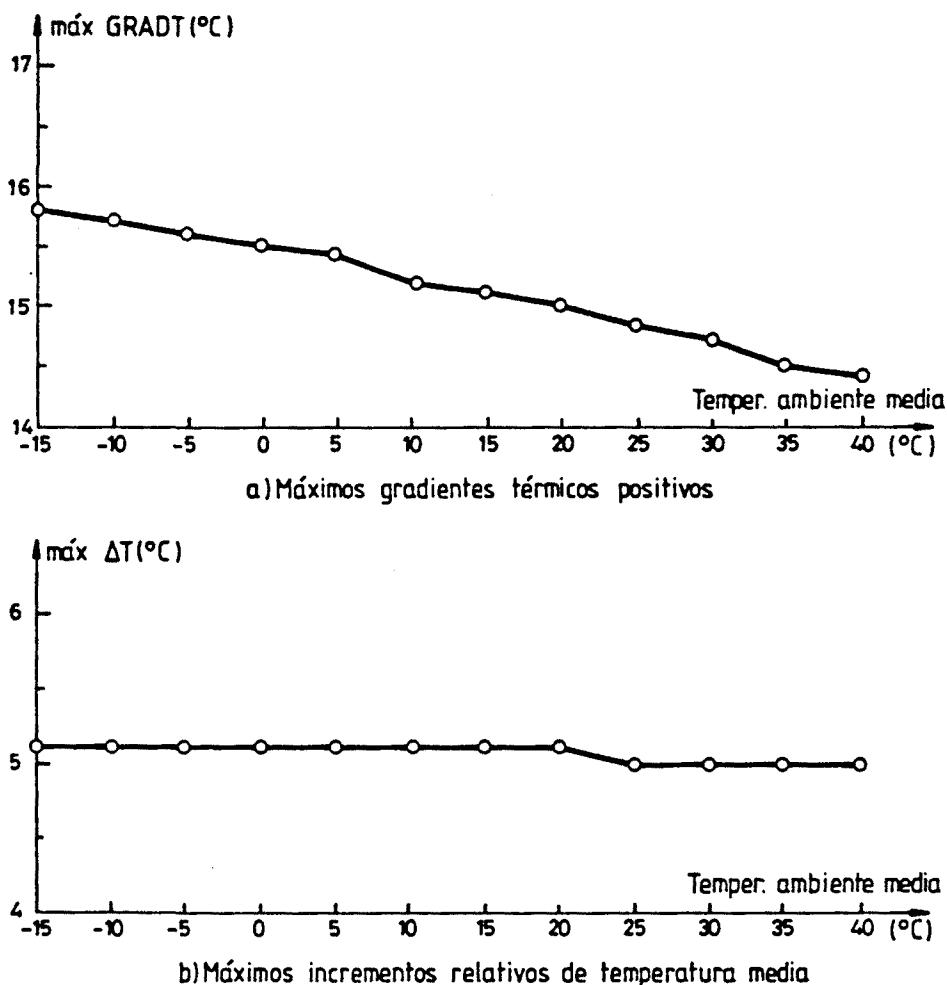
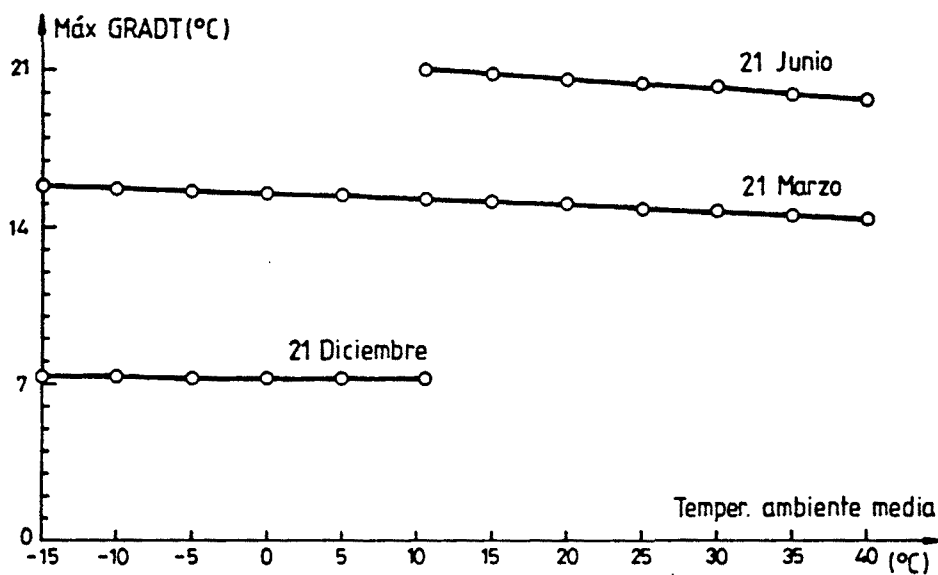
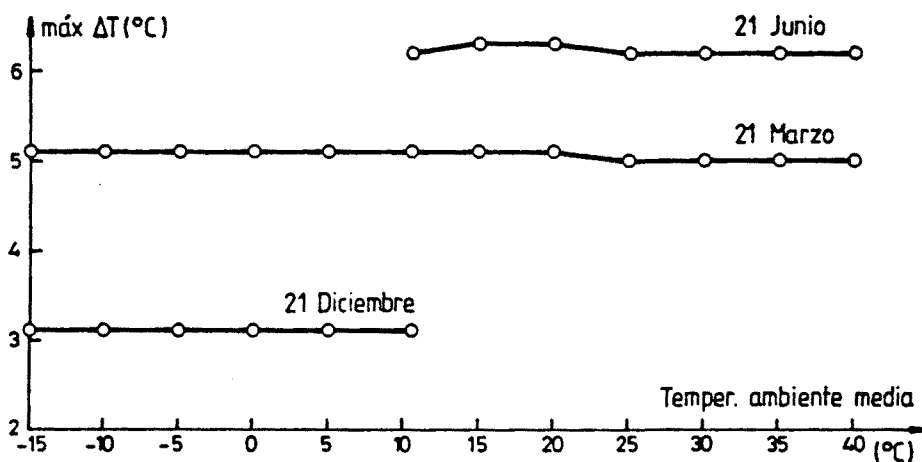


Fig. 3.22.- Influencia de la temperatura ambiente media sobre los gradientes e incrementos relativos de temperatura media máximos.

No obstante, para que tal conclusión sea definitiva se ha llevado a cabo un nuevo estudio paramétrico de la temperatura ambiente media para diferentes días del año: 21 de Diciembre y 21 de Junio. Los resultados más relevantes de este análisis se recogen en las gráficas de la figura 3.23, en las cuales se aprecia, de nuevo, que la influencia del parámetro analizado sobre las distribuciones de temperaturas y tensiones y las acciones térmicas impuestas es mínima. Los valores obtenidos para éstas últimas discrepan de los obtenidos para el día 21 de Marzo -estudio básico de referencia- pero tales discrepancias no son debidas al valor que adopta la temperatura ambiente media sino al propio día del año para el cual se lleva a cabo el estudio paramétrico.



a) Máximos gradientes térmicos positivos



b) Máximos incrementos relativos de temperatura media

Fig. 3.23.- Influencia de la temperatura ambiente media sobre los gradientes e incrementos relativos de temperatura media máximos para diferentes días del año.

Así pues, para un día determinado del año, las distribuciones de temperaturas y las acciones térmicas impuestas no sufren variaciones considerables al ir variando la temperatura ambiente media correspondiente a tal día. Por consiguiente, puede concluirse que la influencia de dicho parámetro es despreciable.

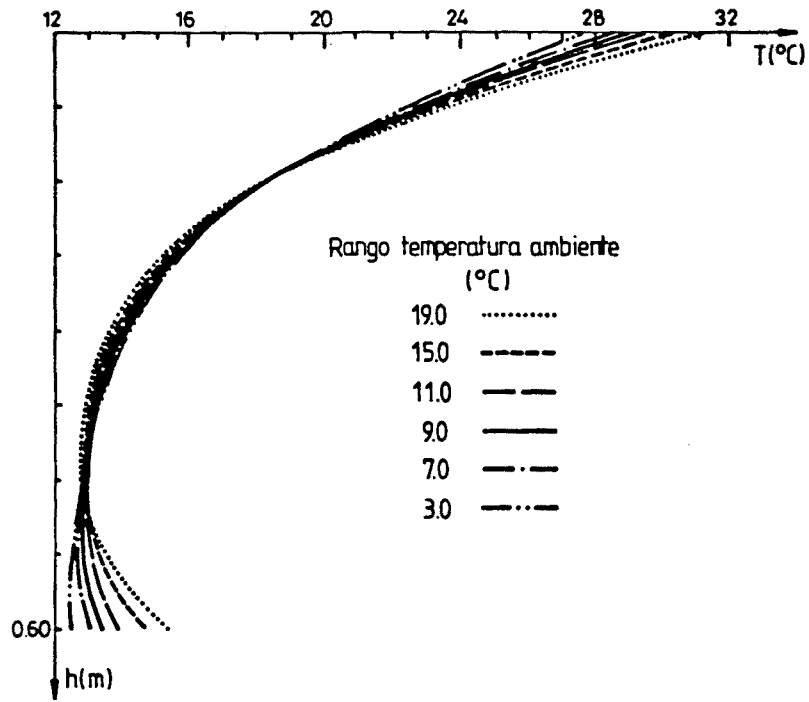
Rango de variación diaria de la temperatura ambiente

La variación de la temperatura ambiente a lo largo de un día viene definida por su valor medio y por la oscilación térmica o rango de variación diaria, entendido éste como la diferencia ente el máximo valor y el mínimo valor alcanzados por la temperatura ambiente en ese día. Los valores asignados al rango de variación diaria de la temperatura ambiente son 21, 19, 17, 15, 13, 11, 9, 7, 5 y 3°C cubriéndose de esta forma la variada climatología existente en nuestro país, desde un clima extremadamente continental a un clima mediterráneo muy suave.

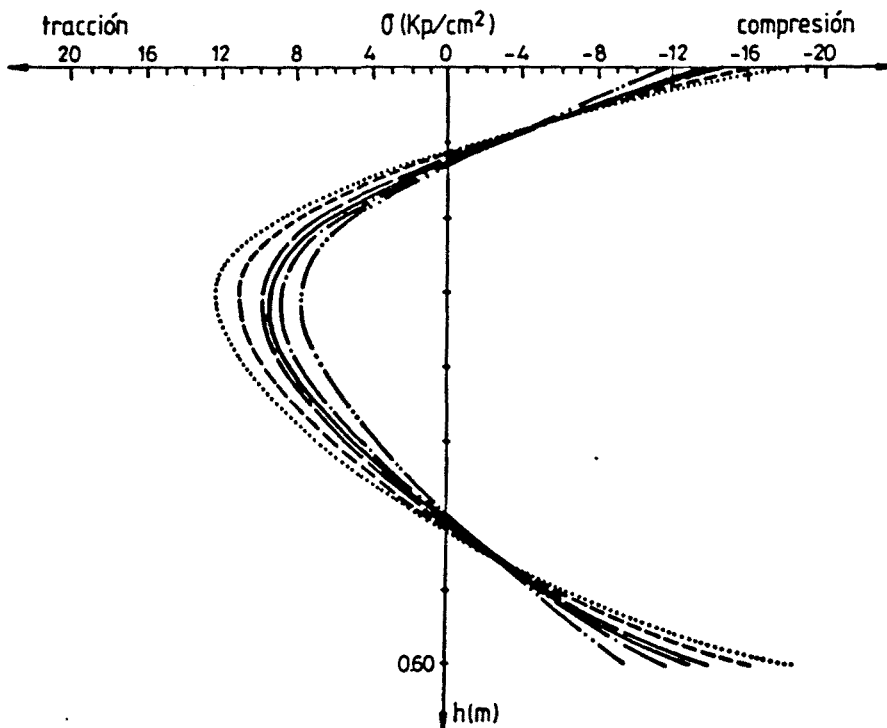
Las figuras 3.24.a y 3.24.b muestran las distribuciones de temperaturas y tensiones correspondientes a los diferentes valores que adopta el parámetro analizado en el instante en el que se generan, para cada uno de los casos, los máximos gradientes térmicos lineales equivalentes y positivos.

De la observación de dichas figuras se desprende que cuanto mayor es el valor del rango de variación de la temperatura ambiente mayores son las temperaturas en las fibras superior e inferior de la sección manteniéndose la temperatura en las fibras intermedias prácticamente constante. Ello hace que la no linealidad del campo térmico sea más acusada para valores altos del parámetro y es por ello por lo que, para estos casos, se inducen tensiones autoequilibradas de mayor magnitud.

Las figuras 3.25.a y 3.25.b reflejan la evolución diaria del gradiente térmico y de la temperatura media de la sección para diferentes valores del rango de variación de la temperatura ambiente.



a) Distribución de temperaturas



b) Distribución de tensiones

Fig. 3.24.- Distribuciones de temperaturas y de tensiones en la losa de canto 0.60 metros correspondientes a instantes de máximo gradiente térmico para diferentes valores del rango de variación de la temperatura ambiente.

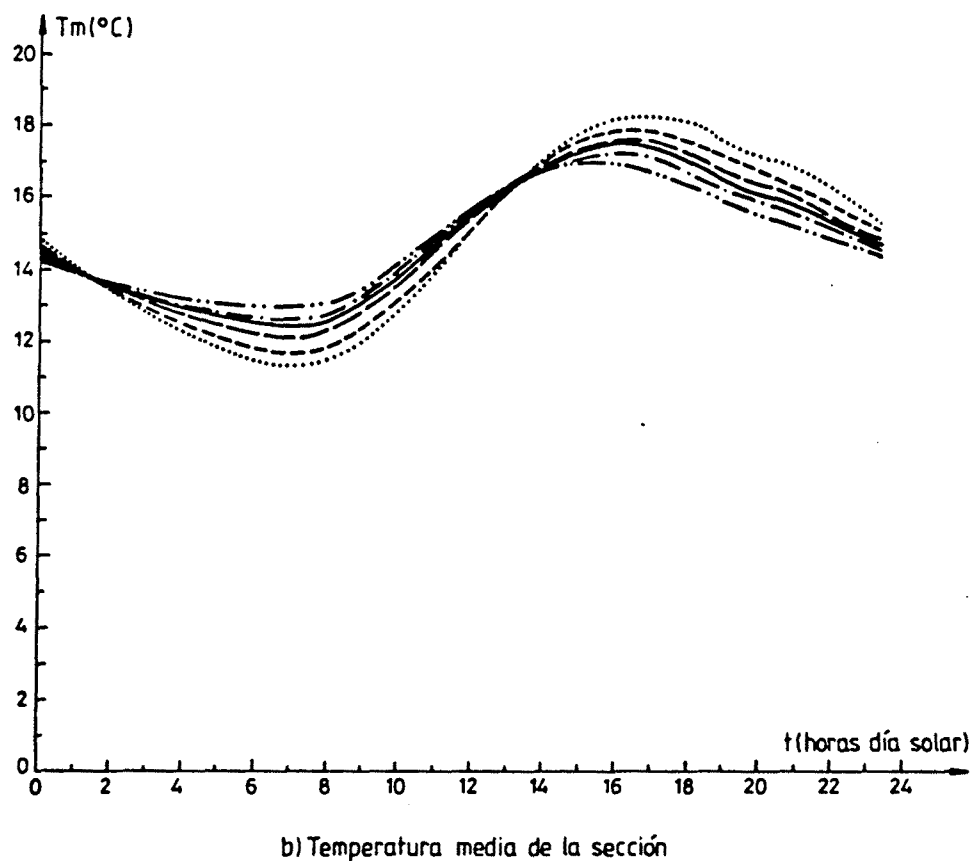
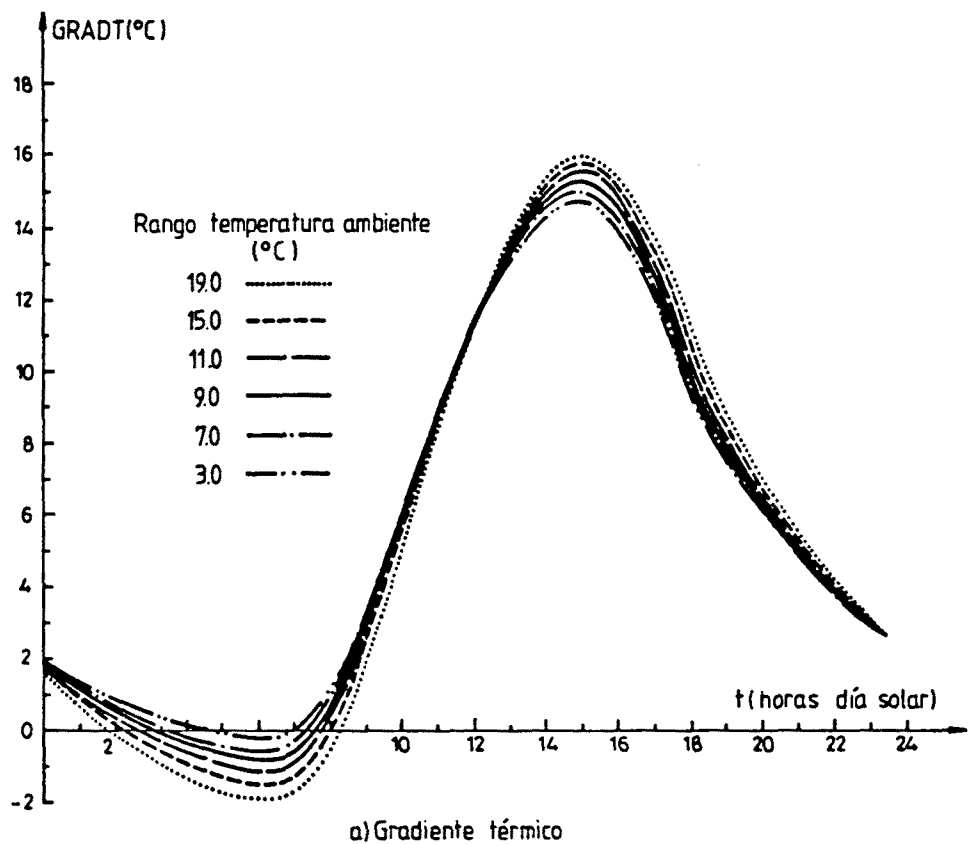


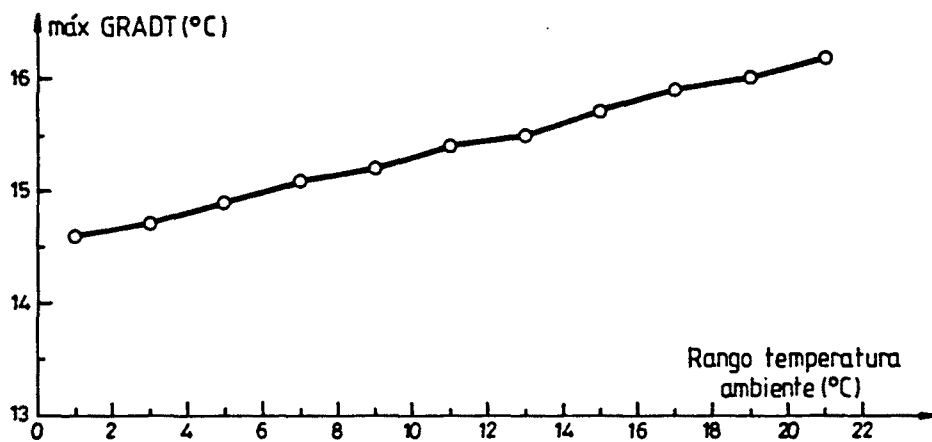
Fig. 3.25.- Evolución del gradiente térmico y de la temperatura media a lo largo del día para diferentes valores del rango de variación de la temperatura ambiente.

En dichas figuras se aprecia que tanto el gradiente como la temperatura media de la sección siguen una ley periódica cuyos máximos aparecen en horas posteriores al mediodía solar con un desfase entre ambos cercano a una hora. Por otra parte, puede observarse que cuanto mayor es el rango de variación de la temperatura ambiente, mayor es el rango de variación del gradiente térmico. Ello implica, por un lado, el que los máximos gradientes térmicos sean más altos y, por otro, el que secciones sometidas a elevados rangos de variación de temperatura ambiente serán más susceptibles de verse solicitados con gradientes térmicos inversos. La evolución de la temperatura media muestra un comportamiento similar observándose que su rango de variación aumenta también con el rango de variación de la temperatura ambiente.

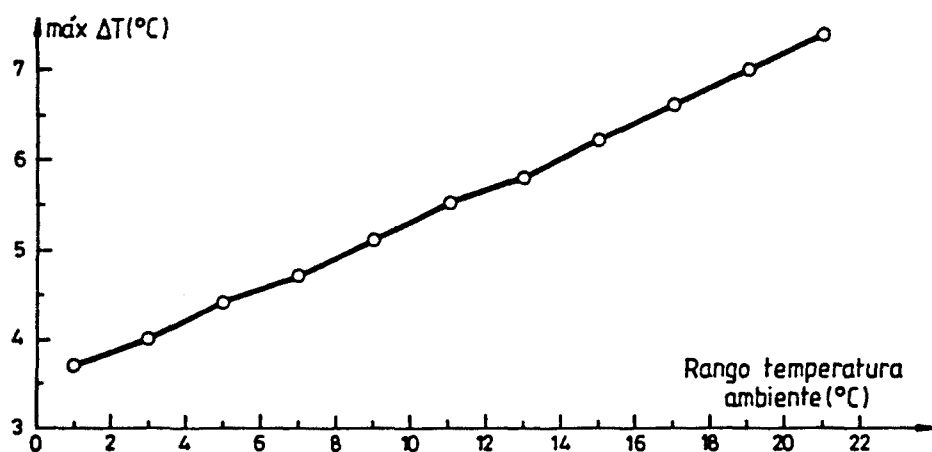
A continuación, las figuras 3.26.a y 3.26.b muestran la influencia del rango de variación de la temperatura ambiente en las acciones térmicas máximas obtenidas.

Ambas gráficas evidencian una relación directamente proporcional entre el parámetro analizado y los gradientes máximos e incrementos máximos obtenidos. Es decir, cuanto mayor sea el rango de variación de la temperatura ambiente mayores serán las acciones térmicas máximas impuestas.

En lo referente al análisis tensional se observa de nuevo que existen dos instantes para los cuales se generan las máximas tensiones de tracción. Estas acaecen a primeras horas del día (alrededor de las 4 horas) solicitando las fibras superior e inferior de la sección y, en concreto los voladizos, o a horas próximas al mediodía solar (alrededor de las 13.50 horas) siendo las fibras más solicitadas las intermedias y, en especial, las cercanas a los paramentos laterales de la sección.



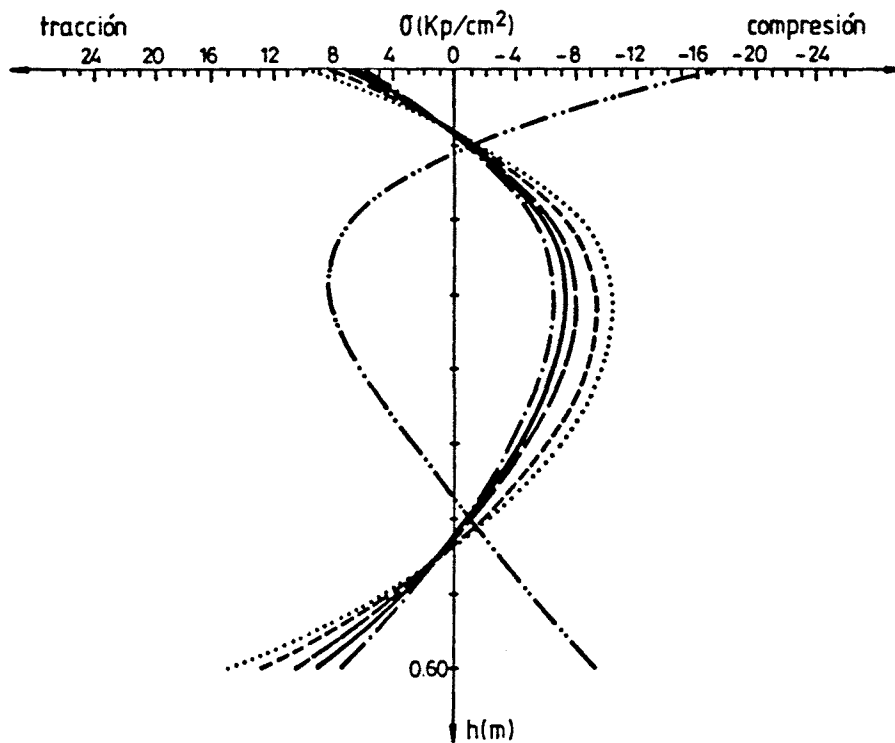
a) Máximos gradientes térmicos positivos



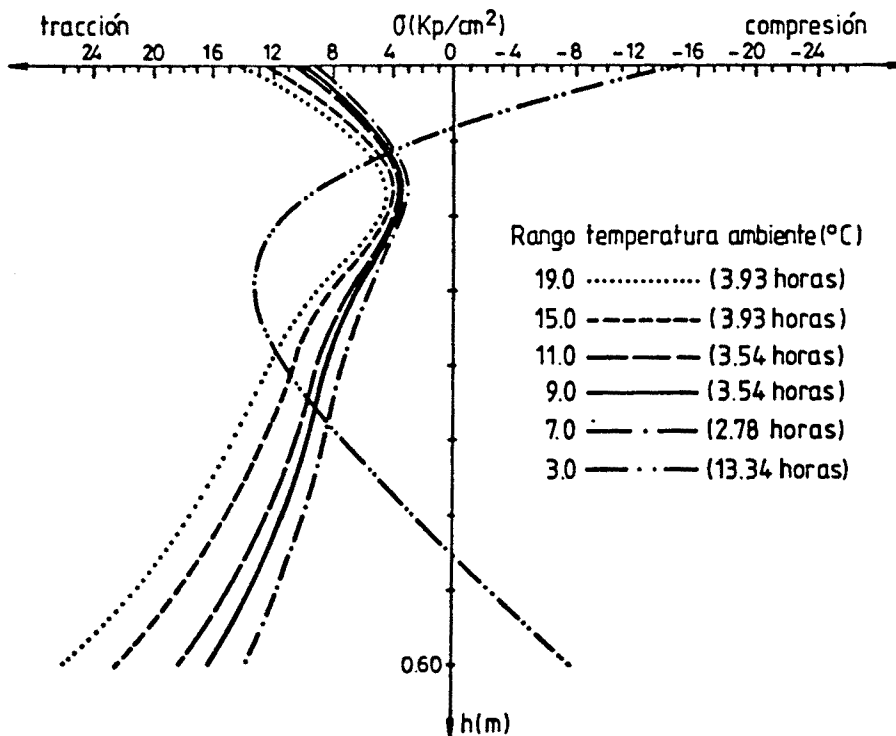
b) Máximos incrementos relativos de temperatura media

Fig. 3.26.- Influencia del rango de variación de la temperatura ambiente sobre los gradientes e incrementos relativos de temperatura media máximos.

La figura 3.27 muestra las distribuciones de tensiones según diversos ejes verticales de la sección correspondientes cada una de ellas al instante en que se obtiene a lo largo de todo el período temporal analizado la máxima tracción. Cabe señalar que dicha tracción máxima, dependiendo del valor del parámetro, tendrá lugar en instantes distintos y solicitará diferentes fibras de la sección.



a) Tensiones según el eje de simetría de la sección



b) Tensiones según el eje que contiene el paramento lateral de la sección

Fig. 3.27.- Distribuciones de tensiones autoequilibradas según diversos ejes, correspondientes al instante en que se genera la máxima tracción para diferentes valores del rango de temperatura ambiente.

Así por ejemplo, para el caso en el que el rango de variación de la temperatura ambiente sea de 19.0°C , la tracción máxima ocurre a las 3.93 horas de la madrugada, su valor es de 26.02 Kp/cm^2 y el nodo solicitado con dicha tracción es el que idealiza la esquina inferior de la sección mientras que para un rango de temperatura ambiente igual a 3.0°C , la tracción máxima ocurre a las 13.34 horas del mediodía, su valor es de 13.23 Kp/cm^2 y el nodo solicitado con tal tracción es el situado en el paramento lateral de la sección a una profundidad de 22.5 cms. por debajo del borde superior de la sección analizada.

En resumen, del análisis de los resultados obtenidos se desprenden varias conclusiones:

- Cuanto mayor es el rango de variación diaria de la temperatura ambiente mayores son las tensiones internas autoequilibradas.
- Cuanto mayor es el rango de variación diaria de la temperatura ambiente mayores son los gradientes máximos e incrementos relativos de temperatura media de la sección y mayores son también los rangos de variación del gradiente y de la temperatura media de la sección.

En base a ello, puede concluirse que, atendiendo únicamente a los efectos que produce la oscilación o rango de variación diaria de la temperatura ambiente en el comportamiento térmico y tensional de los puentes losa maciza de hormigón a nivel sección, puentes cuyo emplazamiento se encuentre en regiones con clima continental extremo se encuentran en situación más desfavorable que puentes cuyo emplazamiento se sitúe en zonas de clima suave.

Velocidad del viento

Otro de los parámetros que define las condiciones ambientales a las que se ve expuesto el puente de hormigón es la velocidad del viento. Dicho factor entra en juego a través del valor o valores que adoptan los coeficientes de transferencia de calor por convección para las diferentes superficies externas e internas que delimitan el contorno de la sección transversal del puente que se analiza.

Como ya se ha comentado con anterioridad en el apartado 1.2.1, existen diversas fórmulas empíricas que relacionan la velocidad del viento con el coeficiente de transferencia de calor por convección. De entre ellas cabe destacar las siguientes:

$$h_c = 3.95w + 5.58 \quad (\text{Zichner (97)})$$

| | | |
|----------------------|------------|------------|
| $h_c = 4.0w + 5.6$ | $w \leq 5$ | (CEB (23)) |
| $h_c = 7.15w^{0.78}$ | $w \geq 5$ | |

| | | |
|----------------------|-----------------------------|-----------------|
| $h_c = 3.83w + 4.67$ | superficie superior | (Kehlbeck (53)) |
| $h_c = 3.83w + 2.17$ | superficie inferior | |
| $h_c = 3.83w + 3.67$ | superficie exterior lateral | |
| $h_c = 3.5$ | superficie interior células | |

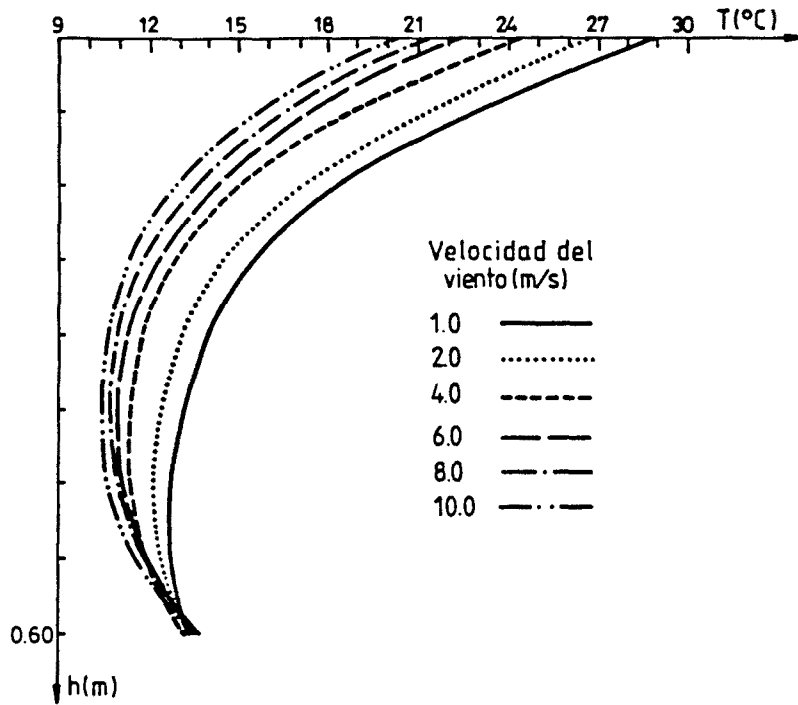
En todas ellas w es la velocidad del viento en m/seg. y h_c es el coeficiente de transferencia de calor por convección en $W/m^2 \text{ } ^\circ C$. Como puede observarse, las diferencias entre dichas fórmulas no son significativas, adoptándose en el presente estudio paramétrico los coeficientes propuestos por Kehlbeck (53), los cuales han sido utilizados por diversos investigadores (Elbadry y Ghali (32), (33), Dilger et al. (28)). La tabla 3.4 muestra los valores de dichos coeficientes.

| Velocidad del viento (m/seg) | Coeficiente de transferencia de calor por convección h_c (W/m ² °C) | | |
|------------------------------|--|---------------------|-----------------------------|
| | Superficie superior | Superficie inferior | Superficie exterior lateral |
| 1.0 | 8.5 | 6.0 | 7.5 |
| 2.0 | 12.3 | 9.8 | 11.3 |
| 3.0 | 16.2 | 13.7 | 15.2 |
| 4.0 | 20.0 | 17.5 | 19.0 |
| 5.0 | 23.8 | 21.3 | 22.8 |
| 6.0 | 27.7 | 25.2 | 26.7 |
| 8.0 | 35.3 | 32.8 | 34.3 |
| 10.0 | 43.0 | 40.5 | 42.0 |
| 11.0 | 46.8 | 44.3 | 45.8 |

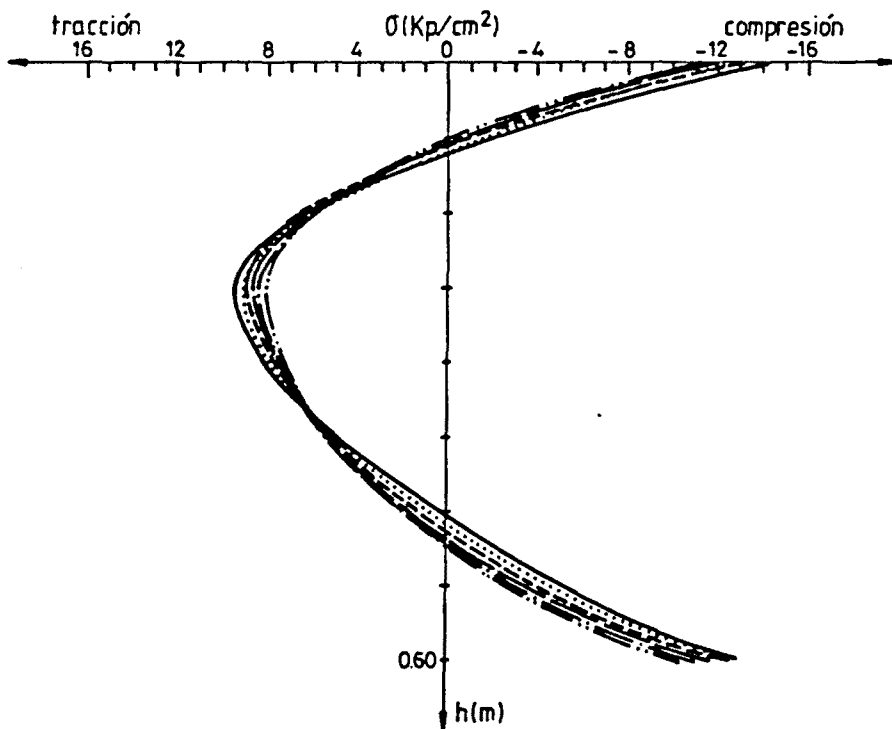
Tabla 3.4.- Valores adoptados por los coeficientes de transferencia de calor por convección en el estudio paramétrico (Kehlbeck (53)).

Las diferentes velocidades de viento a estudiar son 1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 10 y 11 m/seg. Tales velocidades se suponen son velocidades medias de viento a lo largo del día analizado. Lógicamente, pueden existir instantes o determinados períodos de tiempo en los que la velocidad real del viento difiera sensiblemente de la velocidad media supuesta. No obstante, es generalmente admitido el trabajar con velocidades medias diarias lo cual refleja, con suficiente aproximación, la situación en la que se encuentra inmerso el puente analizado en lo referente a las condiciones ambientales de este parámetro climatológico.

Las figuras 3.28.a y 3.28.b muestran las distribuciones de temperaturas y de tensiones autoequilibradas correspondientes a los instantes en que, para cada uno de los valores que adopta la velocidad del viento, se generan los máximos gradientes equivalentes positivos. Dichas distribuciones tienen lugar en el eje de simetría de la sección losa analizada.



a) Distribución de temperaturas



b) Distribución de tensiones

Fig. 3.28.- Distribuciones de temperaturas y de tensiones en la losa de canto 0.60 metros correspondientes a instantes de máximo gradiente térmico para diferentes velocidades de viento.

La observación de las distribuciones de temperaturas presentadas en la figura 3.28.a evidencia el hecho de que cuanto mayor es la velocidad del viento más se acerca la temperatura de la fibra superior de la sección a la temperatura ambiente en cualquier instante. Ello conlleva una disminución de la temperatura en las fibras intermedias de la losa maciza manteniéndose, a su vez, prácticamente constante la temperatura de la fibra inferior de la sección.

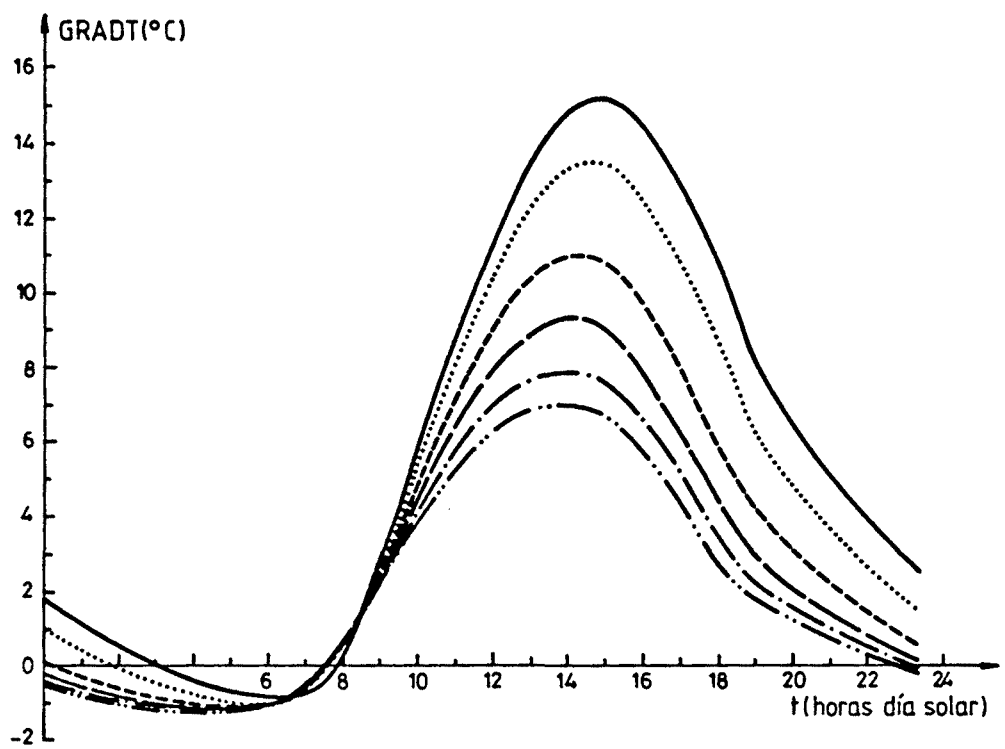
Así, las distribuciones de temperatura, a medida que disminuye la velocidad del viento, presentan una no linealidad algo más acusada originándose mayores niveles de tensión autoequilibrada, si bien las diferencias no son importantes (ver figura 3.28.b).

Las figuras 3.29.a y 3.29.b muestran la evolución diaria del gradiente térmico y de la temperatura media de la sección para diferentes valores de la velocidad del viento.

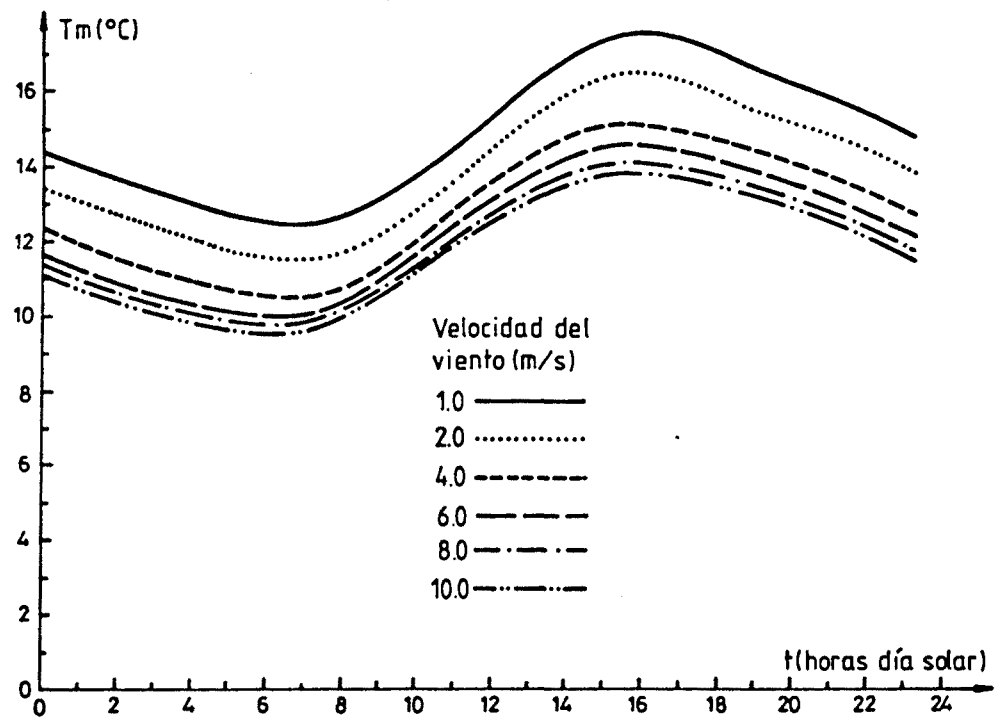
En ambas figuras se observa que tanto el gradiente como la temperatura media siguen una ley periódica a lo largo del día, generándose los máximos de ambas funciones a las 15 horas y 15.64 horas de la tarde respectivamente. Puede apreciarse también que el rango de variación diaria de dichas variables aumenta al disminuir la velocidad del viento induciéndose mayores gradientes y mayores temperaturas medias si la velocidad del viento es mínima.

La influencia del valor de la velocidad del viento sobre las acciones térmicas máximas queda reflejada en las figuras 3.30.a y 3.30.b.

En ellas se observa que a medida que aumenta la velocidad del viento menores son los valores máximos alcanzados por las acciones térmicas; dicho comportamiento se aprecia con gran claridad en la figura 3.30.a.



a) Gradiente térmico



b) Temperatura media de la sección

Fig. 3.29.- Evolución diaria del gradiente térmico y de la temperatura media de la sección para diferentes valores de la velocidad del viento.

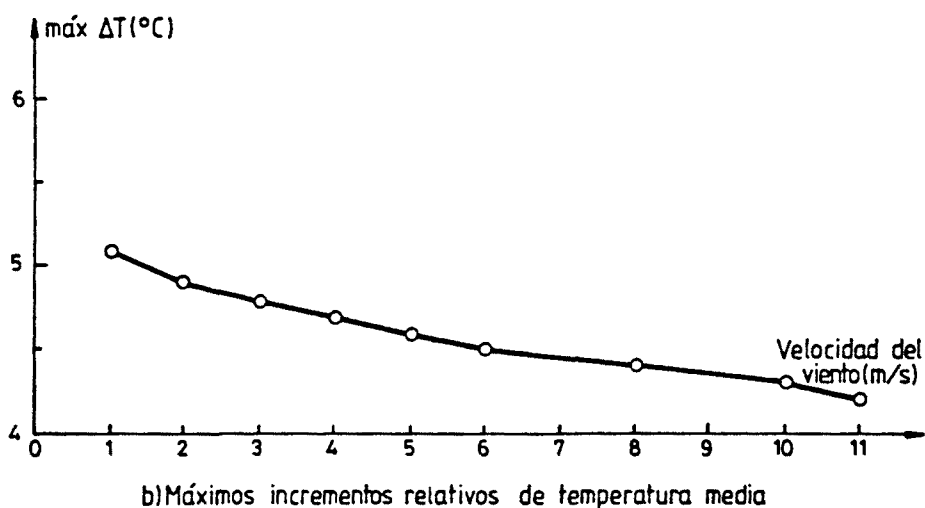
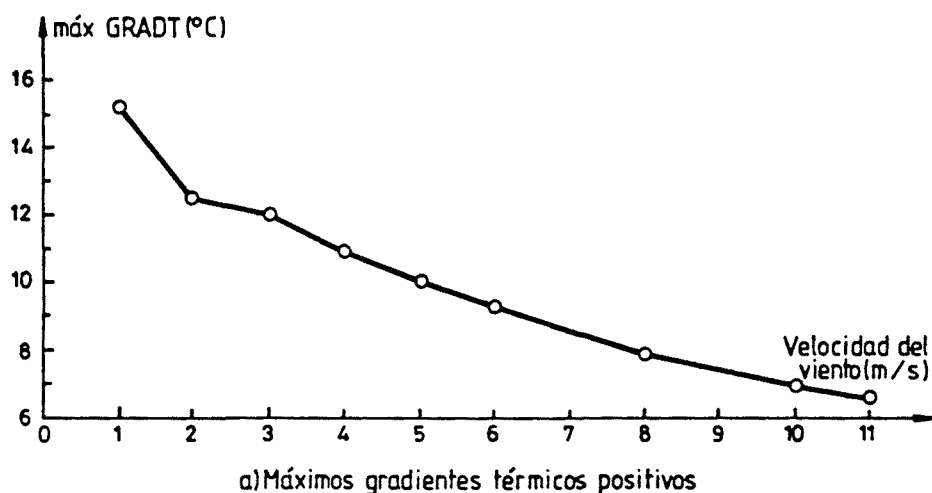


Fig. 3.30.- Influencia de la velocidad del viento sobre los gradientes e incrementos relativos de temperatura media máximos.

Por otra parte, es de destacar el hecho de que la rama descendente con mayor pendiente en ambas gráficas es la que tiene lugar para velocidades de viento comprendidas entre 1.0 y 2.0 m/seg. Es decir, que la transición de una situación ambiental de calma, en la cual la velocidad del viento es mínima, a una situación en la que se aprecia la existencia de viento lleva consigo el que disminuyan considerablemente los gradientes térmicos máximos y de forma menos acusada los incrementos relativos de temperatura media.

En cuanto a las tensiones máximas de tracción que tienen lugar a lo largo del día puede decirse, al igual que en

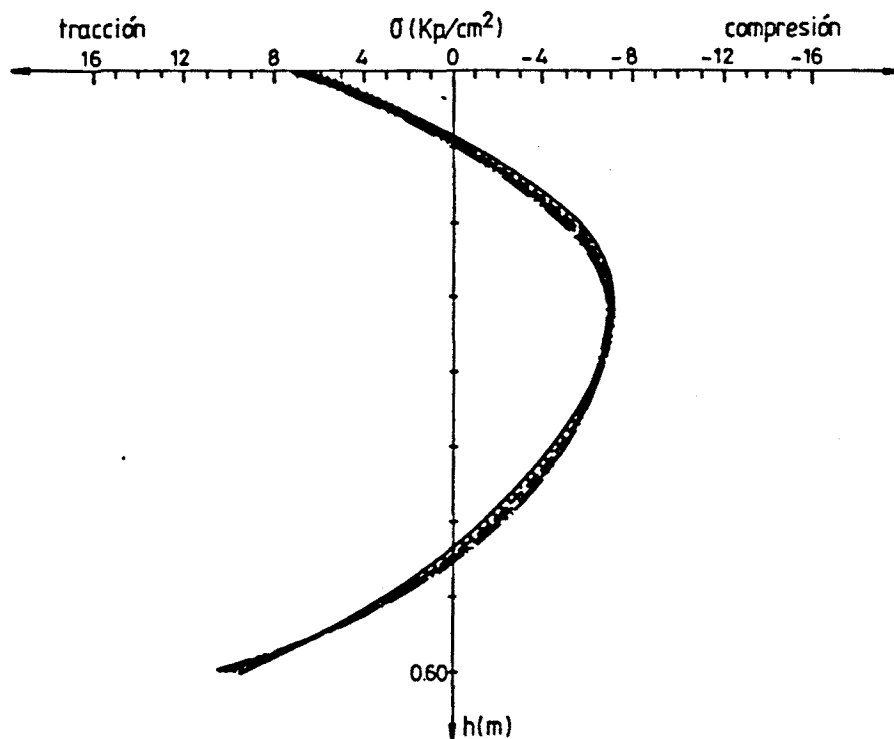
estudios paramétricos anteriores, que existen dos instantes para los cuales se generan las máximas tensiones autoequilibradas de tracción en diferentes zonas de la sección analizada. Uno de esos instantes se presenta en horas posteriores al mediodía solar y, en general, en horas próximas al instante en el que se induce la máxima curvatura térmica impuesta (o máximo gradiente térmico). En este caso las fibras intermedias de la losa son las que se ven solicitadas por tales tracciones máximas. El otro instante sucede en horas posteriores a la medianoche y próximas al período de tiempo en el que se inducen los mínimos gradientes térmicos positivos o los máximos gradientes térmicos negativos (o inversos); en este caso son las fibras superior e inferior de la sección las que se ven sometidas a dichas tracciones.

La figura 3.31 muestra las distribuciones de tensiones correspondientes al instante en que, para cada uno de los valores adoptados por la velocidad del viento, se alcanza la máxima tracción; ésta ocurre, para todos los casos, en horas de madrugada siendo la zona solicitada la situada en las esquinas inferiores de la losa.

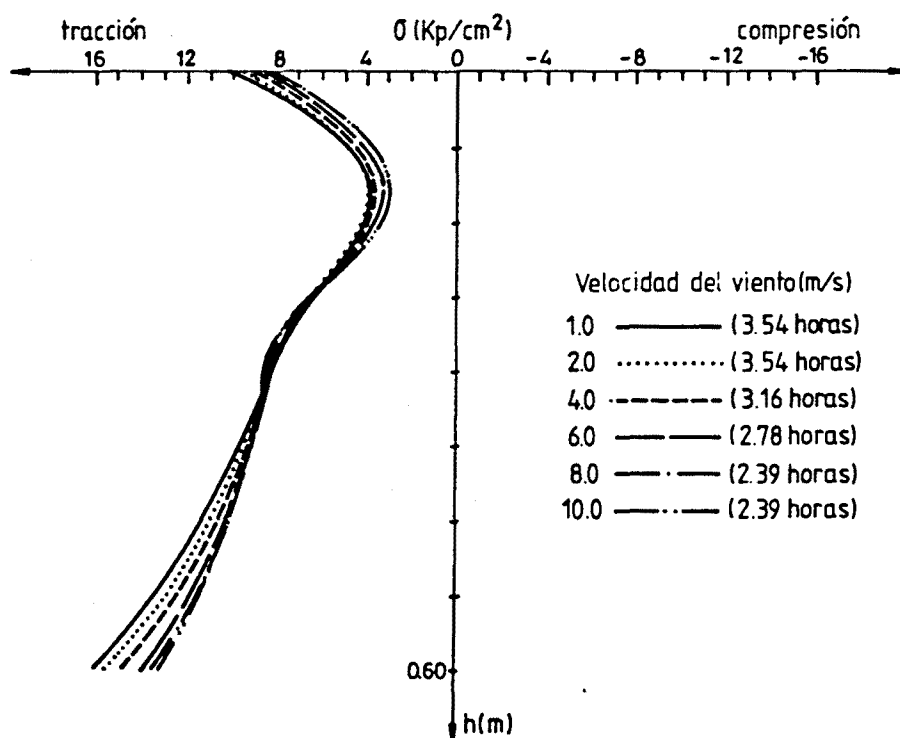
Del análisis de los resultados obtenidos pueden derivarse, a modo de resumen, las siguientes conclusiones:

- Cuanto menor es la velocidad del viento mayores son las tensiones internas autoequilibradas, si bien las diferencias no son muy acusadas.
- Cuanto menor es la velocidad del viento mayores son los gradientes térmicos máximos e incrementos relativos de temperatura media y mayor es el rango de variación del gradiente.

En base a tales conclusiones puede afirmarse que puentes expuestos a la intemperie (puentes sobre bahías, ríos, valles) presentarán condiciones más favorables frente a la acción térmica ambiental que puentes emplazados en ambientes urbanos en los cuales las velocidades de viento no son, en general, elevadas.



a) Tensiones según el eje de simetría de la sección



b) Tensiones según el eje que contiene el paramento lateral de la sección

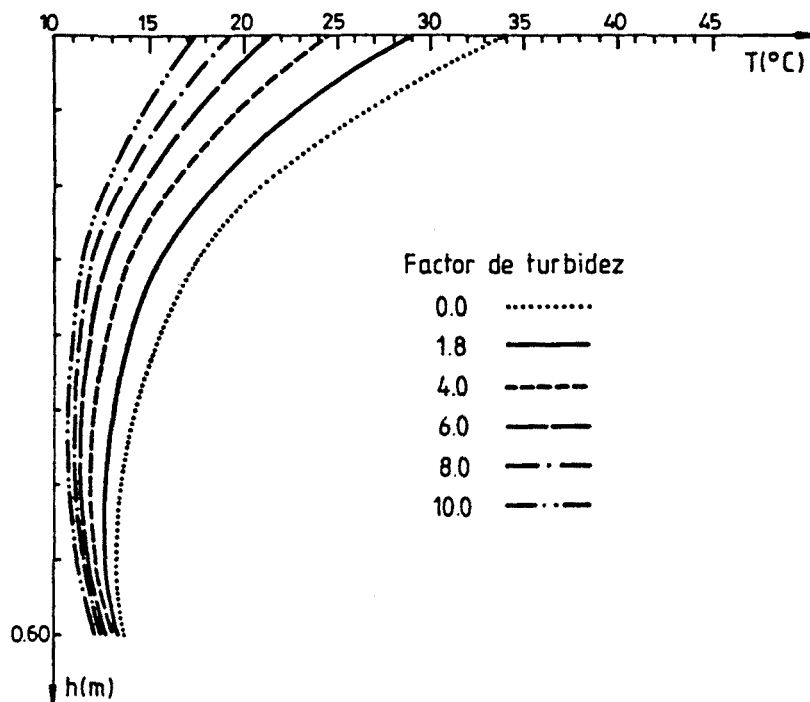
Fig. 3.31.- Distribuciones de tensiones autoequilibradas según diversos ejes, correspondientes al instante en que se genera la máxima tracción para diferentes valores de la velocidad del viento.

Factor de turbidez

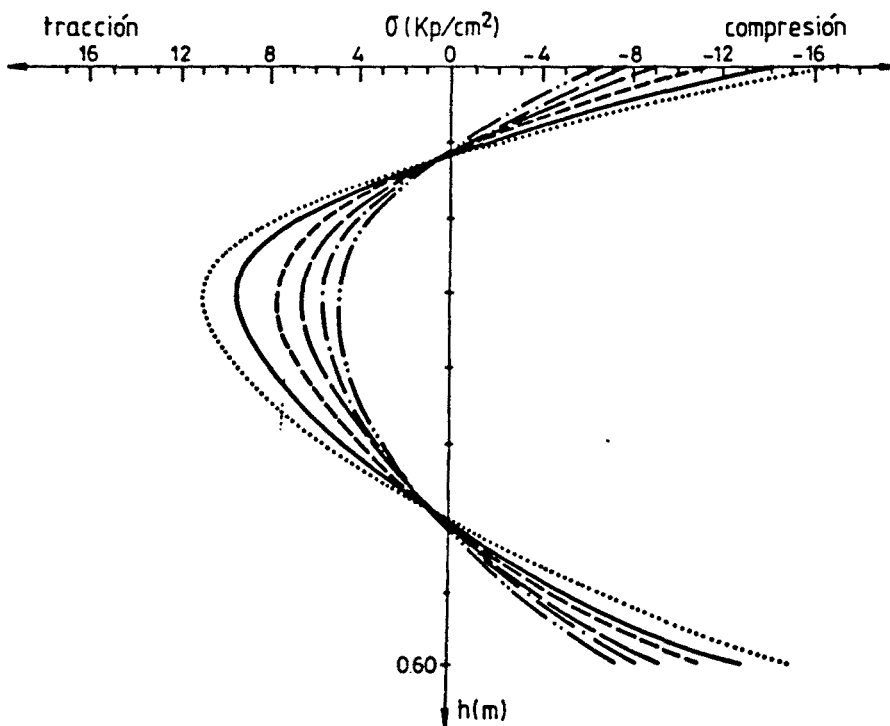
Uno de los parámetros ambientales que influye en el comportamiento y respuesta estructural de los puentes de hormigón frente a los efectos térmicos ambientales es el factor de turbidez de la atmósfera. Dicho factor contempla la influencia que la presencia de nubosidad y de polución del aire existente en la zona de emplazamiento del puente ejerce sobre la intensidad de radiación solar incidente sobre las superficies externas del puente de hormigón. Los valores que adopta el factor de turbidez varían, según Kehlbeck (53), entre 1.8 y 3.0 para cielos claros mientras que para ambientes pesados e industriales con índices de polución atmosférica elevados dicho factor puede llegar a alcanzar valores de 8.0 y 9.0. En particular, para el estudio paramétrico se han adoptado los valores de 0.0, 1.0, 1.8, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0, 6.0, 7.0, 8.0, 9.0 y 10.0.

A continuación, las figuras 3.32.a y 3.32.b muestran las distribuciones de temperaturas y de tensiones autoequilibradas según el eje de simetría de la sección losa maciza de 0.60 metros de canto correspondientes a los instantes para los cuales se alcanzan las máximas curvaturas térmicas inducidas en función del valor adoptado por el factor de turbidez.

Como puede observarse las distribuciones de temperaturas correspondientes a bajos factores de turbidez de la atmósfera presentan una acusada no linealidad alcanzándose temperaturas elevadas en el borde superior de la losa maciza sin que se produzcan fuertes variaciones en el valor de la temperatura en el interior de la sección a lo largo del período de tiempo analizado. Lógicamente, la razón por la cual a un factor de turbidez bajo le corresponde una elevada temperatura en la superficie superior hay que buscarla en el valor de la intensidad de radiación solar incidente sobre el tablero.



a) Distribución de temperaturas



b) Distribución de tensiones

Fig. 3.32.- Distribuciones de temperaturas y de tensiones en la losa de canto 0.60 metros correspondientes a instantes de máximo gradiente térmico para diferentes valores del factor de turbidez.

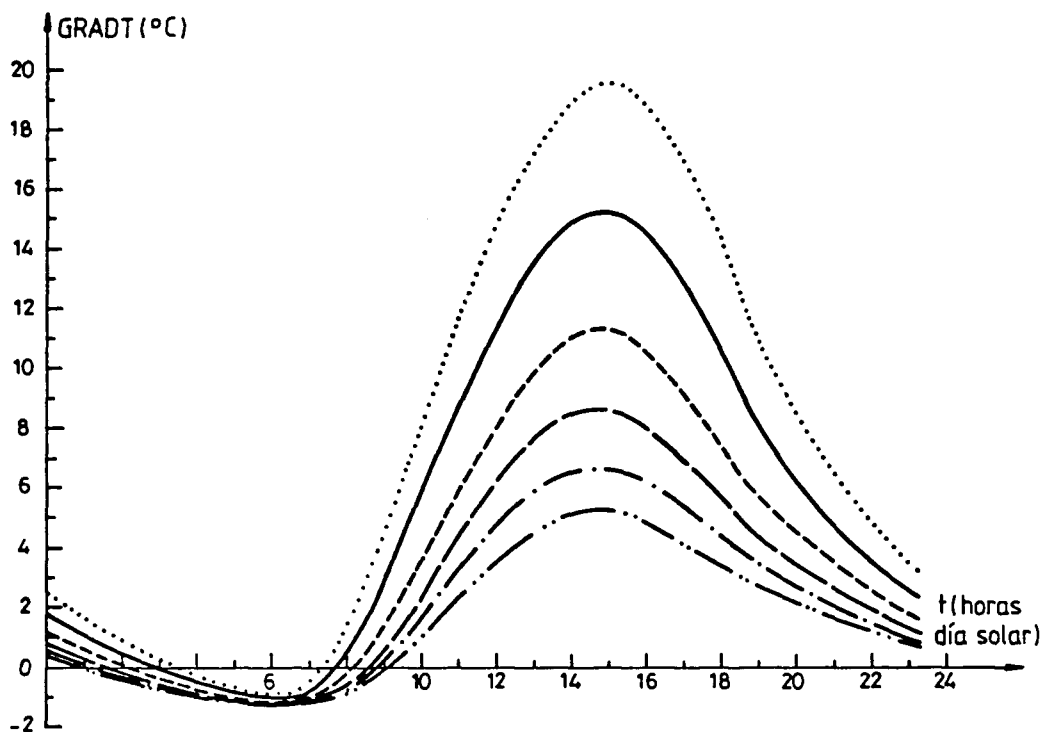
Así, para un factor de turbidez nulo la intensidad de radiación solar en el tablero a las 12 horas del mediodía solar es de 1025 W/m^2 mientras que para un factor de turbidez igual a 10 aquella adopta el valor de 280 W/m^2 . Todo ello se traduce en un mayor valor de las tensiones autoequilibradas a medida que el factor de turbidez va disminuyendo.

Las figuras 3.33.a y 3.33.b muestran la evolución diaria del gradiente térmico y de la temperatura media de la sección en función del valor asignado al factor de turbidez.

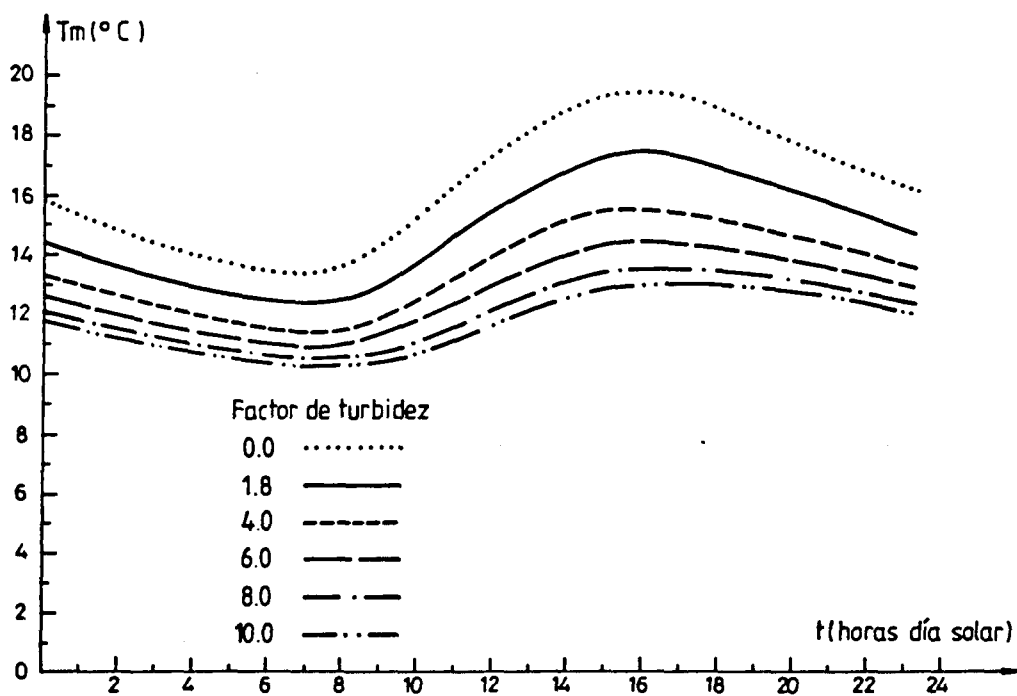
En ambas figuras se observa que los rangos de variación del gradiente térmico y de la temperatura media de la sección disminuyen a medida que aumenta el factor de turbidez de la atmósfera alcanzándose las máximas temperaturas medias con un desfase horario con respecto al instante de máximos gradientes de aproximadamente 1 hora. También puede apreciarse una disminución de la temperatura media de la sección a lo largo de todo el día para valores elevados del factor de turbidez.

Las figuras 3.34.a y 3.34.b reflejan la influencia del valor adoptado por el parámetro analizado sobre los valores máximos alcanzados por las acciones térmicas impuestas -gradientes e incrementos de temperatura-.

En ambas gráficas puede apreciarse que la influencia del factor de turbidez sobre las distribuciones de temperaturas y, en concreto, sobre las acciones térmicas y sus máximos es ciertamente notable. Así, puede apreciarse que a medida que aumenta el factor de turbidez disminuyen de forma considerable los máximos gradientes e incrementos de temperatura media. Como ya se ha comentado con anterioridad, a factores de turbidez bajos corresponden distribuciones de tensiones autoequilibradas de mayor magnitud. De nuevo, se aprecia que los instantes en los que tienen lugar las máximas tensiones autoequilibradas de tracción ocurren en horas próximas al mediodía solar y en horas de madrugada.



a) Gradiente térmico



b) Temperatura media de la sección

Fig. 3.33.- Evolución diaria del gradiente térmico y de la temperatura media de la sección para diferentes valores del factor de turbidez.

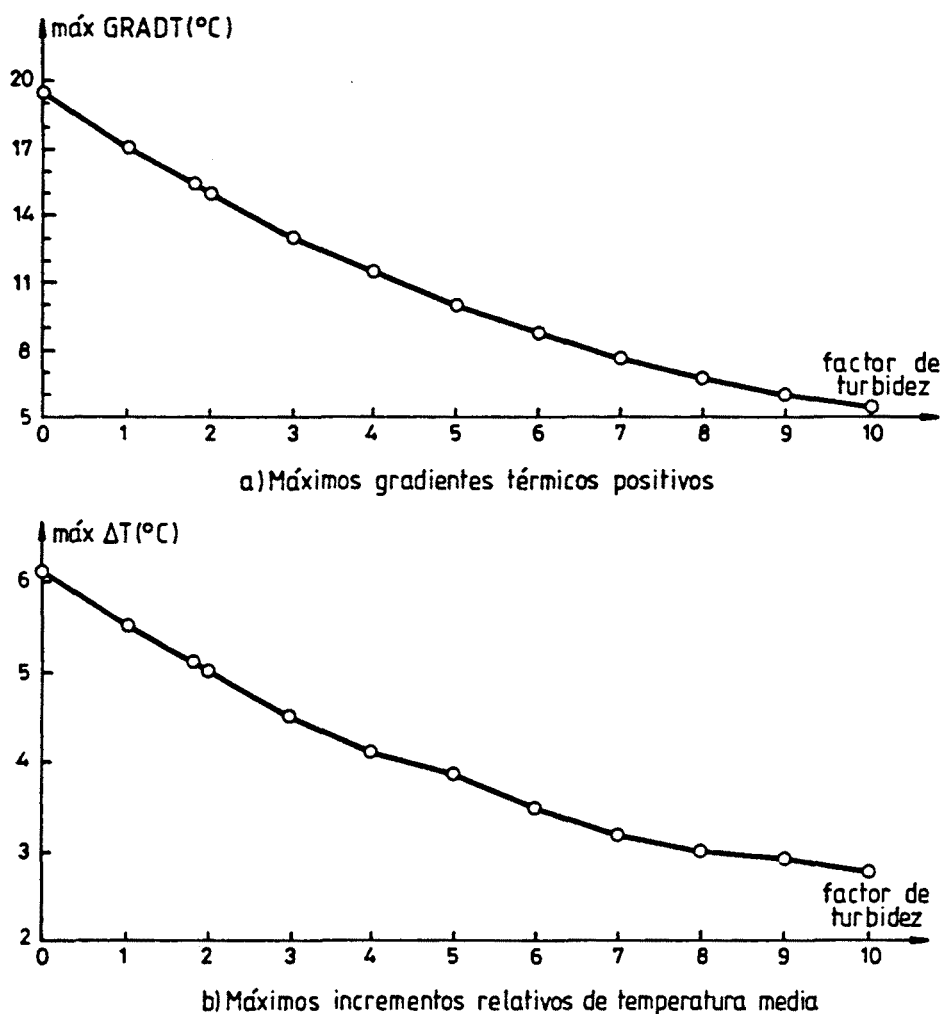
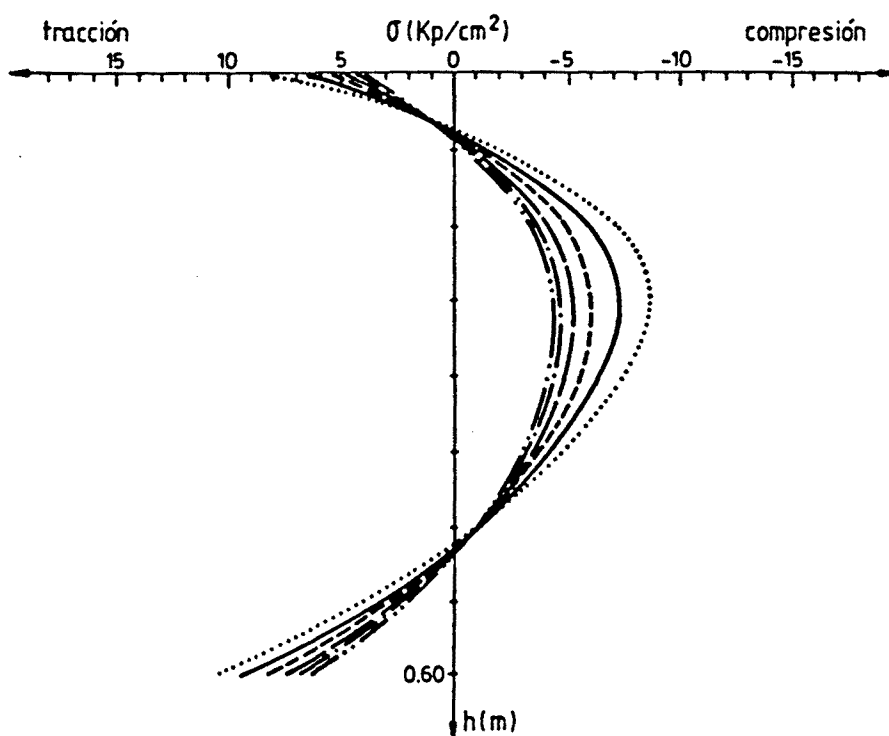
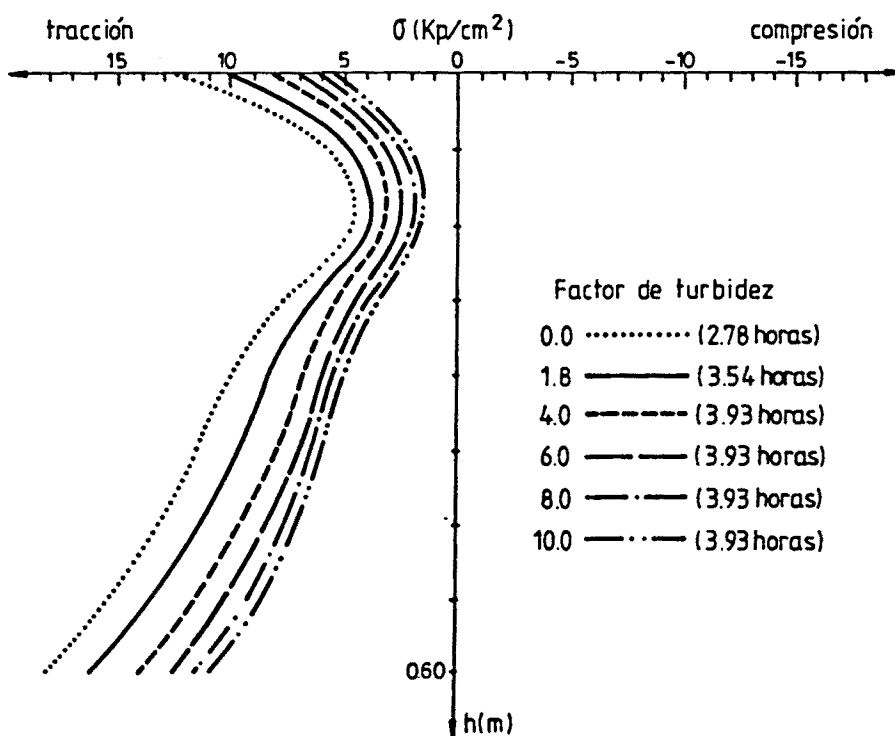


Fig. 3.34.- Influencia del factor de turbidez sobre los gradientes e incrementos relativos de temperatura media máximos.

Para las primeras, las distribuciones de tensiones adoptan, en función del valor del parámetro, unos perfiles similares a los mostrados en la figura 3.32.b, generándose las tracciones máximas en las fibras intermedias de la sección. Para las horas de madrugada, las tracciones máximas se alcanzan en la fibra superior e inferior de la losa. En la figura 3.35 se representan los perfiles de las distribuciones de tensiones correspondientes a los instantes en los que se generan las máximas tracciones para horas de madrugada en función del valor adoptado por el factor de turbidez. Dichas distribuciones tienen lugar en el eje vertical que contiene el paramento lateral de la sección y en el eje de simetría de la sección.



a) Tensiones según el eje de simetría de la sección



b) Tensiones según el eje que contiene el paramento lateral de la sección

Fig. 3.35.- Distribuciones de tensiones autoequilibradas, según diversos ejes, correspondientes al instante en que se genera la máxima tracción para diferentes valores del factor de turbidez.

En resumen, puede decirse que el factor de turbidez es uno de los parámetros ambientales que influye de forma notable en las distribuciones de temperaturas y de tensiones autoequilibradas existentes en puentes de hormigón con sección transversal de losa maciza.

Del análisis de los resultados del estudio paramétrico se desprenden las siguientes conclusiones relativas a la magnitud de las tensiones autoequilibradas y acciones térmicas:

- Cuanto menor es el factor de turbidez mayores son las tensiones internas autoequilibradas.
- Cuanto menor es el factor de turbidez mayores son los gradientes térmicos máximos y sus rangos de variación y mayor es el incremento relativo de temperatura media.

Debido a ello y atendiendo únicamente a la consideración de este factor, puede concluirse que puentes emplazados en ambientes urbanos e industrializados presentan condiciones más favorables frente a la acción térmica ambiental que puentes expuestos a la intemperie en emplazamientos con bajos índices de polución atmosférica.

Día del año

Si bien este factor puede no ser considerado como un parámetro ambiental, sí viene a representar unas ciertas condiciones de contorno las cuales influyen en los resultados obtenidos del análisis térmico y del análisis tensional. Dicha influencia queda reflejada de forma clara en el valor de la intensidad de radiación solar incidente sobre el tablero y paramentos laterales de la sección, en la inclinación de los rayos solares y en la duración del día solar. El presente estudio paramétrico se ha extendido a cada uno de los me-

ses del año, adoptando como día representativo -día medio- aquél que adopta para la radiación solar extraterrestre el valor más próximo a la radiación solar extraterrestre diaria, obtenida ésta última como media mensual para el mes considerado. A continuación, la tabla 3.5 presenta los días medios y las correspondientes declinaciones solares para cada uno de los meses del año.

| Mes | Día medio | Declinación (grados) |
|------------|-----------|----------------------|
| Enero | 17 | -20.7 |
| Febrero | 15 | -12.6 |
| Marzo | 16 | -1.7 |
| Abril | 15 | 9.8 |
| Mayo | 15 | 18.9 |
| Junio | 10 | 23.0 |
| Julio | 17 | 21.2 |
| Agosto | 17 | 13.4 |
| Septiembre | 16 | 2.6 |
| Octubre | 16 | -8.9 |
| Noviembre | 15 | -18.5 |
| Diciembre | 11 | -23.0 |

Tabla 3.5.- Días medios representativos de cada mes del año (Coronas et al. (25)).

El analizar de forma paramétrica la influencia del día del año conlleva, por otra parte, el imponer unos valores a la temperatura ambiente acordes con el mes analizado y con la situación geográfica en la que se emplaza el puente. Debido a ello, los valores asignados a la temperatura ambiente máxima y mínima para cada mes son los valores medios de las máximas y mínimas registradas a lo largo de un período de retorno de 30 años en la estación meteorológica de Sabadell, estación ésta más próxima al lugar de emplazamiento del puente analiza-

do. Los valores de dichas temperaturas han sido extraídos de la tesis doctoral de J. Avellaneda (10) y se recogen en la tabla 3.6.

| Mes | Temp. ambiente mínima (°C) | Temp. ambiente máxima (°C) |
|------------|----------------------------|----------------------------|
| Enero | 2.4 | 12.6 |
| Febrero | 3.4 | 14.2 |
| Marzo | 5.4 | 17.0 |
| Abril | 7.6 | 19.6 |
| Mayo | 10.8 | 22.8 |
| Junio | 14.5 | 26.8 |
| Julio | 17.5 | 29.6 |
| Agosto | 17.6 | 29.1 |
| Septiembre | 15.5 | 26.3 |
| Octubre | 11.1 | 21.9 |
| Noviembre | 6.4 | 16.7 |
| Diciembre | 3.4 | 12.9 |

Tabla 3.6.- Valores de las temperaturas ambientes mínima y máxima adoptados en el estudio paramétrico del día del año.

La figura 3.36 muestra la evolución anual de los gradientes térmicos verticales máximos, tanto positivos (la fibra superior se encuentra a mayor temperatura que la fibra inferior) como negativos (la fibra superior se encuentra a menor temperatura que la fibra inferior).

La evolución del gradiente máximo positivo sigue una ley de tipo periódico alcanzándose la zona de máximos para meses de máxima intensidad de radiación solar incidente sobre el tablero (Junio, Julio) y la zona de mínimos para meses de mínima radiación (Noviembre, Diciembre, Enero). En cuanto a la evolución del máximo gradiente térmico negativo (o inverso) puede observarse que la variación es prácticamente imperceptible manteniéndose dicho gradiente máximo con un

valor constante de escasa magnitud. Cabe señalar que el instante para el cual se inducen las máximas curvaturas térmicas positivas (máximos gradientes positivos) tiene lugar, para todos los meses del año, en horas posteriores al mediodía solar comprendidas entre las 14.50 horas y las 15.0 horas. No obstante, dicho instante puede sufrir desfases temporales si los valores adoptados por los parámetros ambientales, físicos y geométricos hubiesen sido otros (existencia de capa asfáltica, conductividad térmica del hormigón, canto de la losa,...). El instante para el cual se inducen las máximas curvaturas térmicas impuestas negativas (máximos gradientes negativos) tiene lugar entre las 5.50 horas y 7.0 horas de la mañana coincidiendo dicho instante prácticamente con el instante para el cual las temperaturas medias de la sección son mínimas.

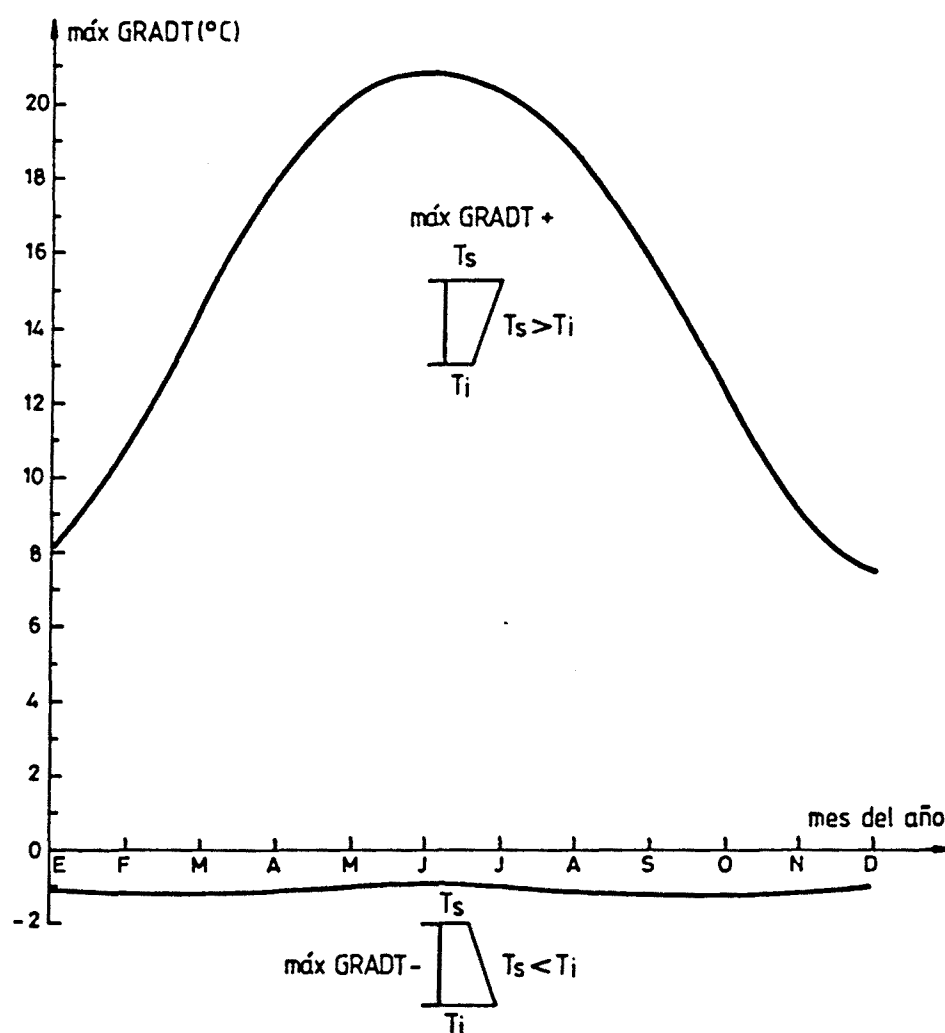


Tabla 3.36.- Evolución de los máximos gradientes térmicos verticales positivos y negativos a lo largo del año.

Los resultados obtenidos para los gradientes térmicos transversales quedan reflejados en la figura 3.37 en donde se muestra la evolución de los máximos a lo largo del año.

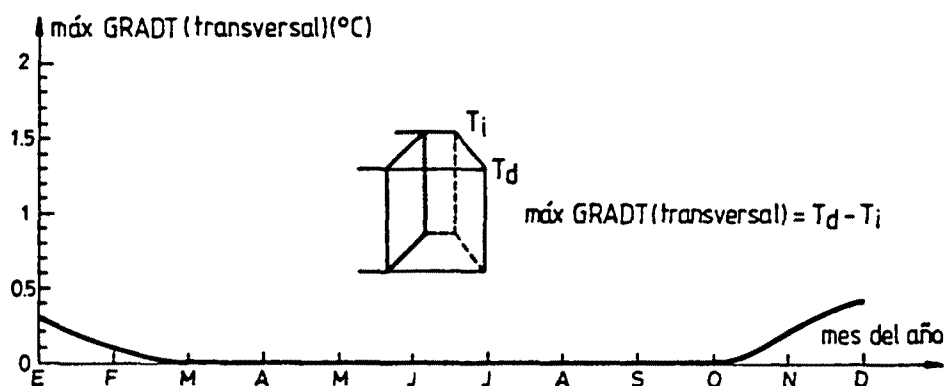


Fig. 3.37.- Evolución del máximo gradiente térmico transversal a lo largo del año.

Como puede apreciarse en la figura, y como era de esperar, los valores alcanzados por el gradiente térmico transversal son despreciables a lo largo de todo el año. No obstante, en meses de invierno, Diciembre y Enero fundamentalmente, dicho gradiente no es idénticamente nulo ya que, debido a la pequeña inclinación de los rayos solares con respecto al plano horizontal - tangente a la superficie terrestre - incide radiación solar sobre uno de los paramentos laterales de la sección y ello origina diferencias de temperatura, aunque mínimas, según el eje horizontal o transversal de la sección.

En general, puede concluirse, a priori, que la influencia de dicho gradiente sobre la respuesta estructural de puentes de hormigón de sección losa maciza es despreciable. Sin embargo, parámetros como la latitud y el azimut, de los cuales se hablará con posterioridad, pueden incidir de forma algo más notable en el valor que adopte el gradiente térmico transversal.

A continuación, la figura 3.38 muestra la evolución de las temperaturas medias máximas y mínimas de la sección analizada a lo largo del año así como la del incremento máximo de temperatura media que tiene lugar para cada mes.

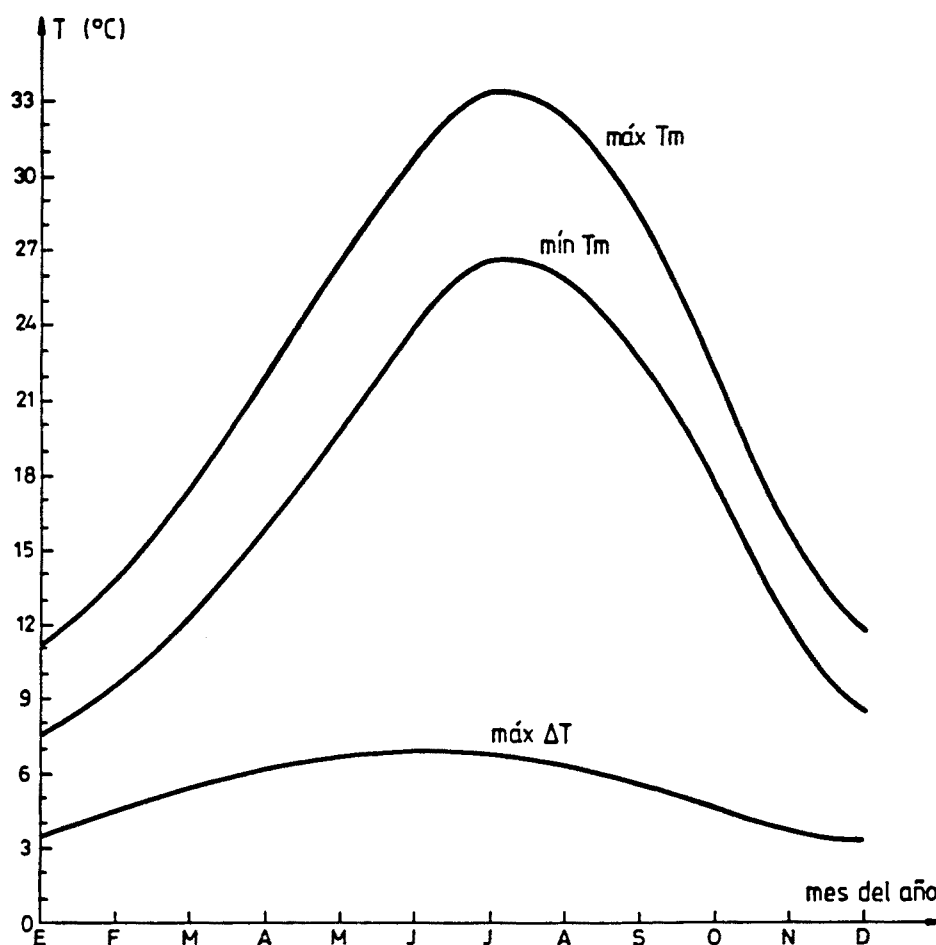


Fig. 3.38.- Evolución de las temperaturas medias máxima y mínima y del incremento relativo máximo de temperatura media a lo largo del año en la losa de 0.60 metros de canto.

En dicha figura puede apreciarse que las temperaturas medias máximas y mínimas más altas se alcanzan en los meses de verano y las más bajas en los meses de invierno como era de esperar. Por otra parte, el rango de variación diaria de la temperatura media alcanza su máximo para los meses de máxima intensidad de radiación solar (Junio y Julio) siendo la expansión eficaz diaria correspondiente del orden de 0.07 mm/m.

Dicha expansión es del mismo orden que la expuesta por Mathivat (64), en donde el autor señala, en base a medidas de temperaturas efectuadas en obras de hormigón, que la dilatación o contracción máxima diaria experimentada por un tablero de puente se encuentra en torno a los 0.06 mm/m. En cuanto al rango de variación anual de la temperatura media de la sección analizada puede observarse que éste alcanza un valor máximo de 26°C, valor que está perfectamente de acuerdo con lo propuesto por la normativa nacional vigente ((31),(68)), mediante la cual, a partir del espesor ficticio de la pieza, se obtiene un incremento uniforme de temperatura en época de calentamiento de +12.8°C y un decremento uniforme en época de enfriamiento de -12.8°C. No obstante, bajo unas condiciones climatológicas y ambientales algo más severas es de esperar que, en algunas ocasiones, el rango de variación anual de la temperatura media de un puente losa de hormigón supere el valor adoptado en la normativa.

Por último, en lo referente al análisis tensional se observa que la máxima tracción se alcanza, independientemente del día analizado, en los nodos situados en las esquinas inferiores de la losa y ello ocurre en horas de madrugada comprendidas entre las 3 horas y 4 horas. El valor de dicha máxima tracción sí depende del día analizado alcanzándose el máximo para el mes de Junio y el mínimo para el mes de Diciembre. La figura 3.39 muestra la evolución anual de dicha tracción máxima.

En ella puede apreciarse que el valor máximo se encuentra próximo a los 23.0 Kp/cm². A pesar de ser éste un valor ciertamente considerable debe indicarse que los nodos contiguos al nodo en cuestión se ven solicitados por tensiones de tracción notablemente más bajas; de esta forma la sollicitación pico de tracción no se extiende a zonas más o menos extensas sino más bien a zonas puntuales de la sección.

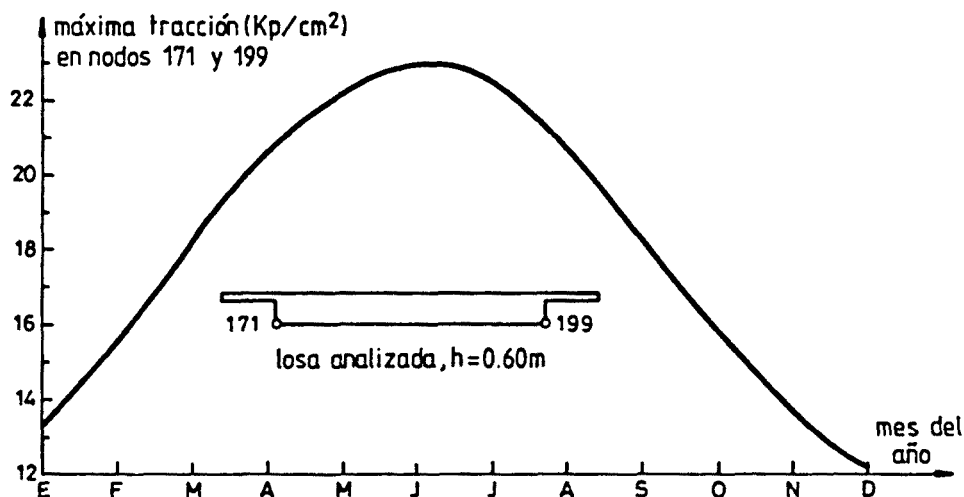
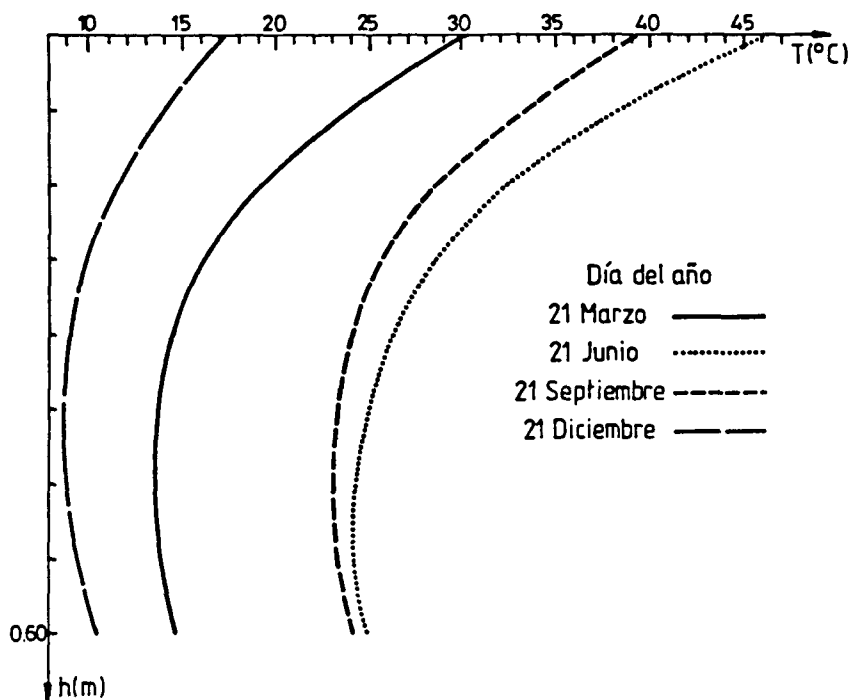


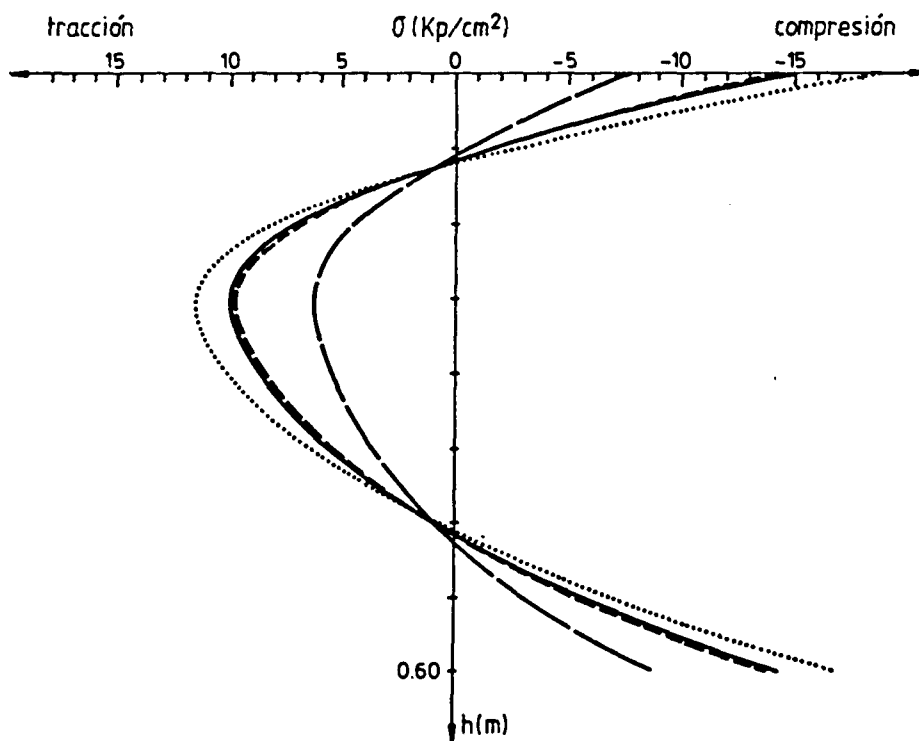
Fig. 3.39.- Evolución de la máxima tensión de tracción (nodos 171 y 199) a lo largo del año.

Cabe señalar que el estudio paramétrico llevado a cabo para analizar la influencia del día del año en la respuesta térmica y tensional conlleva la necesidad de ajustar las condiciones de temperatura ambiente al día analizado en cuestión. Dicho ajuste no desvirtúa los resultados obtenidos referentes a las distribuciones de tensiones autoequilibradas y a los gradientes e incrementos relativos de temperatura media de la sección ya que, por una parte, la influencia del valor de la temperatura ambiente media diaria es prácticamente despreciable y, por otra, la oscilación térmica o rango de variación diaria de aquélla no varía excesivamente en el caso particular que nos ocupa (ver tabla 3.6).

A continuación, las figuras 3.40.a y 3.40.b muestran las distribuciones de temperaturas y de tensiones autoequilibradas según el eje de simetría de la sección losa maciza de 0.60 metros de canto correspondientes a los instantes para los cuales se alcanzan los máximos gradientes térmicos lineales positivos en función del día del año.



a) Distribución de temperaturas



b) Distribución de tensiones

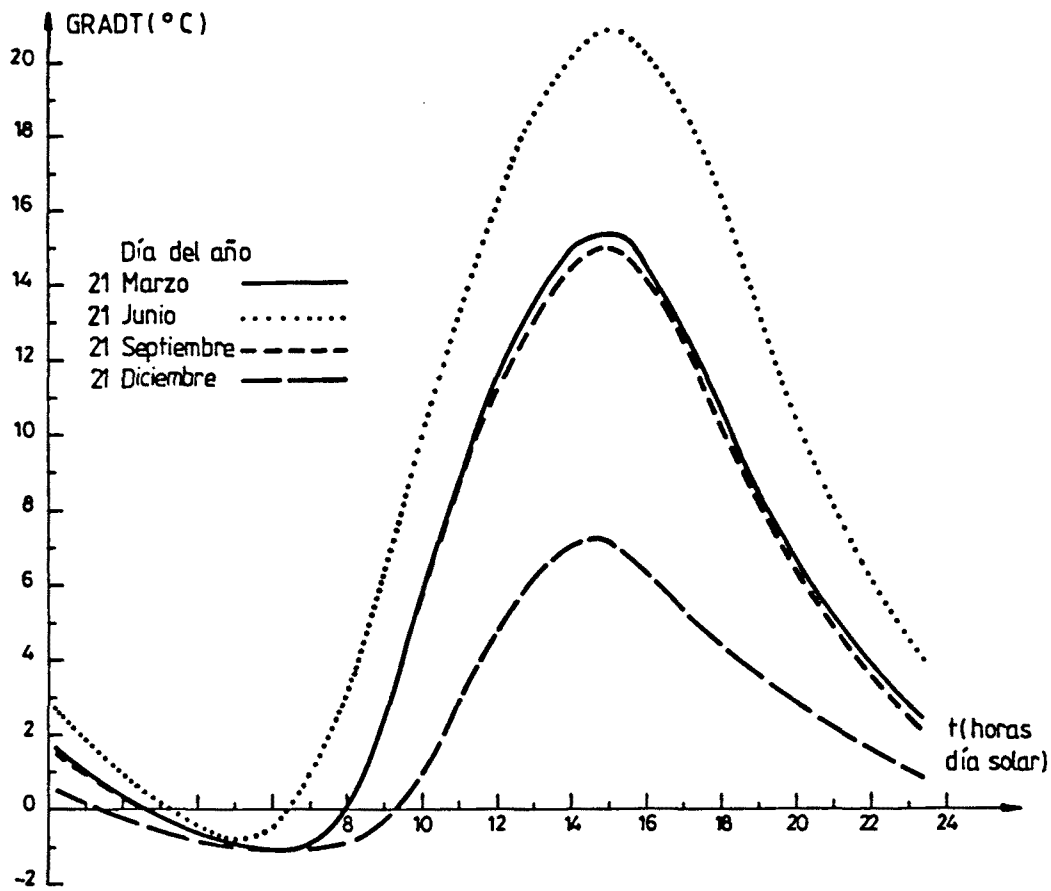
Fig. 3.40.- Distribuciones de temperaturas y de tensiones en la losa de canto 0.60 metros correspondientes a instantes de máximo gradiente térmico para diferentes días del año.

Los resultados presentados corresponden a los solsticios de invierno y verano y a los equinoccios de primavera y otoño. Las temperaturas ambientes máximas y mínimas adoptadas en el estudio paramétrico son las correspondientes a los meses de Diciembre, Junio, Marzo y Septiembre respectivamente (tabla 3.6).

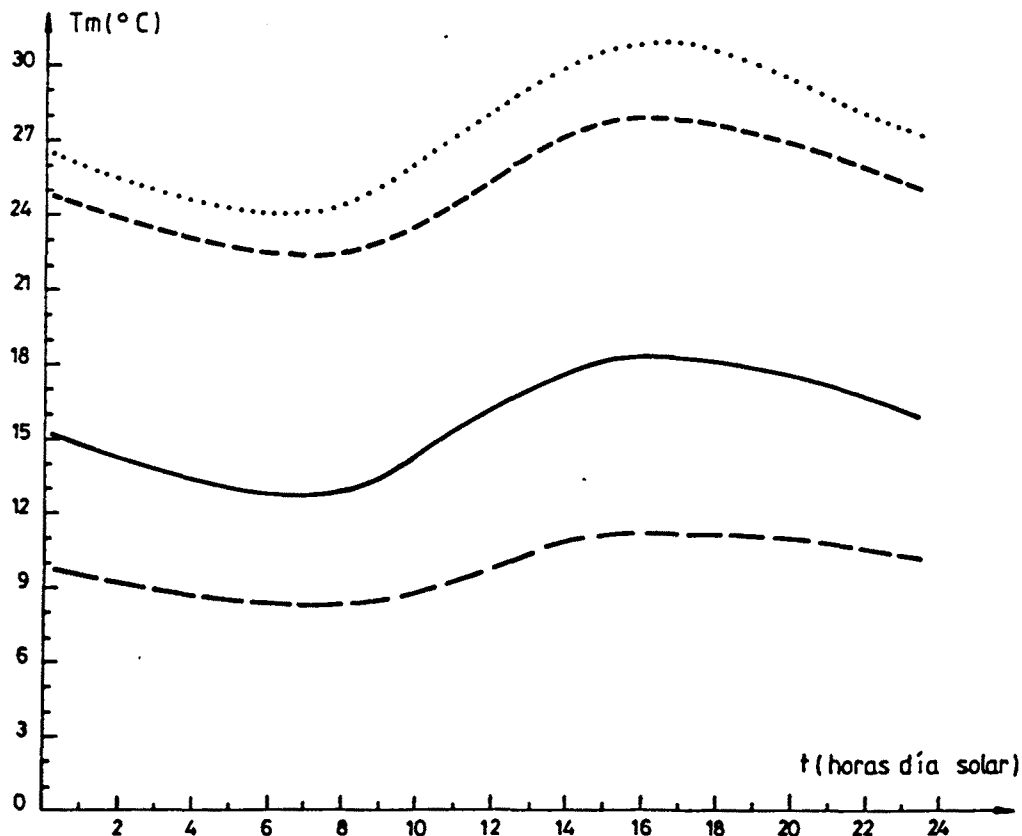
En la citada figura puede observarse que la distribución de temperaturas que presenta una no linealidad más acusada es la correspondiente al solsticio de verano y es por ello por lo que las tensiones internas autoequilibradas asociadas a dicha distribución son más elevadas. Por otra parte conviene destacar el hecho de que las distribuciones de tensiones obtenidas en los equinoccios de primavera y otoño son prácticamente idénticas aun siendo las distribuciones de temperaturas sensiblemente diferentes. Ello pone de manifiesto y corrobora la idea ya apuntada de que la influencia de la condición de contorno de la temperatura ambiente sobre las distribuciones de tensiones, gradientes térmicos e incrementos relativos de temperatura media es despreciable.

No obstante, se aprecian diferencias notables entre las distribuciones de temperatura en lo que se refiere a su magnitud -perfiles de distribuciones sensiblemente paralelos- y ello sí puede achacarse al valor de la temperatura ambiente media correspondiente al día analizado. Por otra parte, cabe hacer hincapié en el elevado valor que alcanza la temperatura en la fibra superior del tablero de hormigón en el solsticio de verano, cercano a los 45°C; tal valor atiene a unas condiciones ambientales que inducen máximas temperaturas en el tablero del puente (mínimo factor de turbidez, máxima radiación solar, mínima velocidad de viento,...).

Las evoluciones diarias del gradiente térmico y de la temperatura media de la sección, en función del día del año, vienen reflejadas en la figura 3.41.



a) Gradiente térmico



b) Temperatura media de la sección

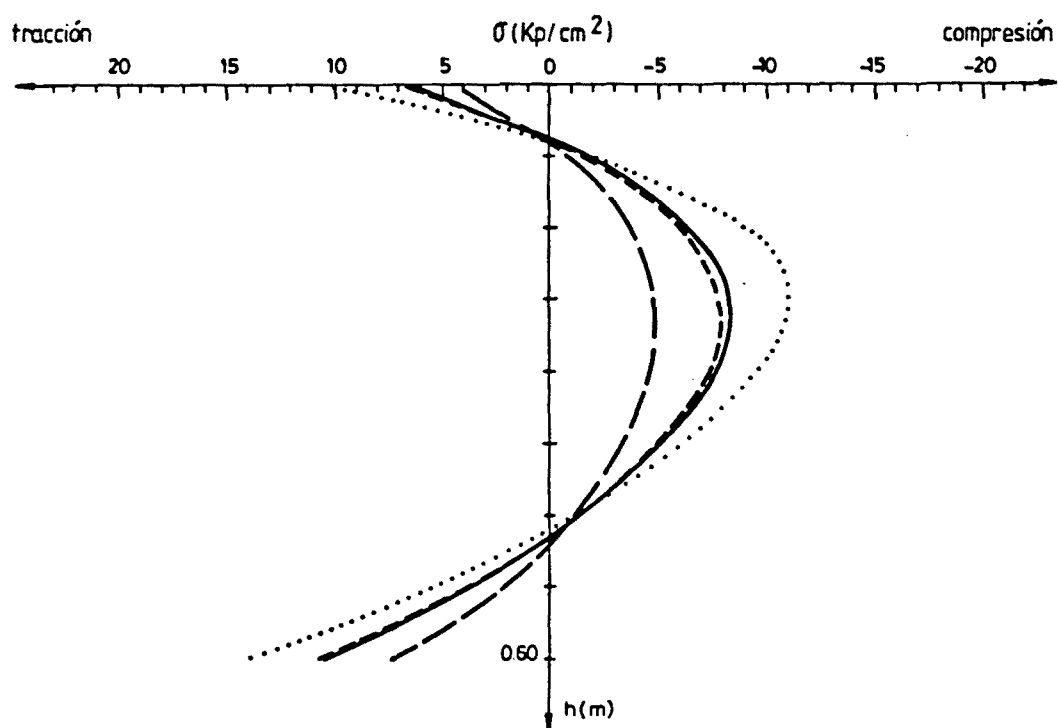
Fig. 3.41.- Evolución diaria del gradiente térmico y de la temperatura media de la sección para diferentes días del año.

En ambas figuras se aprecia que la ley de variación del gradiente y de la temperatura media es de tipo periódico. Los máximos gradientes positivos se alcanzan en horas posteriores al mediodía solar -entre las 14 horas y las 15 horas- y los mínimos (máximos gradientes inversos o negativos) tienen lugar a primeras horas de la mañana -entre las 5 horas y las 6 horas-. En cuanto a la evolución de la temperatura media de la sección, puede observarse que los máximos y mínimos de dicha función se alcanzan con un retraso de aproximadamente 1 ó 2 horas respecto a los instantes de máximos y mínimos gradientes respectivamente.

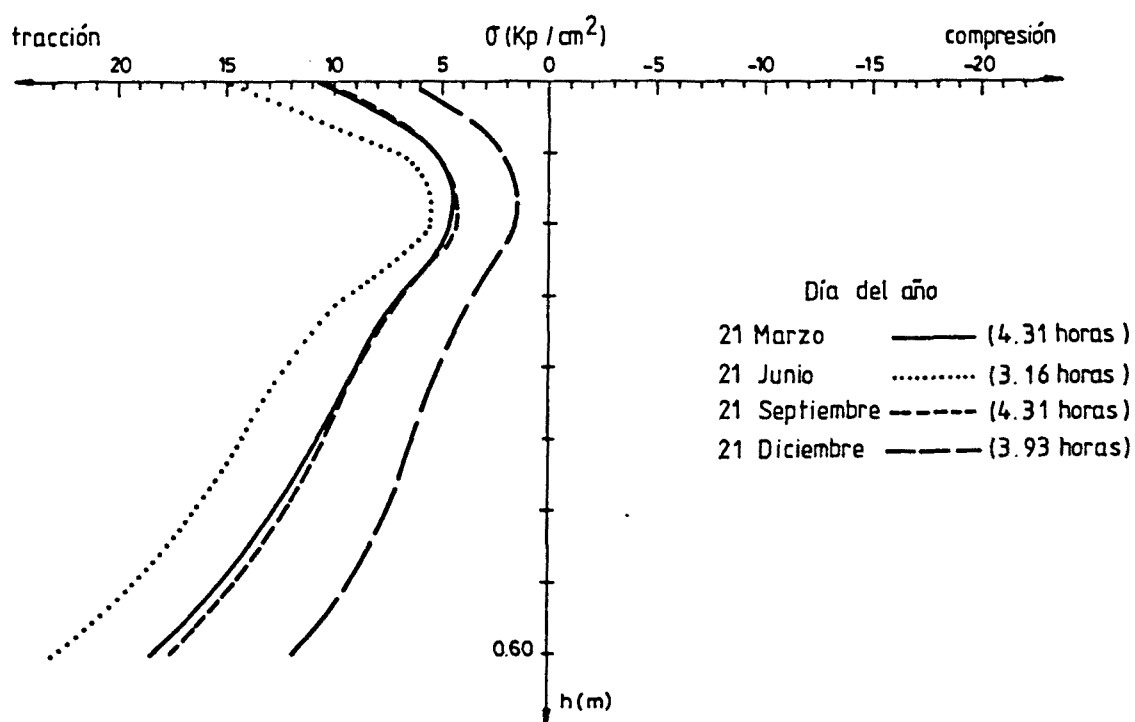
Por otra parte, para el solsticio de verano se obtienen los gradientes máximos más altos y los mayores rangos de variación del gradiente y de la temperatura media, mientras que para el solsticio de invierno la situación es la diametralmente opuesta. Asimismo, comparando los resultados obtenidos para los equinoccios de primavera y otoño se aprecian diferencias notables entre las respectivas evoluciones diarias de la temperatura media de la sección, pero no así en las evoluciones del gradiente térmico.

A continuación, la figura 3.42 muestra las distribuciones de tensiones autoequilibradas correspondientes a los instantes para los cuales se alcanza la máxima tracción en algún punto de la sección analizada. En dicha figura puede observarse que la tracción máxima tiene lugar en horas de madrugada y solicita los nodos situados en las esquinas inferiores de la sección.

En resumen, puede concluirse que el día del año, para el cual se evalúa la acción térmica y los correspondientes estados tensionales, tiene una notable influencia sobre la respuesta térmica y tensional del puente.



a) Tensiones según el eje de simetría de la sección



b) Tensiones según el eje que contiene el paramento lateral de la sección

Fig. 3.42.- Distribuciones de tensiones autoequilibradas, según diversos ejes, correspondientes al instante en que se genera la máxima tracción para diferentes días del año.

Analizando los resultados derivados del estudio paramétrico se desprenden algunas conclusiones:

- Las distribuciones de temperaturas para todos los meses del año muestran perfiles similares entre sí. La diferencia más apreciable estriba en la magnitud de dichas temperaturas, la cual depende de la temperatura ambiente media diaria.
- En días de verano las distribuciones de temperaturas presentan una no linealidad más acusada y, por lo tanto, mayores son las tensiones internas autoequilibradas. En días de invierno las tensiones internas son menores mientras que en días de primavera y otoño la magnitud de dichas tensiones es similar entre sí e intermedia a la de los dos casos anteriores.
- Los máximos gradientes térmicos positivos tienen lugar en los meses de verano mientras que el máximo gradiente térmico negativo puede suponerse constante a lo largo del año y de un valor próximo a 1°C (en este último caso, recordemos que la temperatura de la fibra inferior del tablero es mayor que la de la fibra superior).
- Los gradientes térmicos transversales son prácticamente despreciables (inferiores a 0.5°C). La época del año en la que pueden originarse tales gradientes corresponde a los meses de invierno, para los cuales los rayos solares poseen poca inclinación con respecto a un plano tangente a la superficie terrestre e inciden sobre los paramentos laterales de la sección del puente.
- Los máximos incrementos relativos diarios de temperatura media de la sección (máximas expansiones diarias) tienen lugar en los meses de verano.

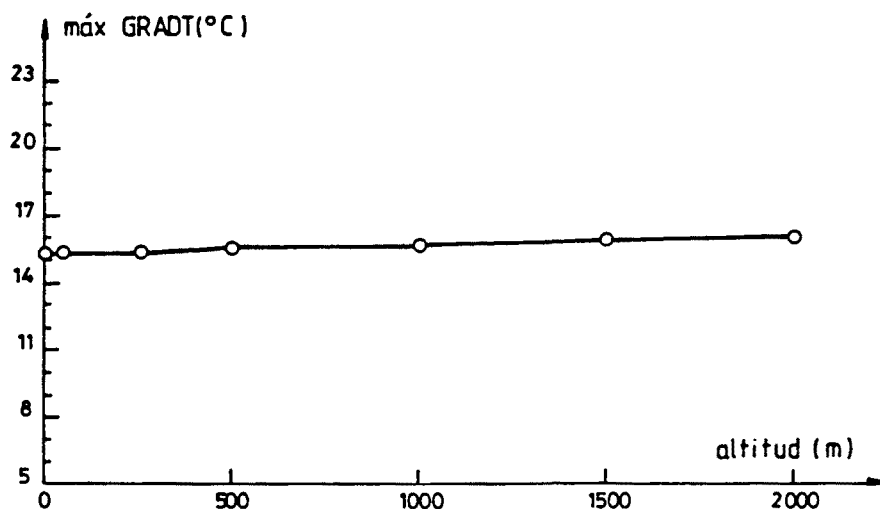
Por consiguiente, cabe pensar que las condiciones más desfavorables a las que se ve expuesto un puente losa maciza de hormigón, en lo que se refiere a la acción térmica ambiental, acaecen en días de verano y, en particular, próximos al solsticio.

Altitud

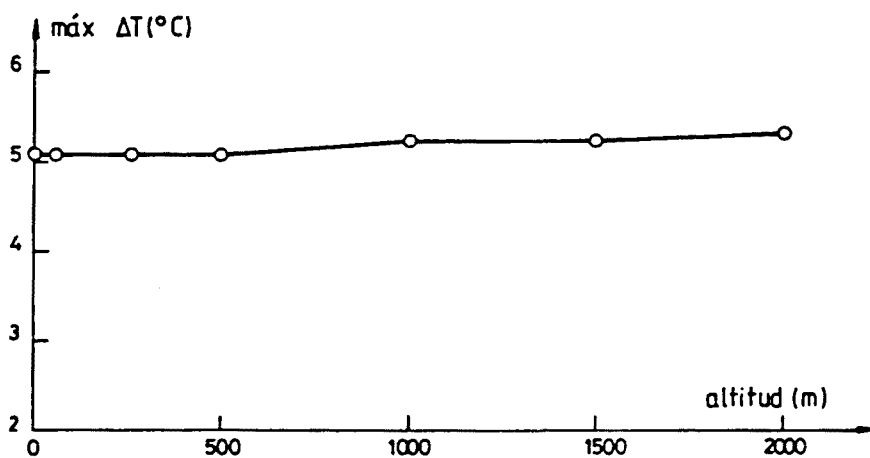
Este parámetro, junto con la latitud y el azimut del puente, definen el emplazamiento de éste y, por lo tanto, las condiciones de contorno correspondientes a su situación geográfica y a la dirección del eje longitudinal del puente. La introducción de la longitud como parámetro a tener en cuenta en el fenómeno de la transmisión de calor en puentes de hormigón no es necesaria si se trabaja a lo largo del estudio con tiempo solar verdadero.

Lógicamente, todos los análisis paramétricos pueden llevarse a cabo trabajando con tiempo oficial. No obstante, ello implicaría la necesidad de pasar de horario oficial a tiempo solar verdadero para conocer la intensidad de radiación solar incidente en el puente realizando, previamente, las oportunas correcciones correspondientes a los horarios de invierno y verano y a la diferencia entre la longitud del emplazamiento del puente y la longitud del meridiano que define el huso horario donde se encuentra el puente a analizar. Por estas razones de tipo práctico se ha creído oportuno el no considerar la longitud como parámetro definitorio del emplazamiento.

En lo que se refiere a la altitud del puente, los resultados más importantes derivados del estudio paramétrico se recogen en la figura 3.43. En ella se muestra la variación del máximo gradiente térmico y del máximo incremento relativo de temperatura media con la altitud. Dicho parámetro adopta los valores de 0, 45, 250, 500, 1000, 1500 y 2000 metros, los cuales cubren un porcentaje muy elevado de los puentes de esta tipología que pueden encontrarse en España.



a) Máximos gradientes térmicos positivos



b) Máximos incrementos relativos de temperatura media

Fig. 3.43.- Influencia de la altitud sobre los gradientes e incrementos relativos de temperatura media máximos.

Como puede observarse, la variación del gradiente o de la temperatura media de la sección con la altitud a la que se sitúa el puente es prácticamente imperceptible. A idéntica conclusión se llega con la variación de las distribuciones de temperaturas y de tensiones internas autoequilibradas.

Así pues, puede concluirse que la altitud influye mínimamente en el fenómeno de la transmisión de calor en puentes de hormigón de sección losa maciza y no merece ser tenida en cuenta en la obtención de tensiones térmicas autoequilibradas y acciones térmicas impuestas.

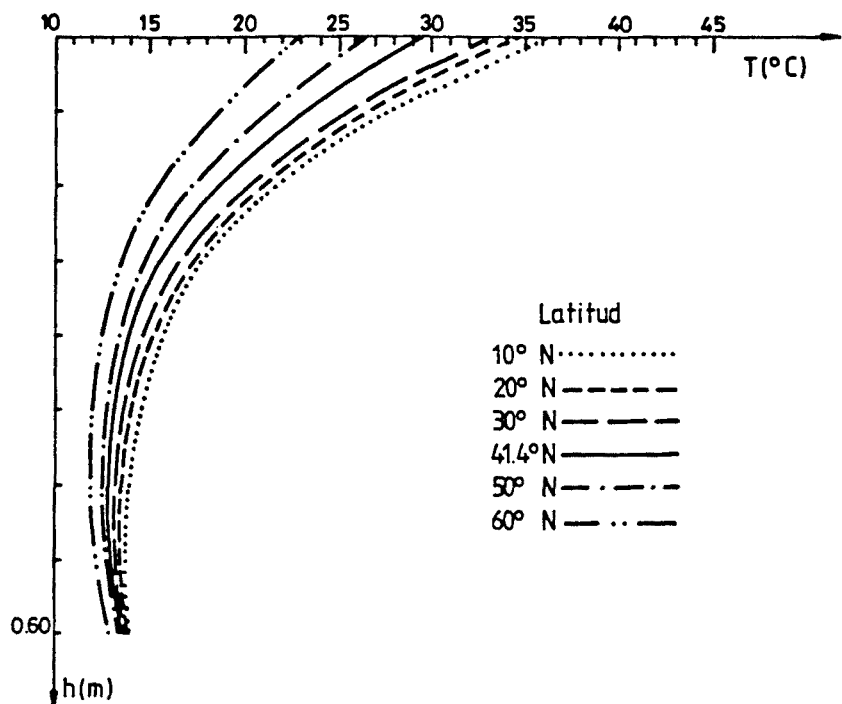
Latitud

Para el estudio paramétrico de la latitud geográfica se han adoptado los valores de latitud Norte 10°N , 20°N , 30°N , 40°N , 41.4°N , 50°N , 60°N , 70°N y 80°N (la Península Ibérica y las Islas Baleares se encuentran incluídas entre las latitudes $36^{\circ}0'\text{N}$ de Tarifa y $43^{\circ}47'\text{N}$ de Estaca de Bares mientras que el archipiélago canario se encuentra entre las latitudes $27^{\circ}30'\text{N}$ y $29^{\circ}30'\text{N}$ aproximadamente).

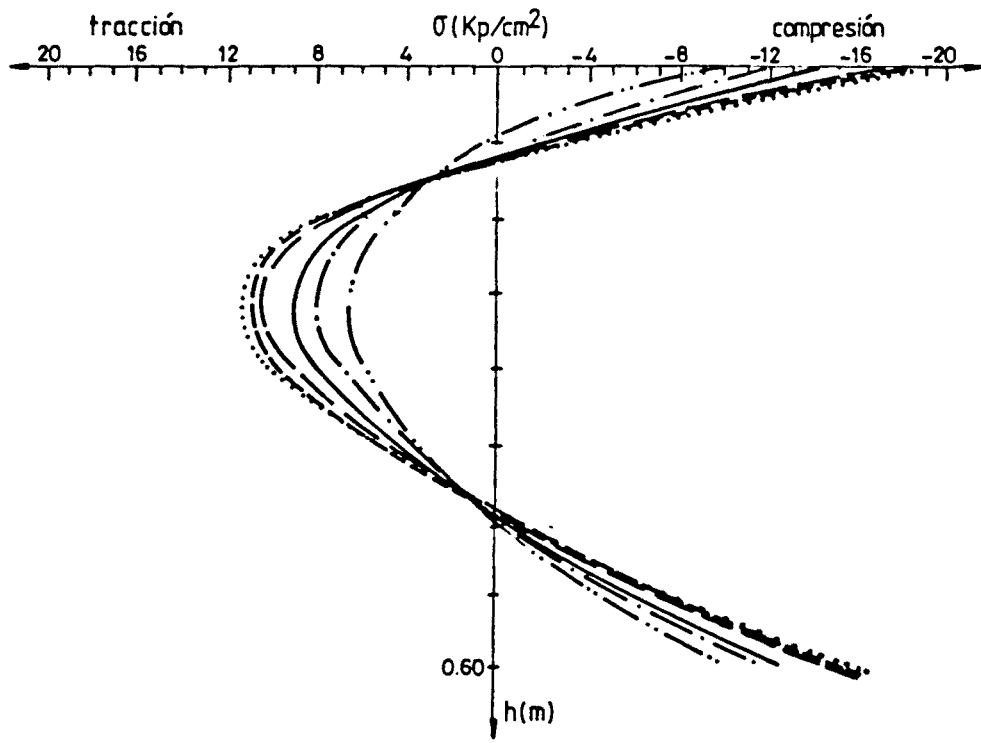
Las figuras 3.44.a y 3.44.b muestran las distribuciones de temperaturas y de tensiones autoequilibradas según el eje de simetría de la sección losa maciza de 0.60 metros de canto correspondientes a los instantes para los cuales se alcanzan las máximas curvaturas térmicas inducidas en función de la latitud.

De la observación de las gráficas presentadas se desprende que cuanto más cercano es el emplazamiento del puente al Ecuador mayor es el efecto de la radiación solar y mayor es la temperatura alcanzada en la fibra superior de la losa analizada. Por consiguiente, para latitudes bajas las distribuciones de temperatura presentan una no linealidad más acusada que para latitudes altas y es por esta razón por la que las tensiones internas autoequilibradas, en el primer caso, adquieren una magnitud más elevada.

Las figuras 3.45.a y 3.45.b reflejan la evolución diaria del gradiente térmico y de la temperatura media de la sección para diferentes valores de la latitud. En ellas puede apreciarse que tanto el gradiente térmico como la temperatura media de la sección siguen una ley de tipo periódico en la que los máximos de ambas funciones ocurren en horas posteriores al mediodía solar -entre las 14.50 horas y las 16.50 horas-. Debido a la propia evolución de la transmisión de calor a través de la sección analizada existe un desfase horario de aproximadamente 2 horas entre los instantes para los cuales se alcanzan dichos máximos.

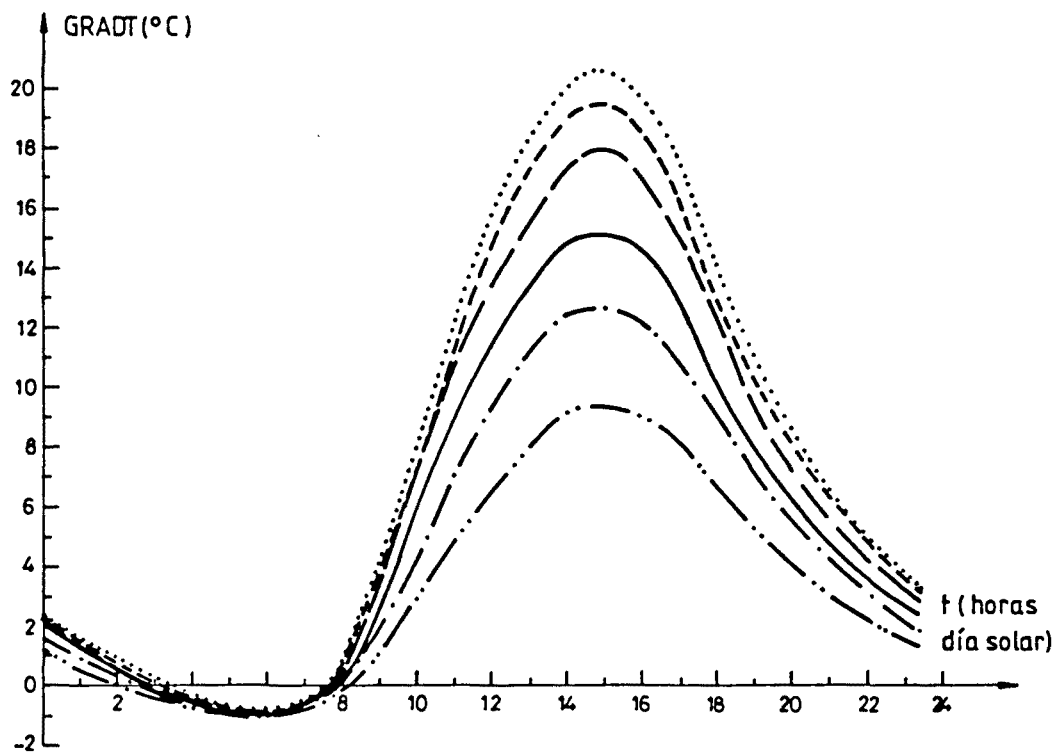


a) Distribución de temperaturas

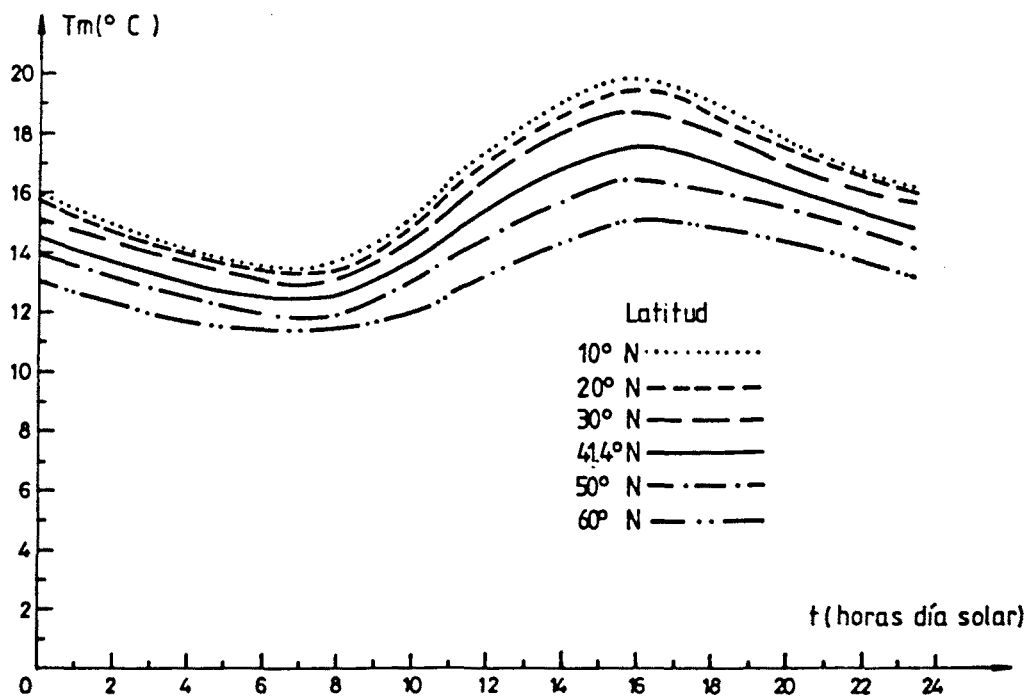


b) Distribución de tensiones

Fig. 3.44.- Distribuciones de temperaturas y tensiones en la losa de canto 0.60 metros correspondientes a instantes de máximos gradiente térmico para diferentes valores de la latitud.



a) Gradiente térmico



b) Temperatura media en la sección

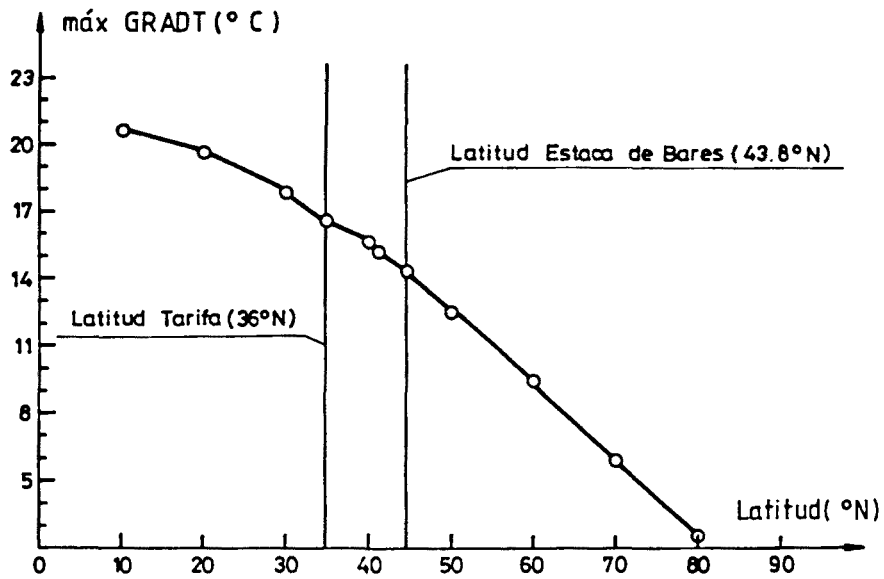
Fig. 3.45.- Evolución del gradiente térmico y de la temperatura media a lo largo del día para diferentes valores de la latitud.

Por otra parte, puede observarse que para latitudes bajas los rangos de variación u oscilaciones diarias de ambas acciones térmicas son mayores. De ahí que, al mantenerse los valores de gradientes mínimos similares para cualquier valor de la latitud, el gradiente térmico máximo será más elevado cuanto más baja sea la latitud. En lo que se refiere a la evolución de la temperatura media de la sección, puede apreciarse que los valores máximos y mínimos de la misma así como sus rangos de variación diaria son mayores cuanto más baja es la latitud.

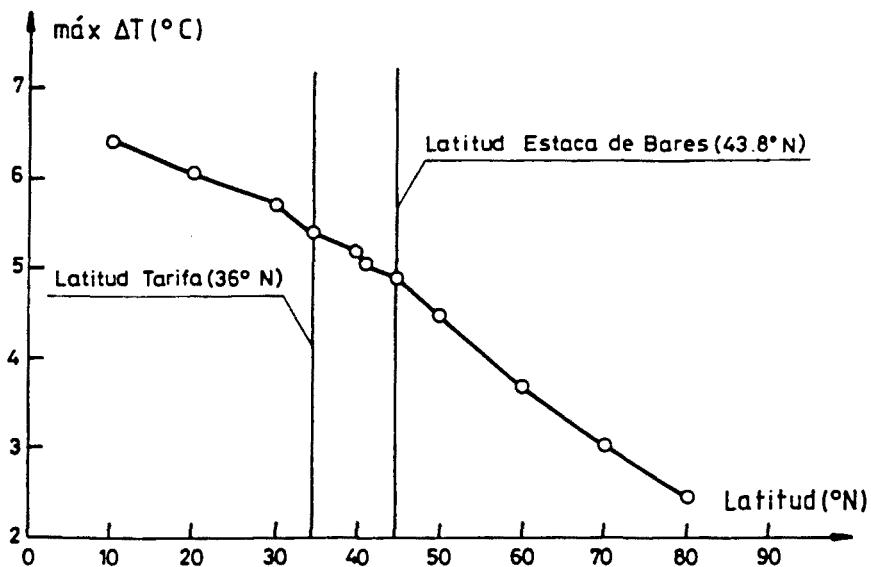
Las figuras 3.46.a y 3.46.b que se muestran a continuación reflejan la influencia de la latitud del lugar de emplazamiento del puente sobre los máximos alcanzados por las acciones térmicas.

En ellas puede apreciarse que la influencia de dicho factor es notable. Así pues, a medida que la latitud aumenta disminuyen de forma considerable los máximos gradientes térmicos y los máximos incrementos relativos de temperatura media. Por otra parte es de destacar el hecho de que para latitudes elevadas, iguales o superiores a los 65°N aproximadamente, aparecen gradientes térmicos en la dirección transversal; sin embargo, la magnitud de tales gradientes es muy pequeña no superándose en ningún caso una diferencia de temperatura entre paramentos laterales de 2°C para la losa analizada en cuestión.

En lo relativo a la magnitud de las tensiones internas autoequilibradas ya se ha comentado que ésta es mayor cuanto más baja es la latitud. De nuevo aquí, como en el resto de parámetros analizados anteriormente, se observan dos perfiles críticos de distribuciones tensionales. Uno de ellos tiene lugar en horas próximas al mediodía solar generándose las máximas tracciones en la zona intermedia de la sección mientras que el otro tiene lugar en horas de madrugada, apareciendo las las máximas tracciones en las zonas superior e inferior de la sección y en los paramentos laterales de ésta.



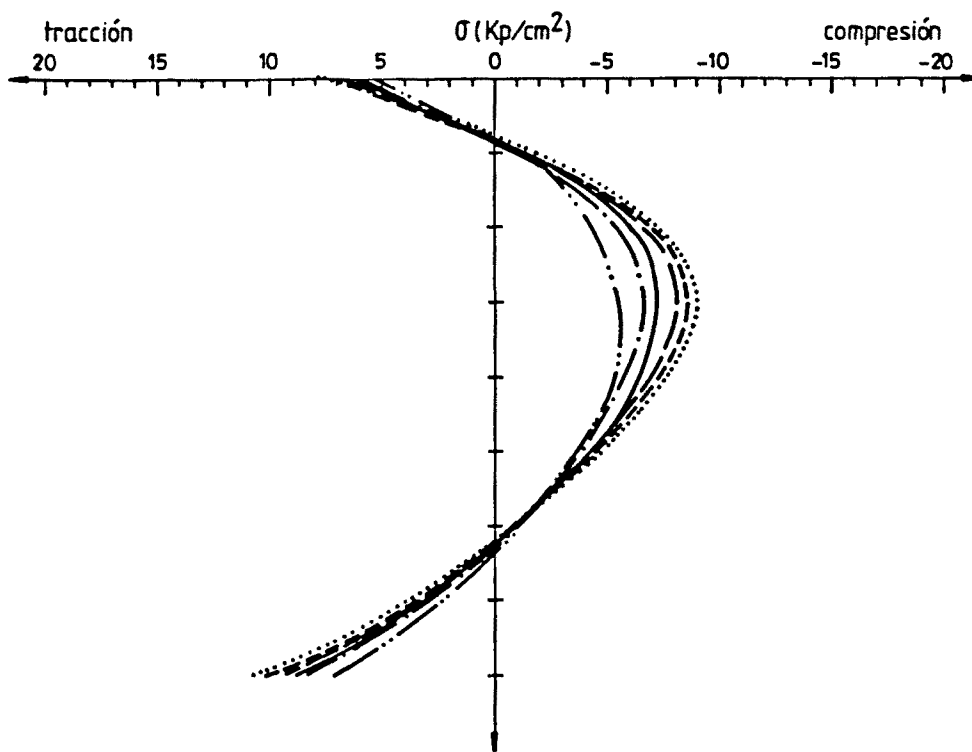
a) Máximos gradientes térmicos positivos



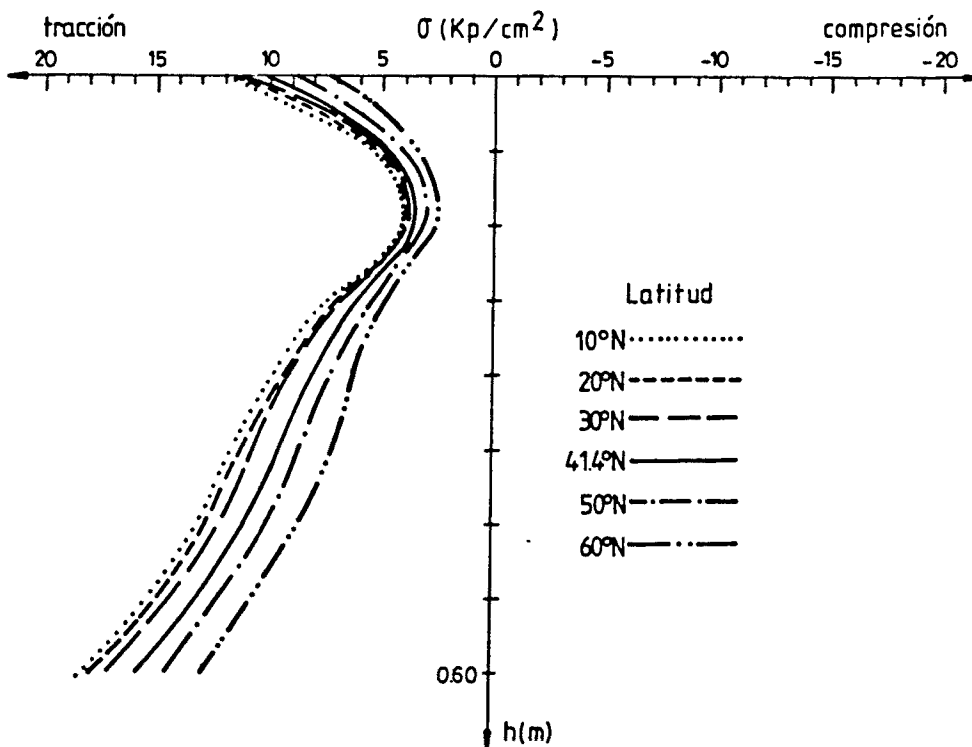
b) Máximos incrementos relativos de temperatura media

Fig. 3.46.- Influencia de la latitud sobre los gradientes e incrementos relativos de temperatura media máximos.

Las gráficas presentadas en la figura 3.47 muestran los perfiles de distribuciones tensionales correspondientes a instantes de horas de madrugada, para los cuales se alcanza la máxima tracción a lo largo del día analizado.



a) Tensiones según el eje de simetría de la sección



b) Tensiones según el eje que contiene el paramento lateral de la sección

Fig. 3.47.- Distribuciones de tensiones autoequilibradas, según diversos ejes, correspondientes al instante en el que se genera la máxima tracción para diferentes latitudes.

Resumiendo puede concluirse que:

- Cuanto menor es la latitud del lugar de emplazamiento del puente (más cercano al Ecuador) mayores son las tensiones internas autoequilibradas.
- Cuanto menor es la latitud del lugar de emplazamiento del puente mayores son los gradientes térmicos máximos y los incrementos relativos de temperatura media de la sección, así como los respectivos rangos de variación diaria del gradiente y de la temperatura media.
- Cuanto mayor es la latitud del lugar de emplazamiento del puente mayor es el gradiente térmico transversal (menor ángulo de inclinación de los rayos solares con respecto a un plano tangente a la superficie terrestre en el punto considerado). No obstante, en la mayoría de los casos y para esta tipología en particular, la magnitud de dicho gradiente es despreciable.

Si bien este parámetro no posee un gran rango de variación dentro del territorio nacional, a igualdad del resto de condiciones ambientales y de parámetros físicos y estructurales del puente y atendiendo exclusivamente a este factor, pueden observarse diferencias entre máximos gradientes y máximos incrementos relativos de temperatura media de la sección del orden de 2°C y 0.5°C respectivamente. Ello supone un aumento de las acciones térmicas en el sur con respecto a las del norte de un 14% para el gradiente y de un 10% para el incremento relativo de temperatura media.

Es evidente pues que puentes emplazados en la zona meridional del territorio nacional se encuentran en condiciones más desfavorables que los emplazados en la zona septentrional, en lo que se refiere a la consideración de este factor.

Azimut

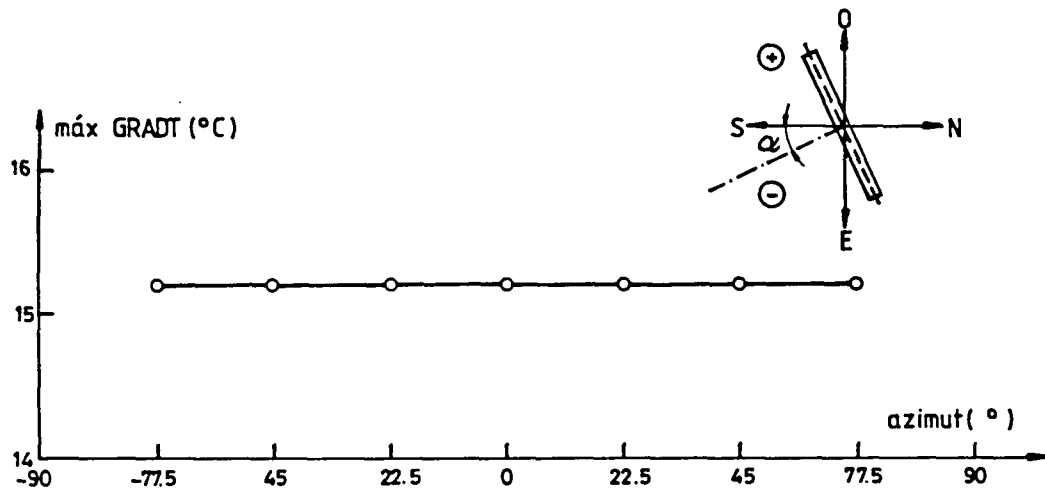
La orientación del puente, definida por el azimut del eje longitudinal, también influye en la distribución de temperaturas y, por consiguiente, en las tensiones autoequilibradas y en las acciones térmicas asociadas. Para un azimut nulo, es decir, dirección del puente este-oeste, el ángulo de inclinación del rayo solar será elevado y en general los voladizos proyectarán sombra sobre los paramentos laterales de la sección a lo largo de todo el día.

En el caso de azimut negativo -dirección del puente nordeste-suroeste- a primeras horas del día solar y debido a la baja inclinación de los rayos solares, éstos pueden incidir directamente en uno de los paramentos laterales de la sección creándose así una nueva fuente de energía calorífica en determinados instantes del día. Ello originará, en consecuencia, gradientes térmicos transversales a lo largo de todo el período temporal analizado.

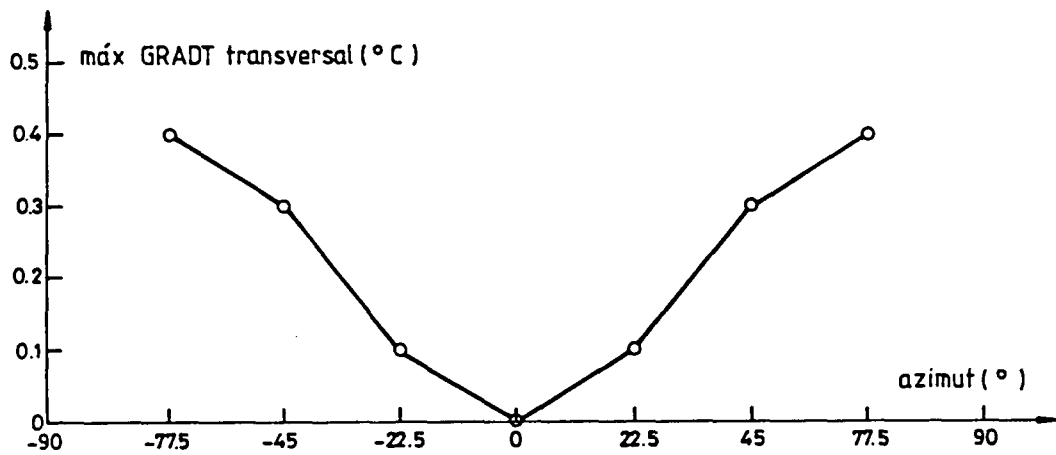
En el caso de puentes con azimut positivo -dirección noroeste-sudeste- la evolución de la radiación es la simétrica del caso anterior con respecto al mediodía solar. Es decir, existe radiación solar incidente sobre el paramento lateral de la sección, pero aquélla tiene lugar a últimas horas del día solar.

El estudio paramétrico se ha llevado a cabo para valores del azimut de -77.5° , -45° , -22.5° , 0° , 22.5° , 45° y 75° . La influencia de dicho parámetro sobre las acciones térmicas queda reflejada en la figura 3.48.

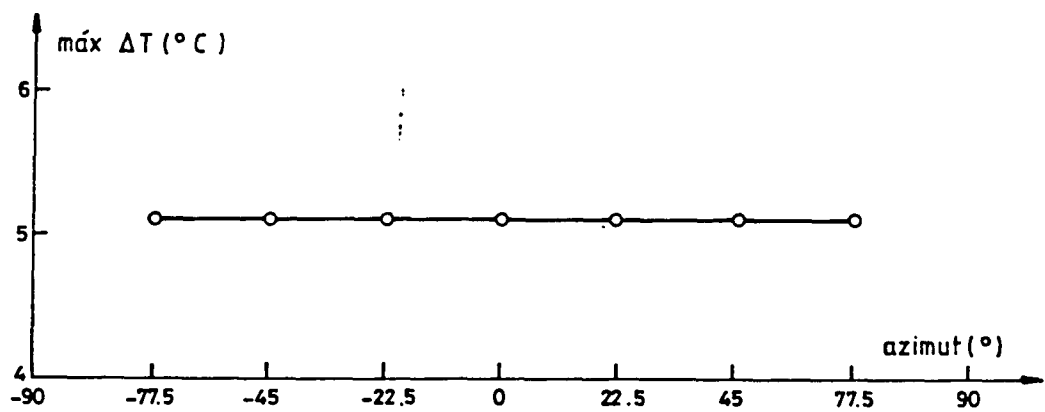
De las gráficas presentadas en dicha figura, se desprende que la influencia de la orientación del eje longitudinal del puente sobre la respuesta térmica de los puentes de hormigón de sección transversal losa maciza es prácticamente despreciable.



a) Máximos gradientes térmicos positivos verticales



b) Máximos gradientes térmicos transversales



c) Máximos incrementos relativos de temperatura media

Fig. 3.48.- Influencia del azimut sobre los valores máximos de gradientes térmicos e incrementos de temperatura media.

La figura 3.48.b muestra la existencia de gradientes térmicos según la dirección horizontal (transversal). La magnitud de tales gradientes depende del valor adoptado por el azimut. No obstante, en la misma figura puede apreciarse que los máximos de dicha acción térmica, correspondientes a los valores asignados al parámetro, son ciertamente insignificantes. Ello es así ya que, a pesar de que los paramentos laterales pueden estar a diferentes temperaturas -radiación solar incidente sobre uno de ellos- la integración del campo de temperaturas con respecto al eje vertical de simetría de la sección no viene influenciada de forma directa por la temperatura de dichos paramentos sino por la temperatura de la masa de hormigón existente a través de la sección total, la cual no se ve sensiblemente afectada por los cambios térmicos inducidos por la radiación solar absorbida en uno de los dos paramentos laterales.

Por consiguiente, puede concluirse que el azimut del puente no juega un papel importante en la transmisión de calor en puentes losa maciza de hormigón, siendo su influencia sobre las distribuciones térmicas y tensionales y sobre las acciones térmicas muy poco notoria.